

MEJORA DE LA INFRAESTRUCTURA DE CONOCIMIENTO SOBRE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS COMO APOYO A LA GESTIÓN HIDROLÓGICA DE LA CIUDAD DE MELILLA (2015-2017) FASE 1ª.

# **INFORME SOBRE LA REVISIÓN GEOLÓGICA Y LAS CAMPAÑAS GEOFÍSICAS PREVISTAS EN LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DE MELILLA**

**Noviembre 2015**

## Índice

1. Antecedentes geológicos
  - 1.1. Marco geológico regional
  - 1.2. Estudios geológicos de la ciudad de Melilla
  - 1.3. Secuencia estratigráfica
2. Sondeos de exploración existentes
3. Antecedentes geofísicos
  - 3.1. Datos gravimétricos y magnéticos en el entorno de Melilla
  - 3.2. Sondeos eléctricos verticales (SEVs)
4. Reconocimiento de campo y toma de muestras
5. Planificación de futuras campañas de prospección geofísica y de sondeos de investigación geológica - hidrogeológica
  - 5.1. Campaña de prospección gravimétrica a realizar en 2015
  - 5.2. Campaña de tomografía eléctrica prevista
  - 5.3. Análisis sobre la viabilidad de realizar una campaña de sondeos para la investigación somera de formaciones.
6. Proyecto SIG
7. Modelo geológico 3D de la Ciudad Autónoma de Melilla
8. Referencias

## 1. Antecedentes geológicos

### 1.1. Marco geológico regional

El sector estudiado se sitúa en la parte oriental de la Cordillera del Rif, en la costa norte del continente africano. Esta cordillera, junto con la Cordillera Bética (figura 1), constituye la parte más occidental de la cadena Alpina Mediterránea y sus relieves son resultado de la convergencia oblicua entre las placas Euroasiática y Africana desde el Tortonense (DeMets et al., 1994). En concreto, la Ciudad Autónoma de Melilla (Fig. 2) se localiza sobre la denominada cuenca de Melilla-Nador, una de las cuencas post-orogénicas del NE del Rif. Está limitada en su extremo norte por el Cabo de Tres Forcas, con 400 m de altitud, y en su extremo sur por el monte Gurugú, con una cota de 893 m. Los extremos oriental y occidental se abren al Mar de Alborán, el extremo más occidental del Mar Mediterráneo.

