

RESEARCH ARTICLE

Hydrogeological investigation in the Kalahari basin within the framework of the PLANAGEO Project

Investigación hidrogeológica en la cuenca do Kalahari en el contexto del proyecto PLANAGEO

 Elsa Cristina Ramalho¹,  Alain Pascal Francés¹,  Raquel Martín-Banda²,  José María Llorente²,
 Teodora Mateus^{3,4},  Fernando Monteiro Santos⁵,  Iván Cuervo⁶,  José Luis García-Lobón²,
 Valter Dala⁷,  Manuel Ditutala⁷,  Abreu Famorosa⁷,  Américo da Mata Lourenço Victorino^{7,8}

¹ Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), Estrada da Portela, Bairro do Zambujal, Apartado 7586, Alfragide, 2610-999 Amadora, Portugal

² Instituto Geológico y Minero de España, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IGME-CSIC), C/ La Calera, 1, 28760 Tres Cantos – Madrid, España

³ União Temporária de Empresas (UTE), Instituto Superior Politécnico da Huila (ISPH) da Universidade Mandume Ya Ndemufayo (UMN), Governo da Província do Cunene, Angola.

⁴ Cuvelai Watercourse Commision (CUVECOM), Bairro Caculuvale, Ondjiva, Cunene, Angola.

⁵ Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa – Instituto D. Luiz, Campo Grande C8, Lisboa, 1749-016 Portugal.

⁶ Impulso Industrial Alternativo, SA (IIA), Angola, Rua Ndunduma 85, Miramar, Luanda, Angola.

⁷ Instituto Geológico de Angola (IGEO), Rua 311, Centralidade do Kilamba, Belas, Luanda, Angola.

⁸ Faculdade de Ciências Naturais da Universidade Agostinho Neto, Av. 4 de Fevereiro, 71, Luanda, Angola.

*Corresponding author: elsa.ramalho@lneg.pt (Elsa Cristina Ramalho)

Key points:

Hydrogeological surveys during the PLANAGEO project comprised the use of legacy data and previously acquired data during the Project.

Time-domain electromagnetics field surveys were conducted, and 5 deep boreholes were drilled and studied after the previous data review.

This information will be the basis for a future monitoring network for the deep aquifers of the Kalahari basin aquifer systems.

Keywords: Cunene; Hydrogeology; Geophysics; Boreholes; Geophysical logging

Puntos clave:

Los estudios hidrogeológicos realizados en PLANAGEO comprendieron el uso de datos heredados y adquiridos previamente durante el proyecto.

Estudios de electromagnetismo en el dominio del tiempo e 5 sondeos profundos fueron efectuados después de la revisión de los datos.

Esta información será la base para la futura red de monitoreo de los acuíferos profundos de los sistemas acuíferos de la cuenca del Kalahari.

Palabras clave: Cunene; Hidrogeología; Geofísica; Sondeos; Registros geofísicos de pozos

ABSTRACT

Within the scope of the PLANAGEO Project, conducted by UTE IGME-LNEG-IIA in southwestern Angola, groundwater studies were developed in the Kalahari basin, province of Cunene. These studies, mostly carried out in the last years of the project, comprised an extensive review and reprocessing of all the heritage pre-independence geophysical and borehole data and benefited from the knowledge that was already acquired through the project, namely regarding geology and aerogeophysics. After the 3D modelling of heritage geoelectrical data from 1966-67, another geophysical field survey comprising time-domain electromagnetics was carried out and 5 deep boreholes in selected basin sites were drilled, geophysical logs were carried out and pumping tests and groundwater analysis of major, minor and trace elements were conducted. Results confirmed the estimated depths of the deepest aquifers and their high salinity groundwater in large basin areas. The resulting information from the boreholes has proven to be consistent with the geophysical surveys and research works carried out in Namibia and will therefore be the basis for a future monitoring network of the deep aquifers of the aquifer systems of the Cunene province.

Article History:

Received: 14/03/2024

Accepted: 05/03/2025

Published: 10/04/2026

RESUMEN

En el marco del proyecto PLANAGEO, desarrollado por la UTE IGME-LNEG-IIA en la zona suroeste de Angola, se llevaron a cabo estudios sobre las aguas subterráneas en la cuenca del Kalahari en la provincia de Cunene, Angola. Estos estudios, realizados en su mayoría en los últimos años del proyecto, incluyeron una amplia revisión y reprocesamiento de todos los datos geofísicos y de sondeos anteriores a la independencia y se beneficiaron de los conocimientos ya adquiridos a través del proyecto, en particular en lo que respecta a la geología y la aerogeofísica. Después de la modelización 3D de los datos geoelectrónicos patrimoniales de 1966-67, se realizó un levantamiento geofísico con el método electromagnético en el dominio del tiempo, y se perforaron 5 sondeos profundos en lugares estratégicos. En los sondeos se realizaron registros geofísicos, pruebas de flujo y análisis químicos de los elementos mayores, menores y trazas. Los resultados confirmaron las profundidades estimadas de los acuíferos más profundos y sus aguas subterráneas de alta salinidad en grandes áreas de la cuenca. La información resultante en los sondeos ha demostrado ser coherente con los estudios geofísicos y los trabajos de investigación realizados en Namibia y, por lo tanto, será la base de una futura red de monitoreo piezométrico de los acuíferos profundos de los sistemas acuíferos de la provincia de Cunene.

Historial del artículo:

Received: 14/03/2024

Accepted: 05/03/2025

Published: 10/04/2026

Citation / Cómo citar este artículo: Ramalho, E.C., Francés, A.P., Martín-Banda, R., Llorente, J.M., Mateus, T., Monteiro Santos, F., Cuervo, I., García-Lobón, J.L., Dala, V., Ditutala, M., Famosa, A., Victorino, A.M.L. (2025). Hydrogeological investigation in the Kalahari basin within the framework of the PLANAGEO Project. *Boletín Geológico y Minero*, 136(2), 007. <http://dx.doi.org/10.21701/bolgeomin/136.2/007>

1. Introducción

En el marco del Plan Nacional de Geología de Angola (PLANAGEO), desarrollado por el consorcio UTE PLANAGEO (compuesto por el Instituto Geológico y Minero de España, IGME, el Laboratório Nacional de Energia e Geologia de Portugal, LNEG, y la empresa Impulso Industrial Alternativo, IIA) en la zona suroeste de Angola, se realizó un estudio de las aguas subterráneas en el sur del país, concretamente en la provincia de Cunene, en un área aproximada de 60000 km², incluida en el bloque UTE-6 del mismo proyecto. La población de esta provincia sufre graves problemas humanitarios debido a las sequías recurrentes y plurianuales. Al vivir principalmente de la ganadería y practicar una agricultura estrictamente de subsistencia, el agua es absolutamente esencial para su supervivencia, sobre todo para el consumo humano y del ganado. Por lo tanto, es necesario buscar posibles fuentes alternativas de abastecimiento de agua para las poblaciones rurales situadas en regiones de difícil acceso. Aunque el estudio hidrogeológico sistemático de esta zona comenzó en los años sesenta, se vio interrumpido por décadas de guerra colonial y civil. Este trabajo se llevó a cabo durante la fase final de PLANAGEO (García-Lobón *et al.*, 2025) y se basó en gran medida en: (i) datos anteriores a la independencia recuperados en el ámbito del proyecto; (ii) información geológica, aerogeofísica y geofísica del terreno (ruido sísmico) adquirida durante el proyecto, pero antes de este estudio; y (iii) trabajos anteriores realizados en el norte de Namibia por el equipo del *Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe* (BGR) (Servicio Geológico de Alemania) y el Servicio Geológico de Namibia. En conjunto, estos trabajos ya apuntaban a la extensión hacia Angola de los sistemas acuíferos multicapa Kalahari-Oshana (KOS) y Kalahari-Ohangwena (KOH) definidos en el norte de Namibia (Margane *et al.*, 2005; Schildknecht, 2012). El objetivo del proyecto era reanudar la sistematización de la investigación hidrogeológica en esta zona, recopilando y reprocesando datos hidrogeológicos y geofísicos anteriores a la independencia y adquiriendo y procesando nuevos datos geofísicos y datos litológicos, litoestratigráficos, hidrogeológicos e hidroquímicos de sondeos mecánicos de investigación hidrogeológica para contribuir a un mejor conocimiento de estos sistemas acuíferos de la zona de Angola, nombradamente la geometría y estructura de la cuenca sedimentar y la continuidad de los acuíferos estudiados en la Namibia en el Sur de Angola.

2. Contexto geológico e hidrogeológico

El área de estudio se localiza en la cuenca transfronteriza Cuvelai-Etosha, al SO de Angola y NO de Namibia, limitada al norte y al oeste por las rocas precámbricas de la Meseta Central Angoleña, al sur por el Cinturón del Damara y al este por el río Cubango (Fig. 1). Mientras que en Angola aflora toda la secuencia de depósitos intracratónicos cenozoicos, facilitando el análisis y la definición de las unidades litoestratigráficas, en Namibia sólo aflora la parte superior de la secuencia, conociéndose el resto mediante el análisis de testigos de sondeos profundos. Forma parte de la cuenca de Owambo, cuya geología e hidrogeología se resume en Francés *et al.* (2024), basado en los trabajos de Gärtner *et al.* (2023), Houben *et al.* (2020), Lindenmaier *et al.* (2014), Miller *et al.* (2010), Miller (1992) en Namibia y en Angola en los trabajos anteriores a la independencia de Carvalho (1973, 1982) y Pacheco (1976), complementados recientemente en el marco del proyecto PLANAGEO por Escuder-Virueite & Gumiel (2018), Faria *et al.* (2021), Gumiel *et al.* (2018), Gumiel & Goicoechea (2020), Labaredas & Oliveira (2021a, b, c), Martín-Banda *et al.* (2020), Oliveira & Sousa (2021), Sousa *et al.* (2021a, b). En resumen, la cuenca de Owambo se formó durante el *rifting* del Proterozoico Tardío relacionado con la fragmentación del supercontinente Rodinia. Sobre los sedimentos de la Secuencia Damara y del Supergrupo Karoo se depositaron sedimentos siliciclásticos de aproximadamente 600 metros de espesor del Grupo Kalahari, desde el Cretácico Superior hasta el Plioceno. Estos sedimentos corresponden al transporte norte-sur del material procedente de la alteración meteórica de las rocas precámbricas de

