

# Uso de mediciones de polarización inducida para eliminar riesgos de la exploración de hidrocarburos en el área de Fingerdjupet-Hoop, mar de Barents, Noruega

Kim Maver<sup>1\*</sup>, Phillip Hargreaves<sup>1</sup>, Andrea Klubika<sup>2</sup> y Sergey A. Ivanov<sup>3</sup> describen el uso de la PI y su aplicación como herramienta para eliminar riesgos en general y específicamente en el mar de Barents.

La exploración de hidrocarburos ha estado en curso en el mar de Barents desde la década de 1980. Hasta ahora, se han perforado diez pozos dentro del área de Fingerdjupet-Hoop con un éxito variable, pero con un resultado general decepcionante. Ahora, la industria de exploración está utilizando tecnologías alternativas en un intento de descubrir los secretos ocultos de esta prometedora región.

La XXIII Ronda de Licencias de Noruega incluye 14 bloques en el área de Fingerdjupet-Hoop. Como parte de la evaluación de prospectos del área y de la eliminación de riesgos de los futuros pozos, las mediciones de polarización inducida (PI) recientemente adquiridas, apoyadas por sísmica 2D con procesamiento de banda ancha, pueden proporcionar información valiosa (Maver et al., 2015).

Este artículo describirá el uso de la PI y sus aplicaciones como herramienta de eliminación de riesgos en la exploración en general y específicamente en el mar de Barents.

## Polarización inducida

El efecto de la PI se mide como resistividad eléctrica dependiente de la frecuencia y se distingue fácilmente de la resistividad óhmica típica. Aunque inicialmente se desarrolló para caracterizar depósitos minerales, la aplicación de este efecto ahora varía ampliamente; incluidas las áreas de investigaciones de hidrogeofísica, biogeofísica y ambientales, y en la actualidad parece prometedora como aplicación para la detección indirecta de hidrocarburos.

Una hipótesis actual sobre el mecanismo clave que subyace tras el efecto de la PI son las microfugas verticales desde los yacimientos de hidrocarburos. Las fugas causan una reacción química entre el compuesto de azufre de los hidrocarburos y el hierro de las rocas que hay sobre el yacimiento, creando un cuerpo de pirita diseminada. La alteración resultante de las propiedades de la roca se puede

medir y apunta a acumulaciones de hidrocarburos que se encuentran a más profundidad.

El cuerpo de pirita diseminada funciona de un modo similar a una batería casera común. Cuando se aplica una corriente, tarda cierto tiempo en que la batería se cargue y, de modo similar, habrá una disminución de voltaje una vez que la corriente se haya apagado. La cantidad de sobretensión cuando está “cargada” es una cuantificación del efecto de la PI, el cual se mide.

Hace cien años, Conrad Schlumberger reconoció la posibilidad de inferir información estructural del subsuelo a partir de las señales de voltaje medidas asociadas con las corrientes de polarización “provocadas” en la tierra. Se afirma que la PI se utilizó para la exploración de hidrocarburos tan temprano como en la década de 1930 (Bleil, 1953), con un uso más comercial en la década de 1980, como se revisa a través de cuatro ejemplos de la literatura científica (Stenberg, 1991). El método se ha utilizado más sistemáticamente en los últimos 15 años, principalmente en Rusia y con éxito.

Para medir el efecto de la PI, se remolca un sistema de cables marinos con un transmisor que porta dos electrodos separados 600-800 m, el primero a tan sólo unas decenas de metros del buque. Los detectores son una serie de electrodos espaciados entre ellos 200 m y organizados en tres conjuntos de tres electrodos, donde cada conjunto mide las diferencias de potencial del campo eléctrico.

La señal transmitida es un pulso escalonado que se enciende, durando normalmente 4-8 segundos, y después se apaga durante el mismo periodo de tiempo. Esto se repite con la polaridad opuesta para mantener el ruido estable.

La medición de la PI se procesa utilizando una inversión basada en la expresión Cole-Cole para la conductividad eléctrica de rocas mineralizadas saturadas de fluidos, la cual define una relación entre la conductividad eléctrica y la

<sup>1</sup> Spectrum.