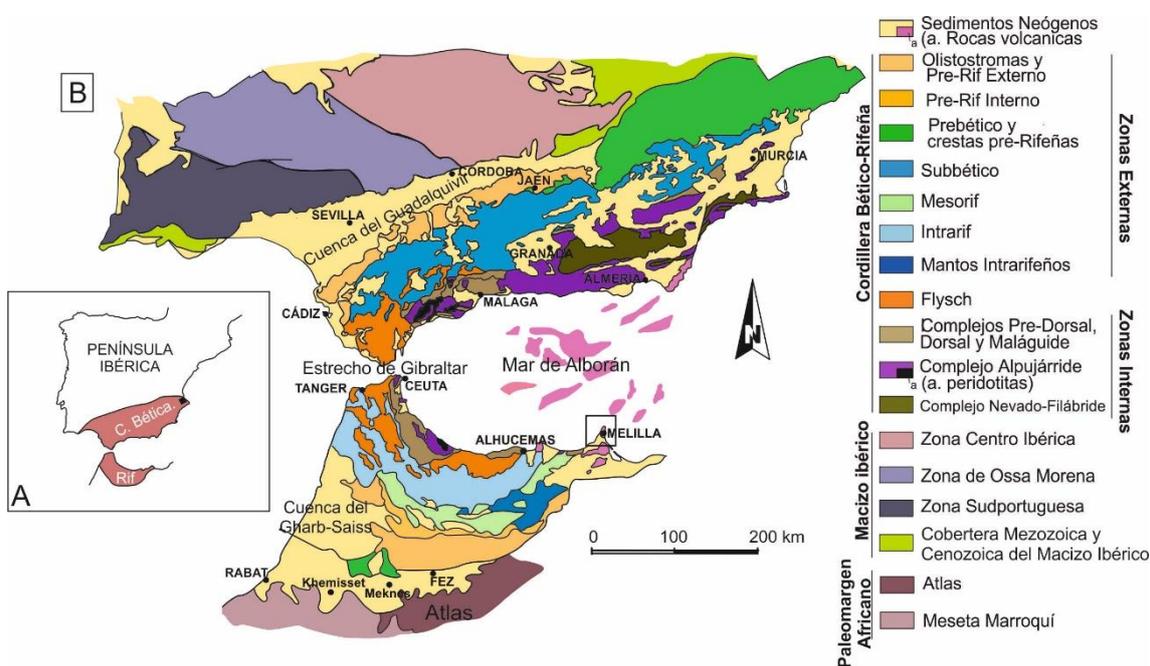


Figura 1. Mapa geológico regional de la Cordillera Bético-Rifeña y de su antepaís (Macizo Ibérico y Paleomargen Africano). La zona de Melilla, estudiada en este informe, está marcada.

Al oeste de Melilla afloran las Zonas Externas de la Cordillera del Rif (Andrieux, 1971; Ben yaïch, 1991; Asebriy, 1984), que se dividen, de norte a sur, en tres unidades estructurales: el Intrarif, el Mesorif y el Prerif (Suter, 1980). En la zona de estudio, no aflora el basamento pero lateralmente se observan rocas pertenecientes al Mesorif, principalmente constituido por materiales margosos y calcáreos de edades mesozoicas y cenozoicas (Azdimousa, 1998), en algunos casos afectados por un ligero metamorfismo (Frizon De Lamotte, 1982). En el entorno de Melilla, los afloramientos más próximos de materiales de las Zonas Internas tienen muy poca extensión y se localizan inmediatamente al sur del cabo de Tres Forcas.

Además, existen volcanes que constituyen relieves importantes del Rif oriental (Ennadifi, 1974; Leblanc, 1979; Hernandez, 1983). Entre ellos destacan el Volcán del Cabo de Tres Forcas y el Volcán de Gurugú. El primero de ellos se localiza en la parte NE de la Cuenca de Melilla y una buena parte se encuentra sumergida a centenares de metros de la costa. Las lavas son riolíticas y dacíticas y se han asociado a cuatro fases de actividad volcánica. La edad estimada para este volcán es de 9.6 Ma. (Bellon, 1976). Al sur de la Cuenca de Melilla se

4localiza el Gurugú, un estratovolcán muy erosionado que ha estado en actividad desde los 9,5 Ma. (Tortonense) hasta los 2,6 Ma. (Plioceno superior) (Hernandez y Bellon, 1985) y constituye el mayor complejo volcánico neógeno nor-magrebí (Maury et al., 2000).