la Meseta Central de Angola, y a su depósito mediante los mega-abanicos aluviales de los paleoríos Cunene y Cubango. El Subgrupo Kalahari Inferior (Eoceno-Oligoceno) es la unidad basal depositada sobre la superficie africana, es decir, la superficie de peneplanización regional del Cenozoico temprano (Labaredas & Oliveira, 2021a). Está compuesta por areniscas silicificadas y con desarrollo de calcretas, conglomerados, calizas y arcillas rojas, y es bien conocida en Angola bajo el nombre de Formación “Grés Polimorfo”, mientras que en Namibia su equivalente es la Formación Olukonda. La parte superior de esta unidad se caracteriza por el desarrollo de un nivel endurecido compuesto por una ferricreta y conglomerados férricos, sobre el que se deposita el Subgrupo Superior del Kalahari (Mioceno-Plioceno), formado por unos 100 metros de arenas no consolidadas, conocidas en Angola con el nombre de Formación “Areias Ocre”. Mientras que el Subgrupo del Kalahari Inferior aflora escasamente en el norte de la provincia de Cunene, a lo largo de los valles de los principales cursos de agua, el Subgrupo del Kalahari Superior aparece en áreas más extensas (Fig. 1). Superpuestos a los dos subgrupos se encuentran estratos progradantes de arena y arcilla, con presencia de capas endurecidas y nódulos carbonatados, procedentes de los paleosistemas fluviodeltaicos del Cubango, Cunene y Cuvelai. Estos paleosistemas forman los depósitos del subgrupo Cuanhama-Etosha (Plioceno-Pleistoceno), que ocupan la mayor parte del área de la provincia de Cunene (Fig. 1). En Namibia, los subgrupos Kalahari Superior y Cuanhama-Etosha se corresponden con la Formación Andoni. Hace unos 4 millones de años, un acontecimiento extremadamente árido provocó la desaparición del lago Etosha y desde finales del Pleistoceno hasta el Holoceno, el sistema fluvial fue sustituido por un sistema eólico, dando lugar a los depósitos de paleodunas de la Formación N’Guanguela que recubren parcialmente el Grupo Kalahari. Estos depósitos corresponden a arenas eólicas finas a medias, no consolidadas, de color beige y a veces rojas.

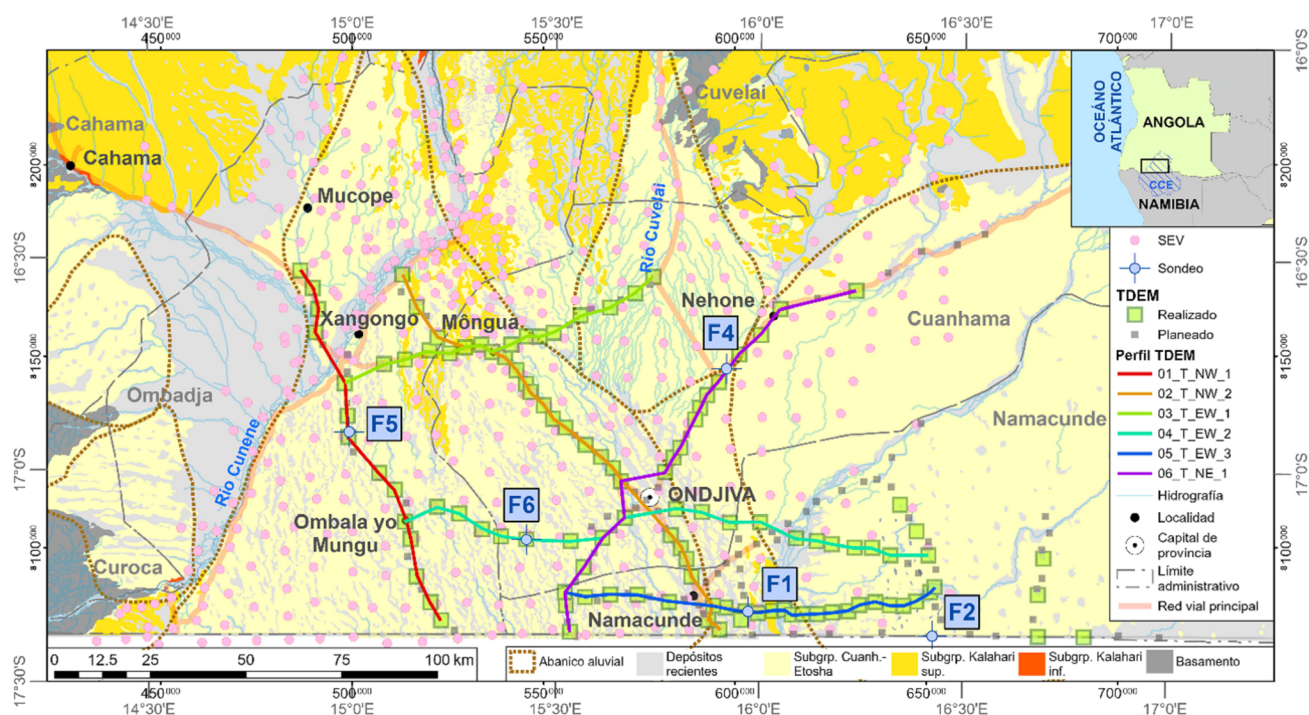


Figura 1. Geología de la región de Cunene (UTE-6-PLANAGEO) y localización de los sondeos geofísicos en la región de Cunene (SEVs: véase Ramalho *et al.*, 2023a; TDEM: Francés *et al.*, 2024; sondeos: véase Ramalho *et al.*, 2023b). CCE: Cuenca de Cuvelai-Etosha. Coordenadas geográficas: Camacupa. Coordenadas proyectadas: Camacupa zona UTM 33S.

Figure 1. Geology of the Cunene region (UTE-6-PLANAGEO) and location of geophysical soundings in the Cunene region (VESS: see Ramalho *et al.*, 2023a; TDEM: Francés *et al.*, 2024; boreholes: see Ramalho *et al.*, 2023b). CCE: Cuvelai-Etosha Basin. Geographical coordinates: Camacupa. Projected coordinates: Camacupa UTM zone 33S.

Por último, hace aproximadamente 1 millón de años, un clima más húmedo condujo al establecimiento de la red hidrográfica actual, provocando el desvío del río Cubango hacia el delta del Okavango, al sureste, y la profundización del valle del río Cunene. Desde principios de la década de 2000, equipos del BGR y del Servicio Geológico de Namibia han investigado intensamente el norte de Namibia para prospeccionar y cartografiar los sistemas acuíferos regionales (Bittner Water Consult, 2006; Lindenmaier & Christelis, 2011; Lindenmaier *et al.*, 2012; Margane *et al.*, 2005; Schildknecht, 2012; Baumle *et al.*, 2024). Estos estudios señalaron el potencial acuífero de las formaciones Olukonda y Andoni (Houben *et al.*, 2020; Lindenmaier *et al.*, 2014; Margane *et al.*, 2005; Schildknecht, 2012), reconociendo dos sistemas acuíferos: i) el Kalahari-Ohangwena (KOH, alojado en los depósitos de Megafan Cubango); y ii) el Kalahari-Oshana (KOS, alojado en los depósitos del río Cunene). Dada la continuidad geológica entre ambos países, es de esperar la extensión de estos sistemas acuíferos multicapa a Angola. La escasa o nula información disponible sobre el sistema KOS contrasta con el amplio estudio del KOH en el lado namibio durante las últimas décadas. Éste consta de 3 acuíferos principales, separados entre sí por acuitardos arcillosos con espesores que alcanzan decenas de metros (Fig. 2):

- KOS-0 y KOH-0: son acuíferos superficiales, discontinuos, de flujo libre, compuestos por arenas de grano fino a medio de las paleodunas de la Formación N'Guanguela y del topo del Subgrupo Cuanhama-Etosha. La profundidad máxima es hasta 60 metros. Se recargan con el agua de lluvia, pero también se agotan fácilmente en extensiones considerables durante la estación seca. Por ello, a pesar de su fácil acceso a través de pozos poco profundos, no constituyen una fuente de abastecimiento permanente en gran parte de la provincia. Los acuíferos superficiales KOS-0 y KOH-0 están sellados en su base por un acuitardo (Acuitardo 1) compuesto por arenas limosas de grano fino con contenido variable de arcilla, que los separa de un acuífero intermedio y los confina en la mayor parte de su longitud, siendo físicamente resistente a la perforación, quizás debido a la existencia de esmectita, principalmente montmorillonita (Gomes, 1972), que crea una matriz pegajosa (Lindenmaier *et al.*, 2014).
- KOH-1: el acuífero intermedio confinado o semiconfinado KOH-1, del sistema acuífero KOH, se sitúa a profundidades comprendidas entre 120 y 170 m, en la unidad del Subgrupo Cuanhama-Etosha. Está formado por capas de arenas, arenas arcillosas, calcretas y arcillas de gran heterogeneidad y contiene aguas salobres que no pueden considerarse potables y necesitan ser desalinizadas. Su tamaño puede ser local o regional y su conductividad hidráulica varía de 10^{-9} - 10^{-6} m/d (Lindenmayer *et al.*, 2014) y está marcada por la presencia de un nivel de clinoptilolita (Gomes, 1972; Houben *et al.*, 2020).
- KOH-2, el acuífero profundo, regional y confinado KOH-2 se encuentra por debajo de los 200 m de profundidad, marcado por niveles de sepiolita/paligorskita (Gomes, 1972; Houben *et al.*, 2020) y compuesto por arenas finas a medias de color rojo o gris, con granos bien redondeados con o sin arcilla. Se encuentra en la interface del Subgrupo del Kalahari inferior con el Subgrupo Cuanhama-Etosha e/o Kalahari superior (Gomes, 1972). La recarga se procesa en la meseta angoleña, y el agua tiene generalmente buena calidad química. Todavía, es un recurso con una tasa de renovación muy baja (Himmelsbach *et al.*, 2018) y requiere la construcción de pozos de considerable complejidad técnica.