<sup>2</sup> ORG Geophysical.

<sup>3</sup> Siberian Geophysical Research Production Company.

\* Correo electrónico del autor de contacto: Kim.Maver@spectrumgeo.com

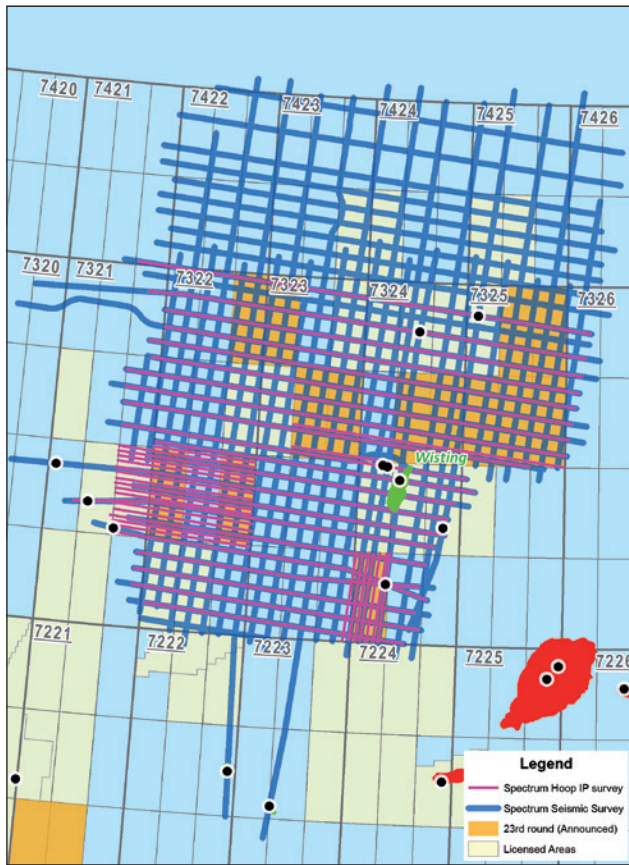


Figura 1 Mapa de la prospección del área de Fingerdjupet-Hoop.

capacidad de carga (Flekkøy, 2013). Los otros dos parámetros de la relación son el tiempo de relajación y un exponente, que se puede derivar de la forma de la caída de la señal medida (Veeken, 2009). Las mediciones se invierten de manera iterativa para la resistividad y la capacidad de carga en capas laterales que se han definido utilizando registros sísmicos y/o de pozo.

### Mar de Barents

En el área de Fingerdjupet-Hoop, se adquirió una prospección combinada en 2013/2014 consistente en 7500 km de sísmica 2D procesada con banda ancha y 3000 m de datos de PI uniendo nueve pozos (Figura 1). Se ha realizado una interpretación regional de la sísmica 2D de banda ancha, integrando los datos de los registros de pozo y utilizando los resultados de la inversión AVO, y se ha utilizado para evaluar los resultados de la PI.

En la Tabla 1 se indican los resultados de los pozos y los resultados de PI para el área de Fingerdjupet-Hoop.

Las Figuras 2 y 3 muestran ejemplos de los resultados de PI para los pozos Wisting Central y Apollo. Una fuerte anomalía de PI localmente, pero también en un contexto regional, se alinea con el principal bloque de falla del descubrimiento de Wisting, con anomalías más pequeñas asociadas con los bloques de falla vecinos (Figura 2). En comparación, el pozo Apollo estaba seco y un claro mínimo con baja PI se alinea con la localización del pozo, con anomalías de PI bastante elevadas en las inmediaciones.