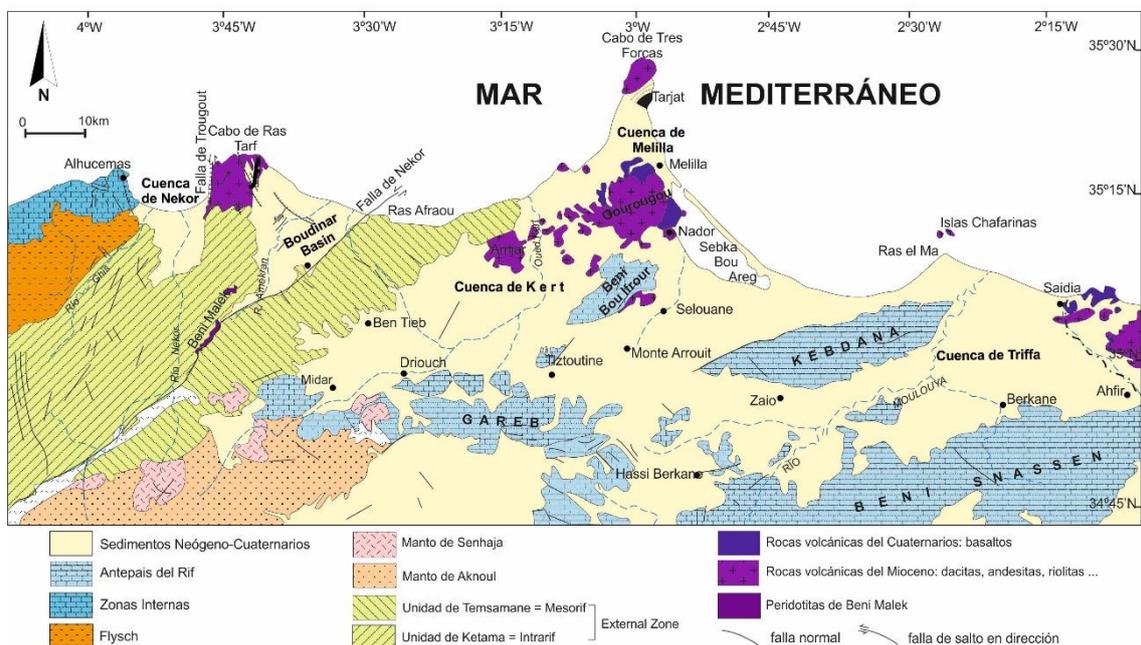


Figura 2. Mapa geológico de la Cordillera del Rif en el sector de Melilla (Modificado de Anahnah, 2008).

## 1.2. Estudios geológicos de la ciudad de Melilla

Dentro de la zona de soberanía española (Fig. 3), el cauce fluvial denominado Río de Oro (que nace al oeste, en el monte Gurugú) divide el territorio en dos mitades. La mitad septentrional está formada por una serie sedimentaria terciaria que da un relieve tabular y termina abruptamente al E en un acantilado. La mitad meridional está formada por parte de dicho relieve tabular y por la parte más distal de las coladas volcánicas del Gurugú, junto con formaciones de ladera y abanicos aluviales.

Los primeros estudios geológicos sobre el territorio de Melilla y su entorno se realizaron en el primer tercio del Siglo XX. Durante este período, los trabajos realizados estaban dirigidos principalmente a conocer los recursos mineros del norte de Marruecos (Adaro y Valle, 1910). Simultáneamente, se realizaron las primeras cartografías a escala 1:50.000 de la zona de Melilla y su entorno (Fernández Navarro, 1908, 1909 y 1911). En los años treinta comienzan las investigaciones sobre el conjunto de la Cordillera del Rif (Fallot, 1937; Fallot y Marín, 1939).

A principios de los 60 se empiezan a realizar investigaciones geológicas sobre temáticas más precisas, como el vulcanismo del Gurugú y del Cabo Tres Forcas (Charlot et al., 1967; Choubert et al., 1968) o la tectónica (Rampoux et al., 1979) y estratigrafía (Choubert et al., 1966) de la cuenca de Melilla-Nador. A partir de los años 80, el conocimiento sobre el vulcanismo del Gurugú, el Cabo Tres Forcas (Hernández, 1983; El Bakkali et al., 1998; Maury et al., 2000) y el Terciario de la cuenca de Melilla-Nador progresa gracias a multitud de trabajos (Rouchy, 1982; Saint Martin, 1990; Cornée et al., 1994; André et al., 1993; Benmoussa et al., 1994; Cunningham et al., 1994; Roger et al. 2000; Münch et al., 2001).