Los acuíferos intermedio y profundo están separados por el Acuitardo 2, caracterizado por un alto contenido en arcilla y una conductividad hidráulica muy baja. Lindenmaier *et al.* (2014) consideran que la cuenca alcanza una profundidad de más de 400 metros en su depocentro, identificado a partir de una veintena de sondeos situados en el lado namibio del acuífero. Esta zona más profunda abarca el área más cercana a la frontera y en dirección al norte. Sin embargo, cerca de las mesetas de Angola, el basamento se alcanza a profundidades mucho menores, donde, además de en el río Cubango, se produce la recarga (Wallner *et al.*, 2017). En la zona depocéntrica central de la cuenca hay un mayor porcentaje de materiales finos y limos, correspondientes a depósitos detríticos del Paleocunene (Martín-Banda *et al.*, 2025, este volumen).

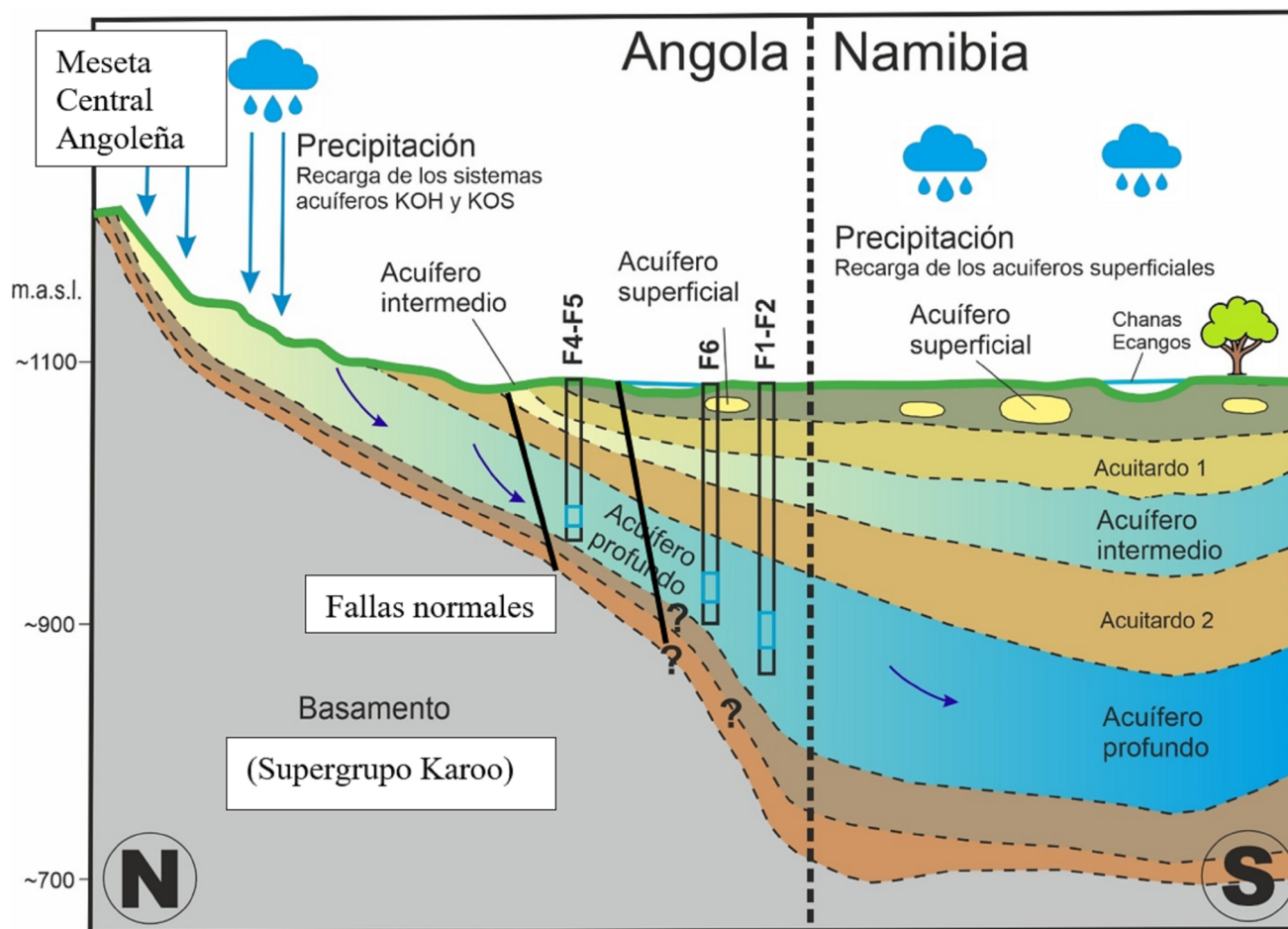


Figura 2. Modelo conceptual esquemático de los Sistemas Acuíferos Kalahari-Ohangwena (KOH) y Kalahari-Oshana (KOS) modificado de Wallner *et al.* (2017) en base a los resultados obtenidos durante el trabajo de UTE-PLANAGEO en el BLOQUE UTE-6. Los sondeos perforados durante el proyecto (F1, F2, F4, F5 y F6) (Ramalho *et al.*, 2023b), están marcados en el diagrama. Cabe señalar que la profundidad alcanzada por los sondeos difiere significativamente con su latitud y su ubicación en la cuenca. Sin embargo, el objetivo era idéntico, es decir, los acuíferos profundos de KOH o de KOS y la figura muestra esquemáticamente la ubicación de los riesgos colocados para los captar.

Figure 2. Schematic conceptual model of the Kalahari-Ohangwena (KOH) and Kalahari-Oshana (KOS) Aquifer Systems modified from Wallner *et al.* (2017) based on the results obtained during the work of UTE-PLANAGEO in the UTE-6 BLOCK. The boreholes drilled during the project (F1, F2, F4, F5 and F6) (Ramalho *et al.*, 2023b), are depicted. It should be noted that the depth reached by the boreholes differs significantly depending on their latitude and location in the basin. However, the target was identical, i.e., the deep aquifers of KOH or KOS and the figure shows schematically the location of the wells' screens to capture their water.

3. Adquisición y procesamiento de los datos

Las investigaciones hidrogeológicas llevadas a cabo en la provincia de Cunene siguieron una secuencia lógica y acumulativa, tanto en la obtención de la información como en su interpretación. Así, con la información del período anterior a 1975, se hay procedido a:

1. reinterpretación de datos de las décadas de 1960/70 de 482 sondeos eléctricos verticales – SEVs adquiridos por Nascimento & Moura Esteves (1966), Nascimento *et al.* (1967) y reprocesados por Ramalho *et al.* (2023a);
2. estudio de más de 30 sondeos mecánicos con profundidades que varían entre unos 20 m y 300 m (Gomes, 1972);
3. añadido de información adicional procedente de los trabajos geológicos llevados a cabo en el área de UTE-6 mencionados en la sección anterior;
4. interpretación de los datos de la campaña aerogeofísica Mag-Rad (Feria *et al.*, 2021).

Estos trabajos se complementarán en el marco del proyecto PLANAGEO con:

1. realización de una campaña de geofísica terrestre de prospección electromagnética en el dominio del tiempo (TDEM) (Francés et al., 2024);
2. perforación de 5 sondeos profundos (Ramalho et al., 2023b);
3. interpretación de informes de sondeos profundos perforados por empresas privadas de la región durante la última década;
4. trabajos de sismica pasiva (Carvalho et al., 2024),

que han permitido obtener información adicional sobre la profundidad del basamento y su correlación con los datos de TDEM adquiridos entretanto (Francés et al., 2024) y sobre los acuíferos que conforman los sistemas acuíferos multicapa KOS y KOH.

3.1. SEV

Inicialmente, se llevó a cabo la inversión 1D de todos los SEVs del tiempo pre-independencia utilizando el software IP2Win (Bobachev et al., 2000). Para la calibración se utilizó la interpretación de los registros de sondeos de Gomes (1972), lo que permitió obtener datos de resistividad eléctrica profunda de buena calidad, que a su vez alcanzaron profundidades de investigación de unos 300 metros. Tras este trabajo, se llevó a cabo una modelización cuasi-3D de los 482 SEV, que se describe en detalle en Ramalho et al. (2023a). En esta modelización se invirtieron todos los SEVs juntos, como un sistema, considerando los vecinos más próximos (centro geométrico de los SEVs), y no se utilizó malla para realizar la inversión debido a la distribución irregular de los puntos de medida, utilizando el método descrito en Monteiro Santos (2004); la DOI fue de 300 m. Los resultados obtenidos se correlacionaron y validaron de manera preliminar con los resultados de TDEM obtenidos en Namibia por el BGR, sondeos profundos del período anterior a la independencia que fueron objeto de estudios detallados, y sondeos perforados recientemente en Cunene por empresas privadas (Ramalho et al., 2023a). Debido a la falta de información sobre la época del año en la que se hay realizado cada SEV, solo se pudieron establecer consideraciones sobre los acuíferos intermedios y profundos.

3.2. TDEM

Con el fin de sentar las bases para futuros trabajos sistemáticos, fue necesario validar en las condiciones actuales la modelización 1D y 3D de los SEVs realizadas en los años 1960 (Ramalho et al., 2023a). Para ello, y con el objetivo de ayudar a definir la geometría de la cuenca sedimentaria de Cunene y, por tanto, el acuífero intermedio salino y el acuífero profundo, con agua menos mineralizada en KOH, se realizó una campaña de TDEM. Se eligió este método porque:

1. es sensible a conductividades eléctricas elevadas;
2. no hay campos electromagnéticos antropogénicos (ruido) en la zona;
3. alcanza profundidades del orden de magnitud de los niveles del acuífero KOS/KOH (hasta unos 400 metros);
4. es relativamente fácil de instalar en el terreno;
5. y por último, su tiempo de adquisición de datos es corto.