Pozo	Nombre	Año	Reservorio objetivo	Resultado del pozo	Resultados de la polarización inducida (capacidad de carga)
7321/8-1		1987	Jurásico Inferior-Medio	Indicios	Sin anomalía
7321/9-1		1988	Triásico Superior-Jurásico Medio	Indicios	Sin anomalía
7324/10-1		1989	Triásico Inferior	Indicios	Sin anomalía
7324/8-1	Wisting Central	2014	Jurásico Inferior	50-60 m de columna de petróleo	Anomalía
7324/7-1S	Wisting Alternative	2014	Objetivo primordial, Triásico Medio	Seco con indicios	Anomalía de la misma magnitud que el pozo Hanssen
7324/2-1	Apollo	2014	Jurásico y Triásico Superior	Seco	Sin anomalía
7324/7-2	Hanssen	2014	Jurásico y Triásico Superior	20 m de columna de petróleo	Anomalía
7325/1-1	Atlantis	2014	Objetivo primordial, Triásico Medio	10 m de columna de gas	Anomalía
7324/8-2	Bjaaland*	2015	Objetivo primordial, Jurásico Medio y Triásico Superior	Seco	Sin anomalía pero con un elevado nivel de fondo

Tabla 1 Pozos perforados en el área de Fingerdjupet-Hoop y las mediciones de PI correspondientes. \*Desbalance de 1,1 km del pozo hasta la medición de PI.

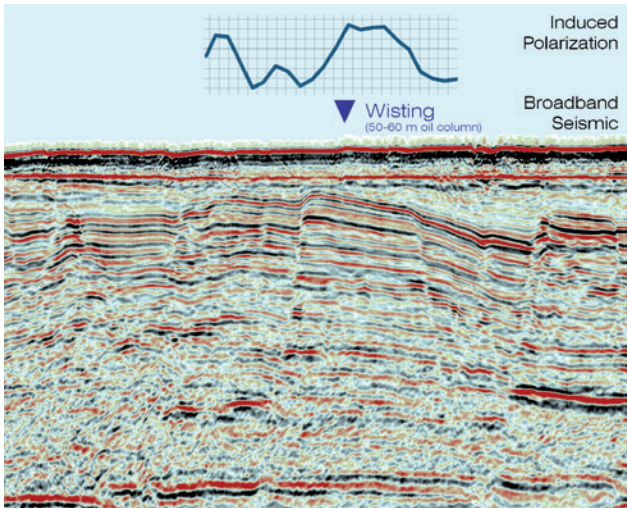


Figura 2 Sísmica procesada con banda ancha y mediciones de PI en el pozo Wisting.

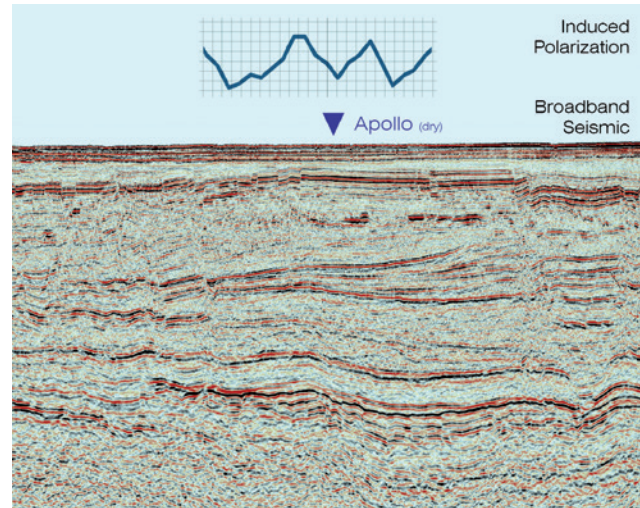


Figura 3 Sísmica procesada con banda ancha y mediciones de PI en el pozo Apollo.