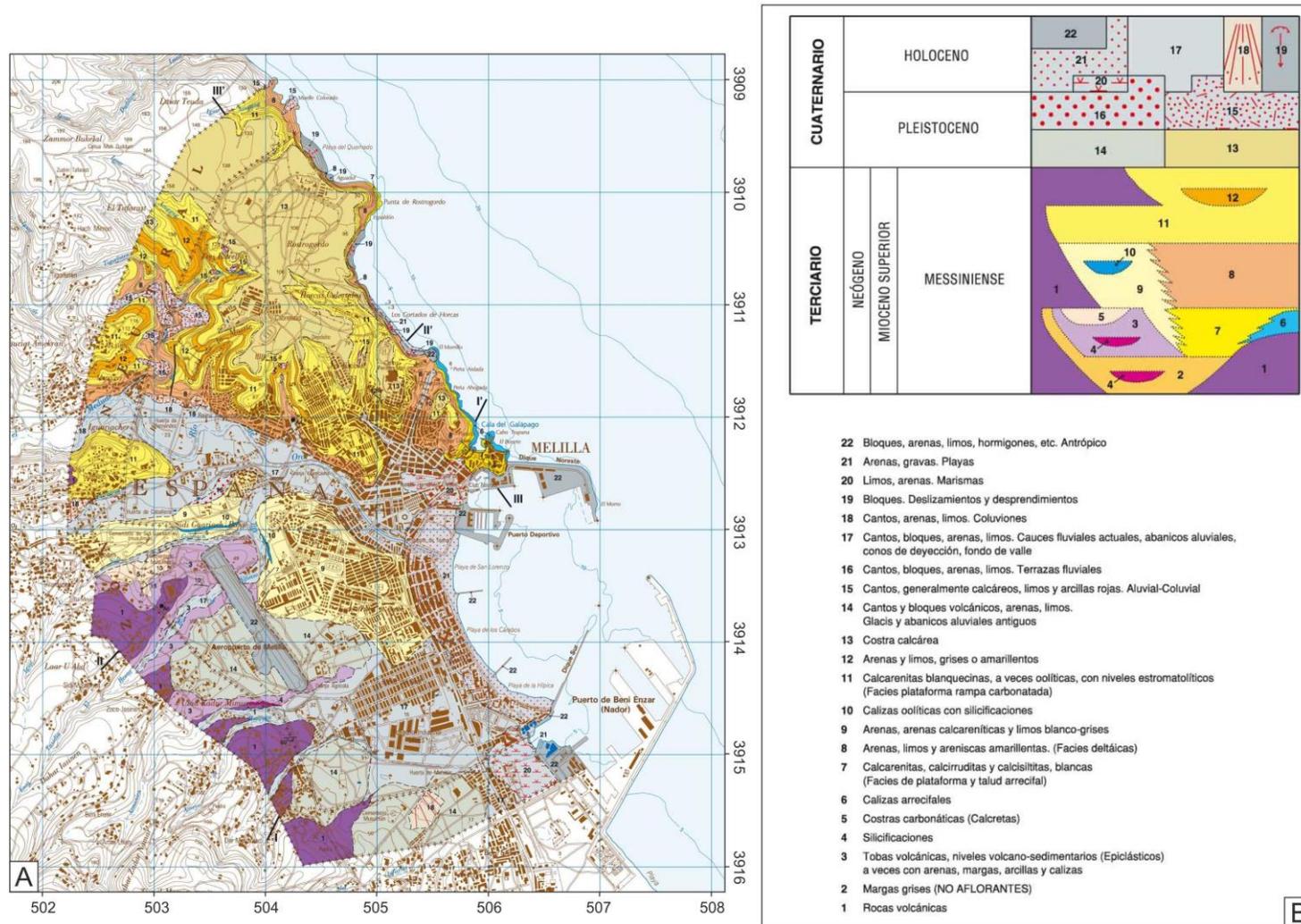


Figura 3. Detalle del mapa geológico MAGNA de escala 1/25.000 de la Hoja de Melilla (A) y leyenda (B) de las distintas litologías (Pineda Velasco et al., 2013).

### 1.3. Secuencia estratigráfica

La secuencia estratigráfica del territorio de Melilla se puede dividir en tres grandes conjuntos: las rocas volcánicas y litologías asociadas, la serie sedimentaria terciaria y las formaciones cuaternarias (Gómez-Gras y Parcerisa, 2004; Pineda Velasco et al., 2013).

1. Los afloramientos de rocas volcánicas del Gurugú (unidad cartográfica 1 (UC1) del MAGNA) y otras litologías volcano-sedimentarias asociadas (UC 3, 4 y 5) tienen poca extensión y están limitados a la parte suroeste del territorio de Melilla. En profundidad, sondeos de captación de agua han cortado niveles volcánicos más extensos que los de superficie (Fig. 4). Los materiales emitidos en las diversas erupciones constituyen un conjunto de coladas subaéreas, niveles piroclásticos de caída (principalmente tobas pumíticas) y niveles volcanoclásticos tobáceos. Todos estos materiales se han ido intercalando secuencialmente en la secuencia sedimentaria neógena de la Cuenca de Melilla-Nador.