La adquisición de datos se realizó con un equipo ABEM WalkTEM 2 con un *loop* lateral de 200 m (Francés et al., 2024). Los *loops* TDEM se realizaron dentro de los “quimbos”, para minimizar el riesgo de minas antipersona o antitanque, marcados en fotografías de satélite (servicios Google, ESRI, Bing). Fueran espaciados entre 2 y 4 km, a lo largo de los 6 perfiles elegidos para cruzar la cuenca perpendicular y transversalmente (Fig. 1). Sin embargo, debido a los riesgos reales presentes, cada *loop* fue desminado de antemano. En total, se completaron 112 de los 197 *loops* planeados (Fig. 1). Los trabajos se llevaron a cabo al inicio de la estación seca de 2021. La inversión 1D de todos los

datos adquiridos se realizó mediante el programa de inversión SPIA (Aarhus Geosoftware) y la inversión cuasi-2D de los 6 perfiles (Fig. 1) se realizó según el método descrito por Monteiro Santos (2004).

3.3. Sondeos mecánicos

Los resultados obtenidos con el TDEM se utilizaron igualmente para localizar cinco sondeos profundos de prospección hidrogeológica (Ramalho *et al.*, 2023b), que cumplieran simultáneamente los siguientes criterios:

1. Con el fin de obtener alguna representatividad geográfica, con una localización dispersa por toda la cuenca, teniendo en cuenta que en Cunene no se han realizado investigaciones hidrogeológicas de campo desde hace más de 50 años y que prácticamente no existen datos sobre la recarga de los acuíferos profundos KOH-2 y KOS-2 y su calidad química en la región de Cunene;
2. permitir la validación del modelo quasi-3D de los SEV 3D y de los modelos 1 D y 2D de TDEM;
3. recogida de agua en los acuíferos profundos KOH-2 y KOS-2;
4. estudio simultáneo de la posible presencia de acuíferos superficiales e intermedios por medio de registros geofísicos de pozos;
5. y posibilidad de convertir los sondeos en piezómetros para el estudio de KOH-2 y posiblemente KOS-2 si se llegara a ellos.

La columna de entubación se determinó mediante la interpretación conjunta de registros geofísicos eléctricos (Resistencia de Monoelectrónica – SPR, Resistividad Normal 16” y 64” y Potencial Espontáneo – SP), nucleares (radiación gamma natural) y de la columna de fluido (temperatura y conductividad del fluido) realizados con un equipo Robertson Geologging (Francés *et al.*, 2024), y se midió la velocidad de avance del sondeo. Cada uno de estos registros geofísicos de pozos proporciona información que, en conjunto, constituye una importante fuente de información, tanto hidrogeológica como litoestratigráfica (Ramalho *et al.*, 2009):

- **Potencial Espontáneo (SP) (mV)** ➔ indicador de la mineralización del agua nativa; estos valores dependen de las condiciones de adquisición de datos y están influidos por campos eléctricos externos, como la presencia de generadores cercanos.
- **Resistencia Monoelectrónica (SPR) (ohm)** ➔ indicador de la presencia de zonas posiblemente arcillosas y/o de aguas muy mineralizadas y de zonas arenosas con aguas más o menos mineralizadas.
- **Resistividad Normal 16” e 64” (ohm.m)** ➔ indicador de la presencia de zonas posiblemente arcillosas y/o de agua muy mineralizada y de zonas arenosas con agua más o menos mineralizada, utilizado en las estimaciones preliminares de la calidad química del agua nativa mediante la Ley de Archie (Archie, 1942; Winsauer *et al.*, 1952).
- **Radiación Gamma Natural (API)** ➔ indicador de la presencia de arcillas y arenas con un débil componente arcilloso. La presencia de sepiolita y paligorskita como marcadores de acuíferos profundos (Gomes, 1972) revela una disminución de los valores de radiación gamma natural que, sin embargo, no se corresponde con la ausencia de arcillas. Por este motivo, la aplicación directa de la Ley de Archie provoca distorsiones y se necesitan otros métodos alternativos que eliminen el efecto de la arcilla.
- **Temperatura del Fluido (°C)** ➔ correcciones de la resistividad de los fluidos en el caso de sondeos profundos; estimación posterior del gradiente geotérmico.
- **Conductividad del Fluido (mS/cm)** ➔ indicador de conductividad del lodo, importante para calcular la conductividad eléctrica del agua nativa mediante la Ley de Archie.
- **Velocidad de avance de la perforación (min/m)** ➔ indicador de la dureza y consolidación de las formaciones, información facilitada por la empresa de perforación contratada.

4. Resultados y discusión

4.1. SEV

La interpretación del modelo cuasi-3D de los SEV (Fig. 3) se basó en la variación de las propiedades y contrastes eléctricos debidos a la presencia de arcillas, arenas con agua más o menos mineralizada y basamento de la cuenca. La información procedente de la modelización 1D y 3D, a pesar de alcanzar profundidades de investigación inferiores a las alcanzadas por la prospección magnética (Feria et al., 2021) y la sísmica pasiva (Carvalho et al., 2024), permitió proporcionar una primera interpretación del medio hidrogeológico a profundidades susceptibles de ser alcanzadas por las captaciones de agua, en particular en lo que se refiere a la resistividad de las formaciones, la conductividad del agua subterránea y su porosidad.

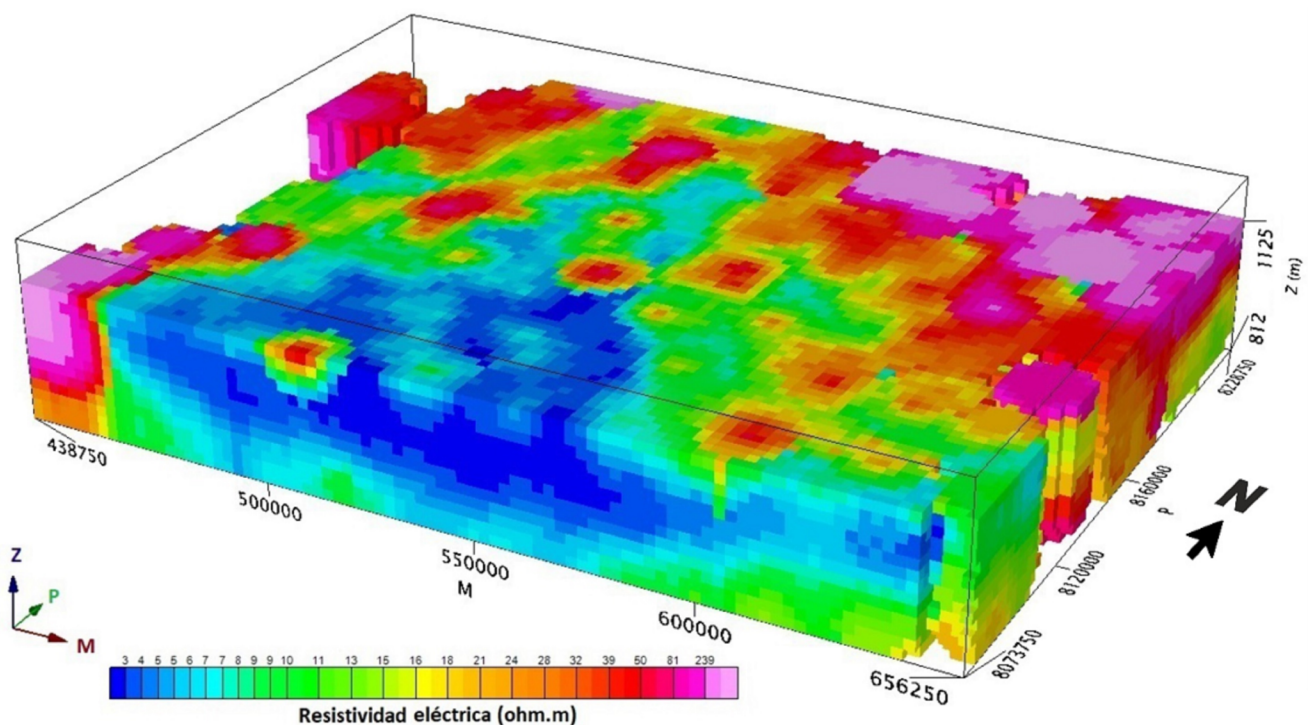


Figura 3. Modelo de resistividad eléctrica cuasi-3D realizado a partir de la inversión de los 482 SEVs realizados en 1966/67 en la región de Cunene. Coordenadas UTM, WGS84. El corte vertical O-E de la imagen corresponde a la frontera con Namibia. Las resistividades muy bajas, en azul oscuro, corresponden a zonas arcillosas y/o arenosas que contienen agua altamente mineralizada proveniente de los acuíferos intermedios KOS y KOH (Ramalho et al., 2023a).

Figure 3. Quasi-3D electrical resistivity model created from the inversion of the 482 VESs carried out in 1966/67 in the Cunene region. UTM coordinates, WGS84. The vertical W-E limit in the image corresponds to the border with Namibia. Very low resistivities, in dark blue, correspond to clayey and/or sandy areas containing highly mineralized groundwater from the intermediate aquifers KOS and KOH (Ramalho et al., 2023a).

Varias secciones E-O y N-S de la cuenca se exploran en Ramalho et al. (2023a), así como se correlacionan con: (i) datos y sondeos de épocas anteriores a la independencia, en 1975, (ii) datos TDEM obtenidos por Lindenmaier et al. (2014) y Schildknecht (2012) e (iii) información obtenida de sondeos profundos perforados más recientemente en la región de Cunene. La discusión de estos resultados y su correlación con la geología y la hidrogeología se trataron en Ramalho et al. (2023a) y Francés et al. (2024) y se confirmó su coherencia. En ambos estudios se adaptaron los valores de resistividad eléctrica de Lindenmaier et al. (2014) para los dominios hidrogeológicos que abarcan la zona de estudio, como se muestra en la Tabla 1.

Dominios hidrogeológicos	Límites de resistividad eléctrica (ohm.m)	
	Schildknecht (2012) Lindenmaier <i>et al.</i> (2014)	Ramalho <i>et al.</i> (2023a) Francés <i>et al.</i> (2024)
Arenas que contienen agua salada o arcillas	0-3	0-5
Arenas que contienen agua salobre	3-20	5-20
Arenas que contienen agua dulce	> 20	20-100
Basamento	No definido	> 100

Tabla 1. Límites de resistividades eléctricas de los distintos dominios hidrogeológicos considerados en la cuenca del Kalahari (Ramalho *et al.*, 2023a; Francés *et al.*, 2024).

Table 1. Electrical resistivity ranges of the different hydrogeological domains considered in the Kalahari basin (Ramalho *et al.*, 2023a; Francés *et al.*, 2024).