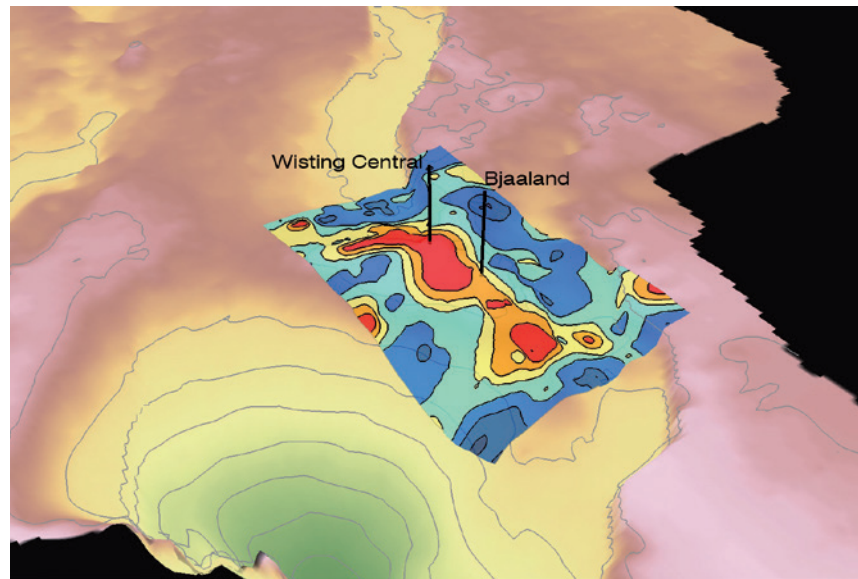


Figura 4 Mediciones de PI 2D cuadrículadas sobre la discordancia de la base del Cretácico y mostrando el pozo descubridor Wisting (anomalía roja) y el pozo seco Bjaaland (anomalía amarilla). Escala de color: el rojo indica una fuerte anomalía de PI. El naranja es la banda de incertidumbre de la anomalía. Del amarillo al azul oscuro se consideran el nivel de fondo.

De los nueve pozos unidos con las mediciones de PI se han pronosticado ocho pozos (Tabla 1). Wisting Alternative mostró indicios, pero, como en Hanssen, los datos de PI pronosticaron un descubrimiento. Éste se clasificó como falso positivo. Sin embargo, como ha mostrado el pozo, puede haber habido una acumulación de hidrocarburos anterior que haya dado lugar a un efecto de PI. Más tarde, el sello del yacimiento se habría roto, dando lugar a que los hidrocarburos migraran fuera, pero dejando atrás una paleoanomalía de PI (falso positivo).

En la plataforma continental noruega en general, se han adquirido más de 8500 km de datos de PI desde 2012. En 2012 y 2013, se pronosticaron los resultados de 38 de 42 pozos. El resultado de los datos de PI antes de perforar adquiridos sobre 13 ubicaciones de pozos muestra 12 predicciones correctas (tanto secos como descubrimientos).

Siberian Geophysical Research Production Company (SGRPC) ha adquirido 35000 km de datos en áreas de Rusia desde 2002 y cuenta con un porcentaje de éxito del 90% en sus predicciones de casi 200 pozos.

Las anomalías de PI se pueden utilizar como un fuerte indicador indirecto de hidrocarburos. Sin embargo, proporcionan menos información sobre la comercialidad de un pozo, ya que no se proporciona información sobre la cantidad de hidrocarburos, las propiedades del yacimiento y el momento de llenado del yacimiento. Además, la anomalía de PI puede ser un paleoefecto sobre un yacimiento que se ha filtrado, al cual, aunque difícil de identificar a través del procesamiento de datos de PI, se le pueden seguir eliminando riesgos a través de muestreo/testigos por caída en el fondo del mar o por prospecciones de satélite/

## Sísmica Pasiva

aerotransportadas de rezumes que detecten la fuga activa de hidrocarburos.

### Oportunidad geológica de éxito utilizando mediciones de PI

Las mediciones de PI se pueden utilizar como información de entrada para estimar la oportunidad geológica de éxito, que consiste en asignar fracciones de probabilidad a los siguientes parámetros:

$$\text{estructura} * \text{yacimientos} * \text{carga} * \text{retención} = \text{oportunidad geológica de éxito}$$

La medición es un fuerte indicador de la *estructura*, ya que la anomalía en general coincide con el contorno del campo, e indirectamente, y en menor medida, apunta a la presencia de un *yacimiento*. Es un indicador de la *carga*, ya que los hidrocarburos en la mayoría de los casos contienen azufre, que es uno de los constituyentes implicados en la generación de pirita. Finalmente, una anomalía de PI no proporciona ninguna información sobre la *retención* en el momento actual, ya que todos los hidrocarburos podrían haberse filtrado.