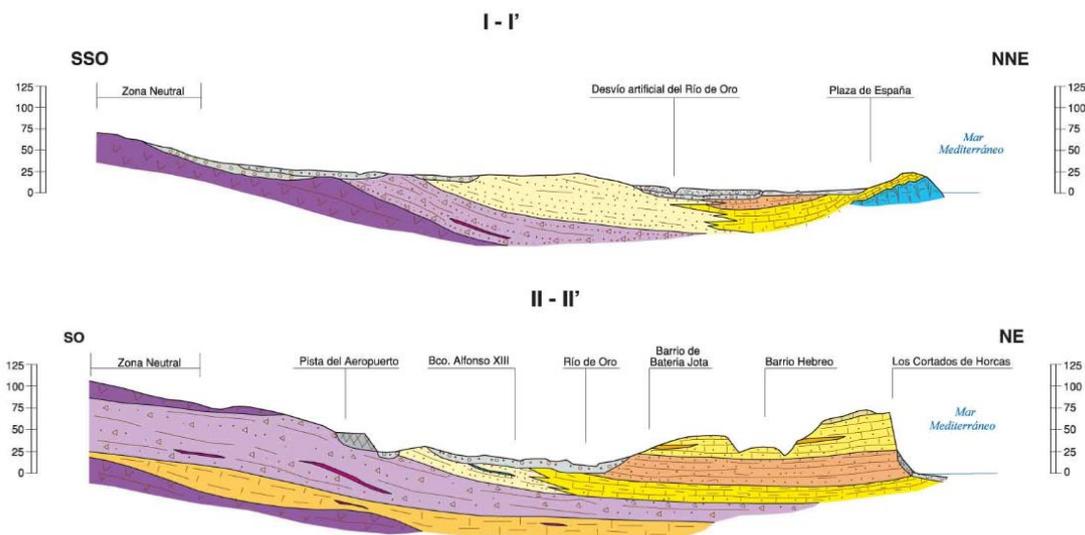


Figura 4. Cortes geológicos de la hoja MAGNA de Melilla (Pineda Velasco et al., 2013) que muestran las relaciones estratigráficas entre las rocas volcánicas y los sedimentos neógenos. La leyenda de las distintas litologías es la misma que la de la figura 3.

2. La serie terciaria (Fig. 3 y 5), neógena y marina, está bien expuesta en la mitad septentrional del territorio. La parte baja de la serie está constituida por facies arrecifales y de talud arrecifal (Unidad Carbonática Inferior) constituidas por colonias de corales tipo porites (UC6) con potencias variables de hasta 20 metros sobre las que se disponen calizas de moluscos y algas rojas, calcarenitas y calciruditas blancas (UC7) con buzamientos de 10-20° y potencia aproximada de 25 metros. Sobre ellas se disponen facies deltaicas (Unidad detrítica Intermedia) formadas por areniscas, arenas y limos de color amarillo (UC8) con potencias en torno a los 30 metros. Finalmente, sobre ellas, se depositaron facies de plataforma carbonatada (Unidad Carbonática Superior) con una potencia aproximada de 50 metros y constituidas por arenas, calcarenitas y limos blancos-grises (UC9), calizas oolíticas con silicificaciones (10), calizas oolíticas y calcarenitas blanquecinas con niveles estromatolíticos (UC11) y finalmente arenas y limos grises o amarillentos (UC12).

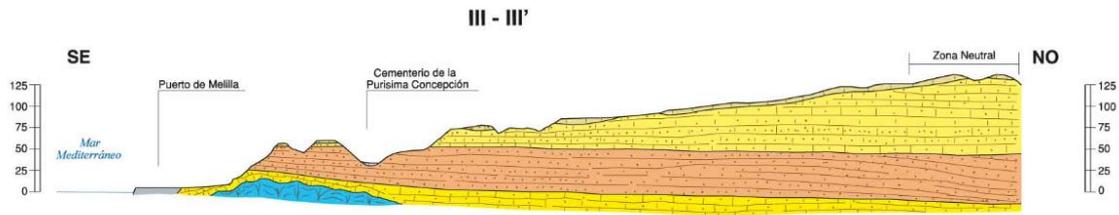


Figura 5. Corte geológico de la hoja MAGNA de Melilla (Pineda Velasco et al., 2013) que muestra la secuencia sedimentaria neógena. La leyenda de las distintas litologías es la misma que la de la figura 3.

- Las formaciones cuaternarias más características están representadas por una costra calcárea (UC13), responsable de la morfología tabular de la serie terciaria, y por glaciares y abanicos aluviales antiguos (UC14) procedentes del Gurugú. Afloran también formaciones fluviales del río de Oro (UC16 y UC17), así como aluviales-coluviales (15), coluviones (18), deslizamientos y desprendimientos (UC19), marismas (UC20), playas (UC21) y depósitos antrópicos (UC22).