En las zonas N y O del área estudiada, las formaciones más resistivas forman los bordes de la cuenca (basamento) y se extienden en profundidad. En cambio, en la región próxima a la frontera con Namibia, el corte vertical transversal al eje de la cuenca (dirección O-E) alcanza valores de 3-4 ohm.m hasta profundidades próximas a los 300 metros. Hacia el O y el E, se alcanzan valores de resistividad más elevados a profundidades cada vez menores cuanto más se alejan del centro de la cuenca. Esto significa que, en la parte central y sur de la cuenca, el acuífero KOH-2 profundo, con aguas de menor conductividad eléctrica y de menos salobres a dulces, se alcanzan a mayores profundidades que en los bordes (ver Fig. 2), lo que es compatible con la información obtenida en los sondeos perforados en los años 1960/70 (Gomes, 1972) y con la interpretación de los resultados obtenidos en Namibia por Lindenmaier *et al.* (2014) y Schildknecht (2012). Por otro lado, debido a la alta mineralización del agua en el acuífero intermedio, su identificación se hace difícil, si no imposible, con la resolución del modelo 3D basado en SEV, debido al bajo espesor de las capas acuíferas que lo componen.

4.2. TDEM

Los resultados de los 6 perfiles 2D invertidos son consistentes con los resultados del modelo tridimensional de los SEVs y muestran, de acuerdo con la Tabla 1, la alternancia de capas de resistividad baja a muy baja (< 50 ohm.m), sobre un basamento de resistividad más alta (100 ohm.m). En ellos destacan:

- la presencia de un sustrato de resistividades eléctricas mayores a 20 ohm.m, compatible con la existencia de un acuífero profundo y/o el basamento de la cuenca;
- una zona de resistividades eléctricas muy bajas, continuas en prácticamente toda la cuenca, que incorpora un acuífero intermedio y los niveles arcillosos (acuitardo) que lo separan del acuífero superficial libre y del acuífero profundo; y, por último,
- una capa de resistividades intermedias (5-20 ohm.m), que puede corresponder a una capa de arenas con agua de menor mineralización y/o con un componente arcilloso más o menos acentuado.

Los resultados de las prospecciones TDEM también se utilizaron para estimar las profundidades del basamento y del acuífero profundo en las zonas investigadas. La Figura 4 muestra la proyección del sondeo F4 sobre los modelos SEV 3D y TDEM 2D, y la coherencia de ambos es notable.

4.3. Sondeos mecánicos

El análisis de los registros geofísicos de pozos se realizó en conjunto antes de la intubación y después, y fue determinante para el entubamiento de los sondeos. La profundidad de los dos sondeos mecánicos varió entre 147 y 300 metros (Tabla 2), dependiendo de la ubicación del sondeo (Fig. 1)

y de la profundidad del nivel del acuífero profundo (Fig. 2). Los distintos parámetros analizados proporcionaron información diferente en la definición de las columnas de tuberías de los sondeos. Si el análisis de las resistividades normales y de la temperatura y conductividad del fluido fueran importantes para la interpretación de datos en el campo, el análisis de SP fue una prioridad secundaria. Por otro lado, el registro de SPR, junto con el registro de radiación gamma natural, se utilizó para analizar de forma inmediata y preliminar el tipo y las características de las formaciones atravesadas durante el proceso de adquisición de datos (ver Fig. 5). La presencia de sepiolita y paligorskita como marcadores de acuíferos profundos (Gomes, 1972) crea una disminución de los valores de radiación gamma natural que, sin embargo, no se corresponde con la ausencia de arcillas. Información sobre la velocidad de avance de la perforación adquirió especial importancia para la identificación del Aquitardo 2, cuya dureza, como ya se ha mencionado, es un marcador fácilmente identificable.

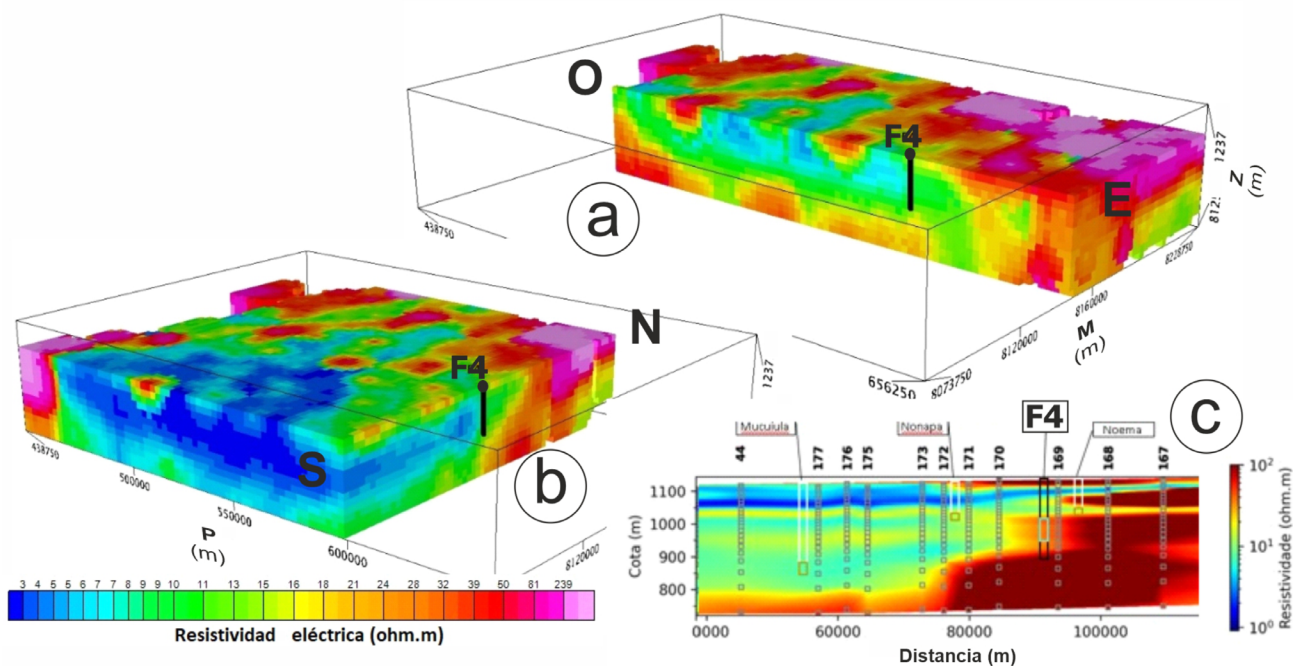


Figura 4. (a) Proyección del sondeo F4 sobre el corte vertical O-E del modelo SEV 3D; (b) proyección de F4 sobre el corte vertical N-S del modelo SEV 3D; (c) proyección sobre el correspondiente perfil TDEM del sondeo F4 (ubicación en Fig. 1). Obsérvese que la resistividad máxima nel sondeo, tanto en 4a como en 4b, es de tan solo 20 ohm.m, ocurriendo donde las formaciones acuíferas detectadas en los *cuttings* de los sondeos ven disminuida su conductividad eléctrica debido a la presencia de aguas muy salobres (véanse las tablas 1 y 2).

Figure 4. (a) Projection of the F4 borehole onto the vertical W-E section of the VES 3D model; (b) projection of F4 onto the N-S vertical section of the VES 3D model; (c) projection of the F4 borehole on the corresponding TDEM profile (see location in Fig. 1). Note that the maximum resistivity in the borehole, both in 4a and 4b, is only 20 ohm.m, occurring where the aquifer formations detected in the *cuttings* of the boreholes see their electrical conductivity decrease due to the presence of very brackish groundwater (see tables 1 and 2).

La Figura 5 muestra la composición de los registros de radiación gamma natural, SPR y velocidad de avance de la perforación del sondeo F4, así como las respectivas interpretaciones litológicas y litoestratigráficas.