Para los pozos recientes perforados en el mar de Barents (Ørnen, Pingvin, Langtiden, Novarg y Heilo), la oportunidad geológica de éxito ha estado en el rango de 0,20 a 0,85. Asumiendo una certidumbre del 90% para los resultados de PI, cuando los hidrocarburos se predicen y se aplican a *estructura* y *carga*, al utilizar la medición la oportunidad de éxito general para los pozos sólo aumentará marginalmente. Sin embargo, cuando no hay anomalía de PI, indicando que no hay hidrocarburos presentes, el efecto de la oportunidad geológica de éxito es principalmente sobre la *carga*, la cual, asumiendo de nuevo una fiabilidad de la medición del 90%, se establecería en 0,1. No hay cambio del parámetro *estructura* porque no se puede evaluar cuando no hay anomalía. Pero con una *carga* de 0,1, las oportunidades geológicas de éxito representativas listadas anteriormente para Ørnen, Pingvin, Langtiden, Novarg y Heilo se reducirían a sólo 0,03 a 0,10, haciendo que la mayoría de los prospectos no sean comerciales.

Por tanto, los resultados de la PI se pueden utilizar de tres maneras:

- Para confirmar prospectos que tienen un efecto de PI positivo, pero no afecta realmente a la oportunidad geológica de éxito global
- Para devaluar significativamente prospectos cuando no hay presente un efecto de PI, dando lugar a una oportunidad geológica de éxito muy baja
- Para identificar áreas con nuevos prospectos potenciales que previamente no se han identificado en base a la cartografía y la interpretación convencionales.

### Comentarios finales

El método de la PI se ha conocido durante 100 años, pero sólo se ha utilizado sistemáticamente en la exploración de hidrocarburos en los últimos 15 años y en Noruega únicamente en los últimos tres años. Cuando se utiliza la PI para eliminar riesgos de la exploración, es importante entender la medición, las limitaciones y los fallos, un proceso que se aplica de manera similar a cualquier otro método geofísico.

Una anomalía de PI apunta a una acumulación de hidrocarburos que se encuentra a más profundidad, aunque no se aporta información sobre la profundidad de dicha acumulación. El tamaño de la anomalía no se puede utilizar para cuantificar la cantidad de hidrocarburos in situ, ya que depende del contenido en azufre de los hidrocarburos, el contenido en hierro de la sección somera y el tiempo en el que tienen lugar las microfugas. Un resultado de PI erróneo puede ser consecuencia de varios factores. En el caso de una acumulación de hidrocarburos que da lugar a una anomalía de PI y que posteriormente migra fuera porque se ha roto el sello es difícil distinguir entre una anomalía real y un falso positivo. Si los hidrocarburos han migrado recientemente dentro de un yacimiento sin dejar tiempo suficiente para crear una anomalía de PI, o si el sello del yacimiento de hidrocarburos es excepcionalmente compacto y limita las microfugas, el resultado será un efecto de falso negativo.

Aun cuando existen efectos de PI tanto falsos positivos como falsos negativos, una certidumbre del 90% para una predicción correcta hace que la medición sea valiosa para eliminar riesgos en los hidrocarburos, lo cual se puede mostrar en el concepto de oportunidad geológica de éxito.

Con más datos de PI adquiridos de modo sistemático en el futuro, se prevé que aumente el uso de este método, especialmente conforme se desarrolle una mejor comprensión de los conceptos básicos.

### Referencias

- Bleil, D.F. [1953] Induced polarization: A method for geophysical prospecting. *Geophysics*, 18, 636–661.
- Flekkøy, E.G. [2013] A physical basis for the Cole-Cole description of electrical conductivity of mineralized porous media. *Geophysics*, 78 (5), 355–368.
- Maver, K.G., Intawong, A., Nicholls, H. and Klubicka, A. [2015] De-risking the Barents Sea. *GeoExpro*, 12 (1), 36–40.
- Veeken, P.C.H., Legeydo, P.J., Davidenko, Y.A., Kudryavceva E.O., Ivanov, S.A. and Chuvaev, A. [2009] Benefits of the induced polarization geoelectric method. *Geophysics*, 74 (2), 47–59.
- Sternberg, B.K. [1991] A review of some experience with the induced-polarization/resistivity method for hydrocarbon surveys: Successes and limitations. *Geophysics*, 56 (10), 1522–1532.