Por debajo de o intercaladas con esta secuencia de rocas, los sondeos de investigación y captación de aguas subterráneas han permitido distinguir la presencia de margas grises del Messiniense (UC2), a veces con aspecto pizarroso, que constituyen la base impermeable de la Hidrogeología de Melilla pero que no afloran en su territorio. Por debajo de ellas se cortan unas calcarenitas "tectonizadas" de edad Tortoniense-Messiniense similares a las que afloran al NE, en el cabo de Tres Forcas, con potencias en torno a los 200 metros. Bajo ellas, un sondeo profundo ha cortado rocas paleozoicas (mármoles y metapelitas) pertenecientes a un basamento metamórfico, que se han asignado tanto las Zonas Internas de la Cordillera del Rif como al paleomargen africano levemente metamorfozadas.

## 2. Sondeos de exploración

Se ha realizado el inventario de los sondeos de captación de aguas subterráneas y sondeos de investigación profundos que disponen de columna litológica (Fig. 6 y 7). Esta información se ha utilizado como datos de entrada para la futura realización del modelo geológico 3D de Melilla. Los datos provienen, en gran medida, de la Síntesis Hidrogeológica de Melilla (ITGE, 1985), que ya realizó una recopilación previa de las fichas de inventario de estos sondeos.

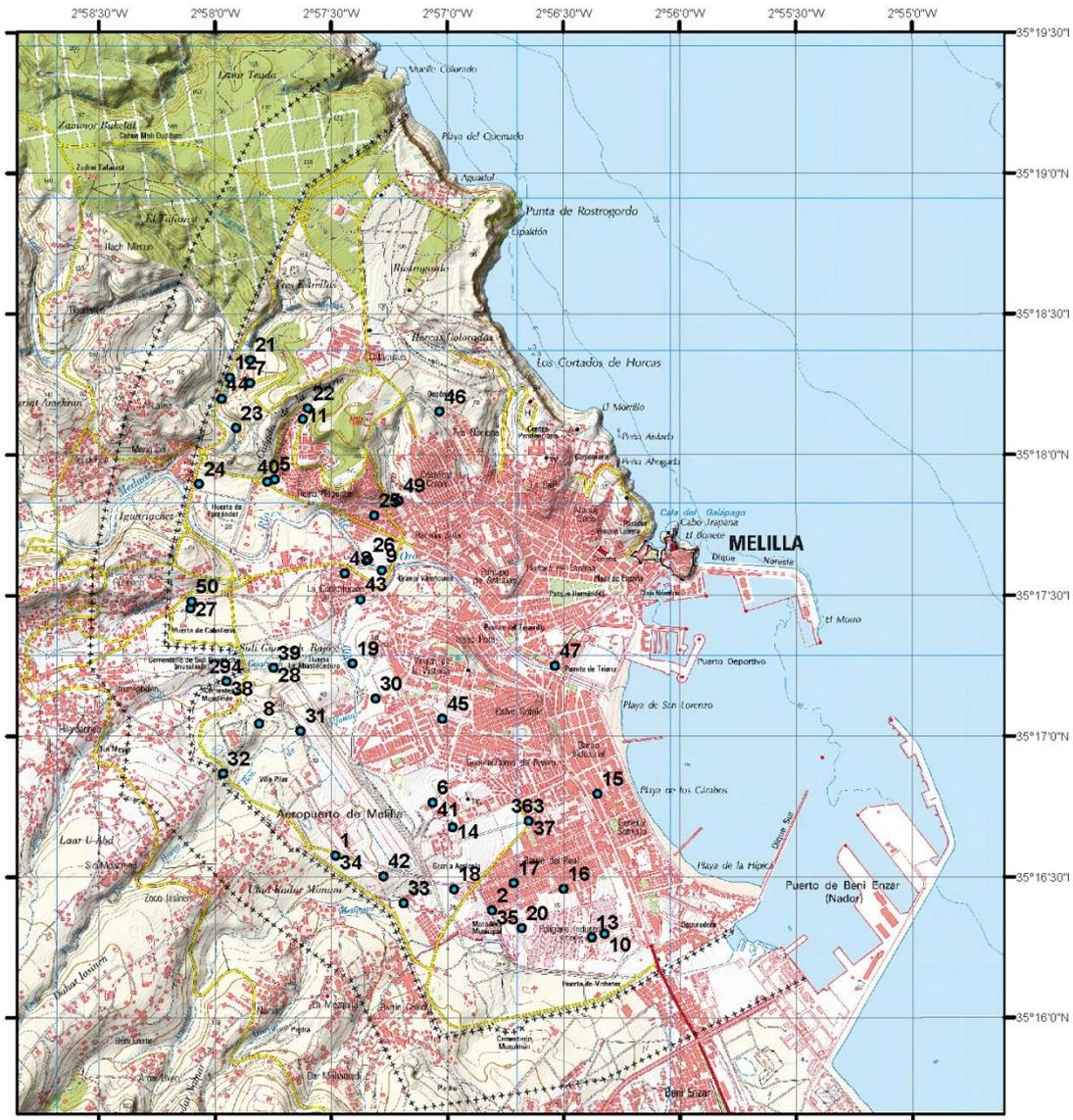


Figura 6. Recopilación y relocalización de los datos de columnas litológicas de sondeos disponibles.