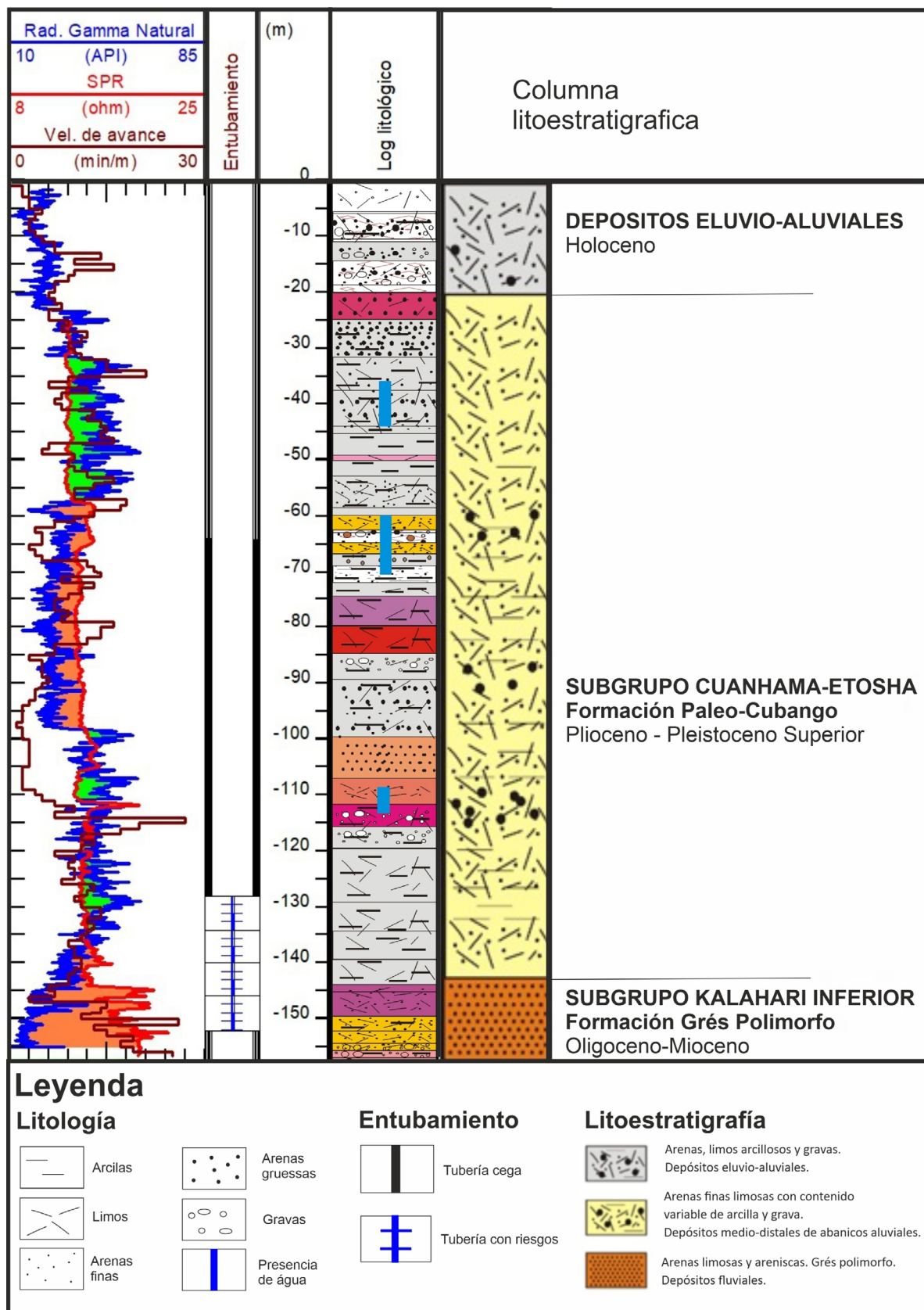


Figura 5. Registros de SPR, radiación gamma natural, y velocidad de avance de la perforación, entubamiento del sondeo, log litológico y columna litoestratigráfica del sondeo F4.

Figure 5. SPR records, natural gamma radiation and advancing drilling rate, borehole casing, lithological log and lithostratigraphic column of borehole F4.

Con la información adquirida a partir de los registros geofísicos de pozos y la medida de parámetros *in situ*, los sondeos mecánicos realizados en el marco del proyecto PLANAGEO presentaron las características de la Tabla 2.

Nombre	Localidad	Prof. (m)	Número de rejillas	Profundidad de las rejillas (m) [prof. min.-prof.máx.]	NP* (m)	Cond. del agua ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH	Tipo de agua**
F1	Namacunde	300	5	[240-288]	10.0	2370	8.84	Bicarbonatada sódica
F2	Marco Vinte e Oito	293	7	[223-281]	50.2	476	8.73	Clorurada sódica
F4	Nehone	147	4	[128-152]	24.0	11100	7.88	Clorurada sódica
F5	Xangongo	157	3	[128-152]	16.0	9640	7.76	Bicarbonatada clorurada sódica
F6	Ombala yo Mungo	258	5	[190-254]	10.7	2340	8.04	Bicarbonatada clorurada sódica

Tabla 2. Características generales de los sondeos mecánicos realizados en el marco del proyecto PLANAGEO.

Table 2. General characteristics of the boreholes drilled out within the framework of the PLANAGEO project.

La conductividad eléctrica del agua nativa también se estimó utilizando la Ley de Archie (Archie, 1942; Winsauer *et al.*, 1952). Esta ley se ha establecido experimentalmente para medios saturados y relaciona la resistividad eléctrica de una roca con la porosidad, la geometría de la distribución de los poros y la resistividad del electrolito que los llena. Según la Ley de Archie, la resistividad eléctrica de una roca aumenta con la disminución de la salinidad del fluido que contiene y cuando aumenta el tamaño de grano y, en consecuencia, la permeabilidad. Este incremento, sin embargo, no es tan notable como lo sería si las relaciones de Archie fueran estrictamente aplicables (Chappelier, 1992), ya que la aplicación de la Ley de Archie solo es válida para formaciones limpias, es *decir*, sin arcilla. Así, por la primera Ley de Archie, el cociente entre la resistividad eléctrica total de un nivel litológico permeable (R_t) y la resistividad eléctrica del agua de formación (R_w), es una constante adimensional que suele llamarse Factor de Formación, F , que se relaciona con la porosidad total (j), con el factor de cementación m (adimensional) y con un factor que depende de la litología, a , cuyos valores se pueden encontrar en tablas de la literatura (p.e., Shon, 1996). El uso conjunto de registros geofísicos de resistividad eléctrica normal con diferentes espaciamientos interelectrónicos permite establecer relaciones entre los diversos parámetros adquiridos, y es particularmente útil en la evaluación preliminar de la calidad química del agua contenida en los diversos acuíferos que contenidos en los acuíferos multicapa sedimentarios porosos (Ramalho *et al.*, 2009).

En este caso concreto, los resultados obtenidos de la aplicación directa de la Ley de Archie presentaron distorsiones debido a la presencia de arcillas no potásicas en los acuíferos principales (Gomes, 1972), no detectadas por el registro de radiación gamma natural, que provocaran distorsiones en las estimaciones de la conductividad eléctrica del agua nativa, siendo necesario otros métodos alternativos de análisis que eliminen el efecto de la arcilla. Sin embargo, la interpretación de los registros geofísicos eléctricos y de radiación gamma natural permitió distinguir las zonas arcillosas de las arenas que contienen agua altamente mineralizada del acuífero intermedio, así como identificar la profundidad a partir de la cual se ubican los acuíferos profundos, que ha resultado consistente con las estimadas a partir de Ramalho *et al.* (2023a) y Francés *et al.* (2024) a través de SEV y de TDEM, respectivamente. En cada sondeo se realizaron pruebas de flujo (escalonadas, cortas de 2h y largas de 24h) y análisis químicos de los elementos mayores, menores, trazas e isótopos.

F1 y F2 (ver ubicación en Fig. 1) son los únicos sondeos que no alcanzaron el basamento. Estos sondeos se localizan en la zona más potente de la cuenca sedimentaria, en su depocentro. De acuerdo con los resultados del TDEM, en ellos se esperaba encontrar la base del acuífero profundo. Sin embargo, se detectó la presencia de aguas menos mineralizadas en profundidad, correspondientes a KOH-2. Aquí, como en algunos pozos situados en Namibia cerca de la frontera angoleña, los registros geofísicos mostraron la interceptación de algunos acuíferos pequeños cuyas aguas de mineralización muy elevada, característica de aguas salobres, parecían tener características compatibles

con el acuífero intermedio. El acuífero profundo en la zona presenta una transmisividad muy baja y un agua esencialmente bicarbonatada sódica o clorurada sódica (Fig. 6), a veces con características salobres, con conductividades eléctricas entre cerca de 9000 e 11500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en los sondeos F4 y F5 (ver ubicación en Fig. 1). Además, se detectó una bolsa de agua dulce en el sector SE que abarcaba los sondeos F1, F2 y, de una forma menos marcada, F6, confirmando los trabajos de Lindenmaier *et al.* (2014) y Himmelsbach *et al.* (2018). Los sondeos F4 y F5 (ver esquema en Fig. 2) fueron perforados en la zona correspondiente al KOS (Schildknecht, 2012) con el mismo fin de alcanzar el acuífero más profundo y, aunque no pudieron continuar por la dureza de las formaciones del basamento rocoso más superficial, captaron agua muy salobre (Tabla 2). Sin embargo, a partir de los datos disponibles y de los transectos TDEM perpendiculares al eje de la cuenca, así como del análisis W-E del modelo 3D de los SEV, no se observa una transición clara de KOH a KOS, por lo que parece ser gradual, con un aumento de la mineralización total del agua extraída que alcanza, en la mayoría de los parámetros, valores que superan los máximos admisibles para el agua apta para el consumo humano según la legislación angoleña.

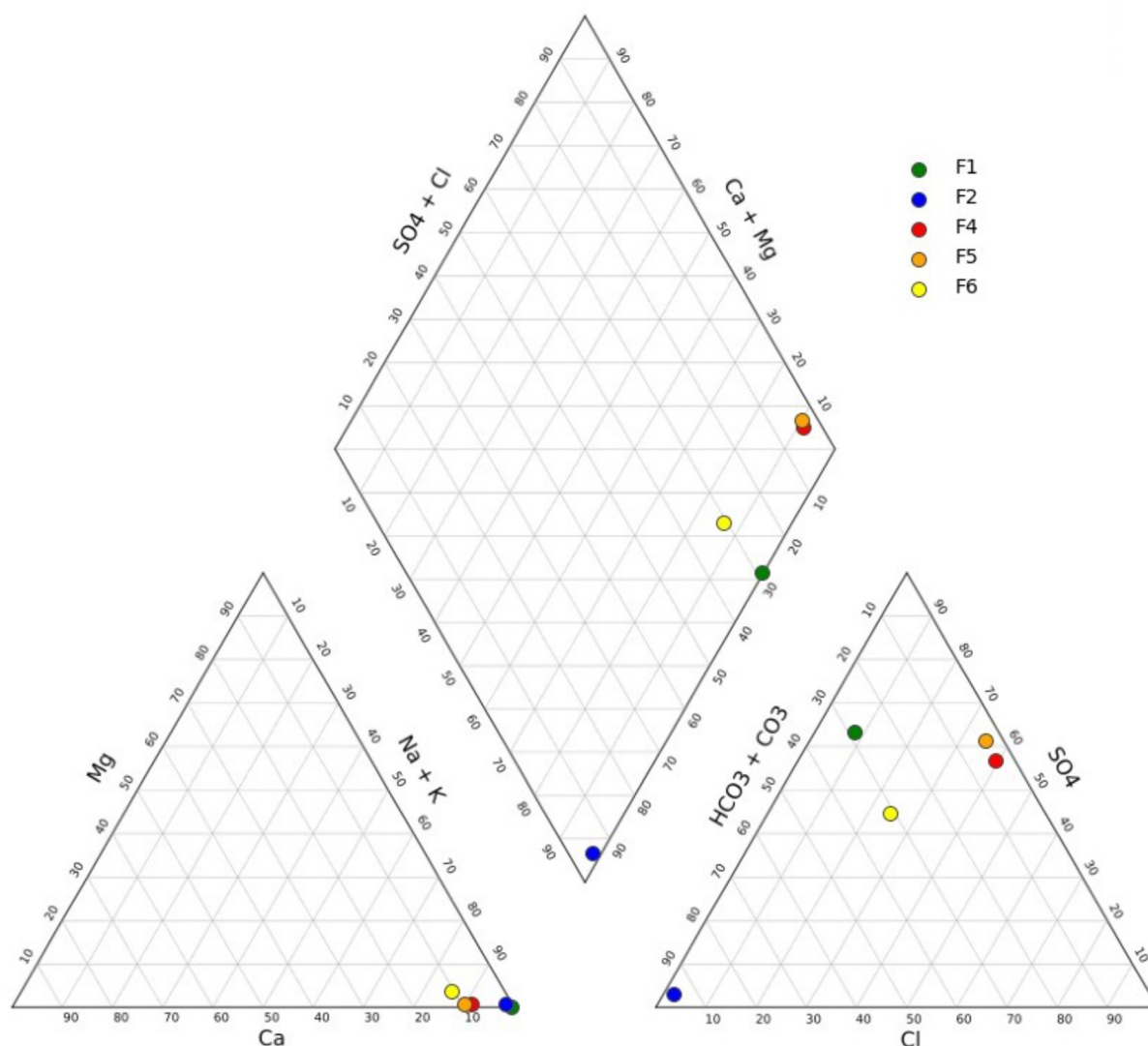


Figura 6. Diagrama de Piper del análisis de las aguas de los pozos perforados en Cunene en el marco del proyecto PLANAGEO.

Figure 6. Piper diagram of the analysis of the water from the wells drilled in Cunene within the framework of the PLANAGEO project.

La observación conjunta de las figuras 4 y 5 muestra la excelente correlación entre los registros geofísicos de pozos obtenidos en el sondeo F4 y su proyección sobre los cortes O-E y N-S del modelo SEV 3D y del modelo TDEM 2D. Francés *et al.* (2024) también demostraron la utilidad de realizar sondeos TDEM en las proximidades de los pocos sondeos profundos perforados en el Cunene, donde se realizarán registros de radiación gamma natural, de modo que se puedan relacionar la variación 1D de la resistividad eléctrica y la radiación gamma natural y contribuir así a mejorar el conocimiento de los sistemas acuíferos de la cuenca del Kalahari. Las pruebas de flujo revelaron, como era de esperar, transmisividades muy bajas, todas ellas inferiores a 4.5 m²/d, yendo hacia la conclusión de Baumle *et al.* (2024), que el KOH-2 debe considerarse un recurso no renovable en escalas de tiempo humanas.

5. Conclusiones

El grande lapso de tiempo transcurrido entre las últimas investigaciones hidrogeológicas anteriores a la independencia (1975) realizadas en la cuenca del Kalahari y los trabajos de PLANAGEO provocó una enorme falta de datos sobre los acuíferos profundos y, por este motivo, la necesidad de realizar trabajos exploratorios partiendo de cero, a pesar de la abundancia de datos sobre la parte namibia de los mismos sistemas acuíferos. Por otra parte, el hecho de que la investigación hidrogeológica en la provincia de Cunene se llevara a cabo durante la fase final de PLANAGEO significaba que ya se había beneficiado de los estudios geológicos, aerogeofísicos y de ruido sísmico. Por un lado, el modelo 3D de los SEV realizados en el anterior a 1975 demostró ser una herramienta muy eficaz para predecir la profundidad del basamento de la cuenca, y la eventual profundidad máxima del acuitardo que separa los acuíferos intermedios de los acuíferos profundos. Por otro lado, la información que se pudo obtener de las prospecciones TDEM actuales, de los sondeos perforados y de toda la nueva información obtenida entretanto, así como las enseñanzas extraídas de este trabajo, son sin duda importantes para los futuros estudios de la cuenca, ya que, además, en el momento en que se realizó este trabajo aún no existía una prospección y un estudio sistemáticos y exhaustivos de los poquísimos sondeos profundos diseminados por la cuenca. A la vista de los resultados positivos obtenidos en la inversión 1D de las TDEM, se pone de manifiesto la importancia de la realización de TDEM a la hora de perforar sondeos más o menos profundos, ya que permite predecir el tipo de formaciones y acuíferos que se atravesarán y evaluar así la idoneidad de un proyecto de captación en un lugar determinado. También está previsto que estos pozos formen parte de una red de vigilancia de los sistemas acuíferos KOS y KOH, que se implantará y ampliará en un futuro próximo. Y dado que las circunstancias exigen obtener la máxima información de los sondeos realizados, actualmente se están llevando a cabo otros trabajos, concretamente en lo que se refiere a análisis detallada de los registros geofísicos de los pozos, a la caracterización química de las aguas y mineralógica por DRX y FRX de las muestras procedentes de los sondeos mecánicos.

Agradecimientos

Los autores agradecen a U. Mayer y R. Baumle, del Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), los análisis químicos de elementos mayores y menores llevados a cabo en las muestras de agua de los sondeos realizados en el marco del proyecto PLANAGEO. También nos gustaría agradecer a los revisores, cuyos comentarios han contribuido a mejorar la calidad de este trabajo.

Authorship contribution statement

Elsa Cristina Ramalho: Conceptualization, Writing - Original Draft, Visualization, Investigation, Supervision, Data acquisition, Writing - Review & Editing.

Alain Pascal Francés: Conceptualization, Writing - Original Draft, Visualization, Investigation, Supervision, Data acquisition, Writing - Review & Editing.

Raquel Martín Banda: Writing - Original Draft, Visualization, Investigation, Supervision, Data acquisition, Writing - Review & Editing.
José María Llorente: Supervision, Data acquisition.
Teodora Mateus: Investigation, Supervision, Local management, Data acquisition.
Fernando Monteiro Santos: Visualization, Investigation, Writing - Review & Editing.
Ivan Cuervo: Supervision, Logistic management, Project administration.
José Luis García Lobón: Investigation, Supervision, Project administration, Writing - Review & Editing.
Valter Dala: Data acquisition.
Manuel Ditutala: Data acquisition.
Abreu Famosa: Data acquisition.
Américo da Mata Victorino: Supervision, Project administration, Funding acquisition, Writing - Review & Editing.

Referencias

- Archie, G.E. (1942). The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Transactions AIME*, 146, 54-62.
- Baumle, R., Purtschert, R., Mueller, P., Krekeler, T., Zappala, J.C., Matsumoto, T., Groger-Trampe, J., Koeniger, P., Vockenhuber, C., Romeo, N., & Mabry, J. (2024). New insights into the flow dynamics of a deep freshwater aquifer in the semi-arid and saline Cuvelai-Etosha Basin, Northern Namibia: Results of a multi-environmental tracer study. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 52, 101721, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101721>.
- Bittner Water Consult (2006). *Desk Study Report, Cuvelai-Etosha Groundwater Investigation*. Technical report, Technical Cooperation Project BGR / DWAF.
- Bobachev A. A., Modin I. N., & Shevnev V. A. (2000). *IPI2Win User's Guide*. Moscow State University, Geological Faculty, Dept. of Geophysics, Geoscan-M Ltd, Moscow, Russia.
- Carvalho, H. (Coordinator) (1982). *Carta Geológica de Angola à escala 1:1.000.000*. Pub. Inst. Inv. Cient. Tropical, Lisboa. Investigações Ultramar (4 sheets).
- Carvalho, H., da Motta Marques, J.M., & Fernandes, F.C. (1973). *Carta geológica de Angola à escala 1:250000. Folha Sul D-33/U – Chibemba*. Direcção Provincial dos Serviços de Geologia e Minas. Província de Angola, Portugal.
- Carvalho, J.G., Alves, D., Borges, J., Caldeira, B., Cordeiro, D., Machadinho, A., Oliveira, A., Ramalho, E.C., Máximo, J., Llorente, J.M., Ditutala, M., Rodrigues, J.F., Carvalho, C., Labaredas, J., García-Lobón, J.L., & Manuel, J. (2024). Depth estimation of pre-Kalahari basement in Southern Angola using seismic noise measurements. *Journal of Applied Geophysics*, <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2024.105498>.
- Chappelier, D. (1992). *Well logging in hydrogeology*. A.A. Balkema Publishers, 175p.
- Escuder-Viruet, J., & Gumiel, J.C. (2018). *Notícia Explicativa da Carta Geológica de Cahama. Folha SUL D-33/C. Escala 1:250000. 1ª Edição*. UTE PLANAGEO (IGME, LNEG, Impulso). IGEO. Luanda (Angola), 260 p.
- Feria, M.C., Martín-Banda, R., Francés, A., García-Lobón, J.L., Mochales, T., Rey-Moral, C., Gumiel, J.C., Escuder, J., Merino Martínez, E., Oliveira, A., Labaredas, J., Marques, E., Pereira, E.S., Rodrigues, J.F., & Alves, D. (2021). *Notícia Explicativa da carta geológica de síntese e hidrogeológica, mapa de áreas de levantamento intensivo (ALIS) UTE-6, escala 1:500.000. 2ª Edição*. UTE PLANAGEO (IGME, LNEG, Impulso). IGEO. Luanda (Angola), 194 p.
- Francés, A.P., Ramalho, E.C., Monteiro Santos, F., Llorente, J.M., Mateus, T., Martín-Banda, R., Cuervo, I., García-Lobón, J.L., Dala, V., Ditutala, M., Famosa, A., & Victorino, A.M. (2024). Contribution of the time domain electromagnetic method to the study of the Kalahari transboundary multilayered aquifer systems in Southern Angola. *Hydrogeology Journal*, 32, 1709-1727.
- Francés, A., Ramalho, E.C. *et al.* (en revisión). Cap. 5.3. Estudo de sistemas aquíferos multicamada em bacias sedimentares detríticas profundas e de baixa resistividade eléctrica – o caso da bacia