Los sondeos numerados del 1-7, 20-22, 36, 38-39, 41-42 y 45 han sido realizados bajo la supervisión del Instituto geológico y Minero de España en diferentes campañas. Los pozos del 8-16, 37, 40 y 43 fueron realizados durante la década de los 60 por el antiguo Instituto Nacional de Colonización y se recogen en el *“Informe sobre los sondeos realizados por el Instituto Nacional de Colonización en el territorio de soberanía de Melilla”* en 1964. Los

sondeos del 17-19 y 44 fueron realizados por el Servicio Geológico de Obras Públicas (SGOP) con motivo de un estudio realizado en 1975 para conocer las relaciones de los acuíferos aluvial y volcánico, con motivo de la salinización de alguno de ellos. Del 23 al 36 son sondeos de reconocimiento realizados por el IGME en 1958 con motivo de un estudio hidrogeológico (De la Concha, 1958). La información referente a los sondeos del 46 al 50 ha sido extraída del archivo de la Ciudad Autónoma de Melilla. En la tabla se incluye un sondeo de investigación profundo (42) realizado por el IGME que se reprofundizó hasta los 727 metros de profundidad, y que está recogido en un informe de 1990 denominado "*Sondeo profundo para captación de aguas subterráneas*" y en el documento previo "*Informe de Evaluación de Recursos Hidráulicos y propuestas de actuaciones para el abastecimiento de Agua de Melilla*". Este último sondeo es de especial interés ya que corta los materiales que constituyen el basamento de la cuenca.