- do Owambo. In: Ramalho E. C., and Merino, E., Eds., *Volume Especial Plano Nacional de Geologia de Angola, PLANAGEO*, Comunicações Geológicas do LNEG.
- García-Lobón, J.L., Merino-Martínez, E., Fernández, J., Carvalho, J., Batista, M.J., Escuder, J., Lisboa, V., Martín-Banda, R., Francés, A., Ramalho, E., Martín-Méndez, I., Rey-Moral, C., Fera, M.d.C., Mochales, T., Ferreira, E., Cuervo, I., Manuel, J., & Lourenço Victorino, A.d.M. (2025). El Proyecto UTE-PLANAGEO (Plan Nacional de Geología de Angola). Objetivos, métodos, y resultados. *Boletín Geológico y Minero*, 136(1), 001. <https://doi.org/10.21701/bolgeomin/136.1/001>.
- Gärtner, A., Houben, G.J., Sitnikova, M.A., Miller, R.M., Wang, F., Zieger-Hofmann, M., Zieger, J., & Linnemann, U. (2023). Multiproxy sediment provenance analysis of two megafans in the Owambo Basin, northern Namibia. *Journal of the Geological Society*, 180(2), <https://doi.org/10.1144/jgs2022-065>.
- Gomes, C.S.F. (1972). *Subsídios para o conhecimento dos sedimentos subsuperficiais do Kalahari do sul de Angola (região da Môngua), Relatório Técnico*. República Portuguesa, Estado de Angola, Direcção Provincial dos Serviços de Geologia e Minas, Luanda.
- Gumiel, J.C., & Goicoechea, P.P. (2020). *Notícia Explicativa da Carta Geológica de Savate. Folha SUL E-33/FL. Escala 1:250000. 1ª Edição*. UTE PLANAGEO (IGME, LNEG, Impulso). IGEO. Luanda (Angola), 163 p.
- Gumiel, J.C., Martín-Banda, R., Iglesias-Martínez, M., & Goicoechea, P.P. (2018). *Notícia Explicativa da Carta Geológica de Ondjiva. Folha SUL D-33/D. Escala 1:250000. 1ª Edição*. UTE PLANAGEO (IGME, LNEG, Impulso). IGEO. Luanda (Angola), 303 p.
- Himmelsbach, T., Beyer, M., Wallner, M., Grünberg, I., & Houben, G. (2018). Deep, semi-fossil aquifers in southern Africa: A synthesis of hydrogeological investigations in northern Namibia. *Biodiversity & Ecology*, 6, 66-74, <https://doi.org/10.7809/b-e.00306>.
- Houben, G.J., Kaufhold, S., Miller, R.M., Lohe, C., Hinderer, M., Noll, M., Hornung, J., Joseph, R., Gerdes, A., Sitnikova, M., & Quinger, M. (2020). Stacked megafans of the Kalahari basin as archives of palaeogeography, river capture, and Cenozoic paleoclimate of southwestern Africa. *Journal of Sedimentary Research*, 90(9), 980-1010, <https://doi.org/10.2110/jsr.2020.46>
- Labaredas, J., & Oliveira, A. (2021a). *Carta Geológica de Angola à escala 1:250 000, folha Sul E-34/G (Cuangar) e Memória Explicativa (2ª edição)*. UTE (IGME, LNEG, Impulso) - IGEO, Luanda, 121 p.
- Labaredas, J., & Oliveira, A. (2021b). *Carta Geológica de Angola à escala 1:250000, folha Sul E-34/C (Luengue) e Memória Explicativa (2ª edição)*. UTE (IGME, LNEG, Impulso) - IGEO, Luanda, 140 p.
- Labaredas, J., & Oliveira, A. (2021c). *Carta Geológica de Angola à escala 1:250000, folha Sul E-34/I (Dirico) e Memória Explicativa (2ª edição)*. UTE (IGME, LNEG, Impulso) - IGEO, Luanda, 114 p.
- Lindenmaier, F., & Christelis, G. (2011). *Groundwater for the North of Namibia: Summary Report of Activities of Phase I - Exploration of Ohangwena II Aquifer and Preliminary Isotope Study*. Technical Report Vol. Ia of Technical Cooperation Project Groundwater for the North of Namibia, Tech. report, Department of Water Affairs and Forestry (DWAf), Namibia & Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR), Hannover, Germany.
- Lindenmaier, F., Dill, H., Dohrmann, R., Fenner, J., Gersdorf, U., Kaufhold, S., Kringel, R., Ludwig, R., Miller, R., Nick, A., Noell, U., & Walzer, A. (2012). *Results of Analysis from Drill Holes on the Cubango Megafan*. - Technical report C prepared for the Kalahari Research Project Development and Dating of Duricrusts as Base for a Paleogeographic and Hydrogeological Model of the Cuvelai-Etoshia Basin in North Namibia, Tech. report, Hannover, Germany.
- Lindenmaier, F., Miller, R., Fenner, J., Christelis, G., Dill, H.G., Himmelsbach, T., Kaufhold, S., Lohe, C., Quinger, M., Schildknecht, F., Symons, G., Walzer, A., & van Wyk, B. (2014). Structure and genesis of the Cubango Megafan in northern Namibia: implications for its hydrogeology. *Hydrogeology Journal*, 22, 1307-1328. <https://doi.org/10.1007/s10040-014-1141-1>
- Margane, A., Baemle, R., Schildknecht, F., & Wierenga, A. (2005). *Groundwater Investigations in the Oshivelo Region – Main Hydrogeological Report*, Technical report 2001.2475.0 Volume IV.GW.1.1, Federal Ministry for Economic Cooperation and Development (Bundesministerium für Wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, BMZ).

- Martín-Banda, R., Gumiel, J.C., & Iglesias-Martínez, M. (2020). *Notícia Explicativa da Carta Geológica de Nehone-Cafima. Folha SUL E-33/EK. Escala 1:250000. 1ª Edição*. UTE PLANAGEO (IGME, LNEG, Impulso). IGEO. Luanda (Angola), 190 p.
- Martín-Banda, R., López-Bahut, M.T., Gumiel, J.C., Rey-Moral, C., Fera, M.d.C., Merino-Martínez, E., García-Lobón, J.L., & Lourenço Victorino, A.d.M. (2025). Cartografía de la cuenca del Kalahari en el sur de Angola mediante métodos radiométricos y teledetección. *Boletín Geológico y Minero*, 136(1), 005. <https://doi.org/10.21701/bolgeomin/136.1/005>.
- Miller, R.M., Pickford, M., & Senut, B. (2010). The geology, palaeontology and evolution of the Etosha pan, Namibia: Implications for terminal for Kalahari deposition. *South African Journal of Geology*, 113(3), 307-334. <https://doi.org/10.2113/gssajg.113.3.307>
- Miller, R. (1992). The Etjo and Kalahari sediments of the Owambo Basin, *Abstracts volume, Kalahari Symposium, November, 1992*, 42-51.
- Monteiro Santos, F.A. (2004). 1-D laterally constrained inversion of EM34 profiling data. *Journal of Applied Geophysics*, 56, 123-134. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2004.04.005>
- Nascimento, U., & Moura Esteves, J. (1966). *Prospecção geofísica da possança das formações detríticas nas áreas dos concelhos de Roçadas e Cuanhama (Baixo Cunene)*. Serviço de Geotecnia, Divisão de Prospecção, Relatório Técnico nº 38 + Anexo.
- Nascimento, U., Moura Esteves, J., & Farinha, J.A.R. (1967). *Prospecção geofísica da possança das formações detríticas nas áreas dos concelhos de Roçadas e Cuanhama (Baixo Cunene)*. Serviço de Geotecnia, Divisão de Prospecção. Relatório Complementar ao Relatório Técnico nº 41, 8 p. + Anexo.
- Oliveira, A., & Sousa, J. C. (2021). *Carta Geológica de Angola à escala 1:250 000, folha Sul D-33/U - Chibemba e Memória Explicativa (2ª edição)*. UTE (IGME, LNEG, Impulso) - IGEO, Luanda, 206 p.
- Pacheco, A. (1976). Subsídio para o conhecimento do Sistema do Kalahari em Angola. *Boletim dos Serviços de Geologia e Minas*, 1, 29-38.
- Ramalho, E.C., Francés, A.P., Santos, F.M., & Victorino, A.M.L. (2023a). 3D electrical structure definition of aquifer systems in the Kalahari basin in Southern Angola based on legacy data reprocessing. *Journal of Applied Geophysics*, 211. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2023.104968>
- Ramalho, E.C., Francés, A., Martín-Banda, R., Mateus, T., Llorente, J.M., Famosa, A., Cuervo, I., García-Lobón, J.L., & Victorino A.M.L. (2023b). Contribuição de sondagens mecânicas e diagrfias para o estudo dos sistemas aquíferos multicamada transfronteiriços da bacia do Kalahari, Cunene, Angola. In: Lopes, F.C., Dinis, P.A., Duarte, L.V., and Cunha, P.P. (eds.), *Livro de Resumos XI Congresso Nacional de Geologia*, 461-462. <http://hdl.handle.net/10400.9/4112>
- Ramalho, E.C., Marques da Silva, M., & Correia, A. (2009). *Diagrfias Aplicadas à Hidrogeologia*. Editora Palimage. 282 p. ISBN:978-972-8999-64-3.
- Schildknecht, F. (2012). *Groundwater exploration with TEM soundings in the Cuvelai-Etosha Basin*. Report Part C - Groundwater for the North of Namibia (Cuvelai-Etosha Basin), Technical report, Bundesanstalt Geowissenschaften und Rohstoffe, Hanover, Germany.
- Sousa, J.C., Oliveira, A., & Máximo, J. (2021a). *Carta Geológica de Angola à escala 1:250000, folha Sul D-33/Q (Jamba) e Memória Explicativa (2ª edição)*. UTE (IGME, LNEG, Impulso) - IGEO, Luanda, 257 p.
- Sousa, J.C., Oliveira, A., & Máximo, J. (2021b). *Carta Geológica de Angola à escala 1:250000, folha Sul D-33/V (Cuvelai) e Memória Explicativa (2ª edição)*. UTE (IGME, LNEG, Impulso) - IGEO, Luanda, 211 p.
- Wallner, M., Houben, G., Lohe, C., Quinger, M., & Himmelsbach, T. (2017). Inverse modelling and uncertainty analysis of potential groundwater recharge to the confined semi-fossil Ohangwena II Aquifer, Namibia. *Hydrogeology Journal*, 25, 2303-2321. <https://doi.org/10.1007/s10040-017-1615-z>
- Winsauer, W.O., Shearin Jr., H.M., Masson P.H., & Williams, H. (1952). Resistivity of brine saturated sands in relation to pore geometry. *AAPG Bulletin*, 36, 253-277. <https://doi.org/10.1306/3D9343F4-16B1-11D7-8645000102C1865D>