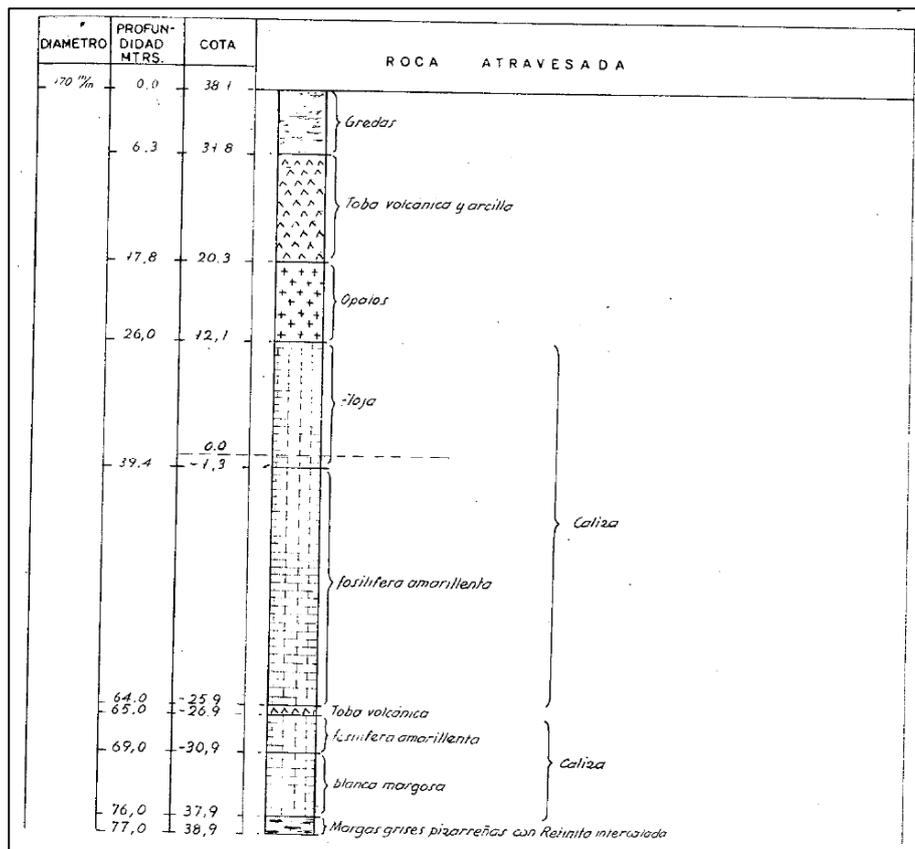


Figura 7: Ejemplo de columna del sondeo nº 9 Barranco. De la Concha (1958).

La mayor parte de los sondeos (tabla 1) está localizada en la mitad meridional del territorio de Melilla y la profundidad de investigación está comprendida entre 40 y 315 m. La única excepción es el sondeo 42, que fue reprofundizado a posteriori, hasta los 727 metros. La información proporcionada por las columnas litológicas ha sido interpretada y homogeneizada en una base de datos para su posterior integración, junto al resto de datos geológicos y geofísicos disponibles, como dato de entrada para el futuro modelo geológico 3D. La secuencia estratigráfica que se ha utilizado es la descrita en la sección 7. A continuación se muestran varios cortes geológicos representativos de la estructura de la cuenca en los sectores con mayor información de sondeos.

ID	REFERENCIA	TOPONIMIA	LATITUD	LONGITUD	COTA	PROFUNDIDAD	FUENTE
1	215330002	Aeropuerto I	3903681	503818	59,3	245	IGME 75-76
2	215330003	Altos del Real I	3903321	504839	21	133	IGME 81
3	215330004	Maestranza I	3903908	505078	19,8	122	IGME 81
4	215330005	Sidi Guariach I	3904826	503107	39,8	262	IGME 81
5	215330006	Sidi Guariach II	3904915	503413	30	130	IGME 76
6	215330008	Cañada de la Muerte	3906152	503422	28,8	105	IGME
7	215330010	Ctra. Aeropuerto I	3904029	504451	31,9	310	IGME
8	215330013	Río Nano I	3906783	503260	52,6	80	INC (2)
9	215330014	Sidi Guariach	3904547	503319	63,7	38,2	INC (3)
10	215330015	Río Oro	3905554	504119	10	127	INC (4)
11	215330016	Cuartel de la Legión	3903168	505573	8	50	INC (5)
12	215330017	Cabrerizas	3906547	503605	64,7	85,7	INC (6)
13	215330018	Río Nano II	3906818	503128	39,9	72	INC (7)
14	215330019	Cuartel de la Legión II	3903144	505490	10	50	INC (8)
15	215330020	Pajares	3903045	505062	18	117	INC (11)
16	215330021	Granja agrícola	3903867	504581	31	78,8	INC (12)
17	215330022	P-03	3904087	505525	6,7	114,4	SGOP
18	215330023	P-01	3903464	505304	12,9	113,9	SGOP
19	215330024	P-04	3903501	504979	19	119	SGOP
20	215330025	Fábrica de Harinas	3903460	504591	29	211	IGME
21	215330026	Jardin Valenciano	3904942	503929	26,6	315	IGME
22	215330027	Huerta Cano	3903205	505033	18,9	300	IGME
23	215330028	Barranco de Nano	3906936	503260	51,6	75,2	IGME 56 (2)
24	215330029	Barranco de la Muerte	3906617	503638	64,7	141,2	IGME 56 (1)
25	215330030	Barranco de Nano	3906489	503170	37,6	68,7	IGME 56 (3)
26	215330031	Río Oro	3906121	502926	24,2	143,6	IGME 56 (6)
27	215330032	Hernán Cortes	3905913	504069	28,1	80,1	IGME 56 (4)
28	215330033	Río Oro	3905624	504030	10	80,1	IGME 56 (5)
29	215330034	Arroyo Farhana	3905305	502872	30	68	IGME 56 (7)
30	215330035	Sidi Guariach	3904915	503413	30	112,8	IGME 56 (11)
31	215330036	Sidi Guariach	3904826	503107	39,8	97	IGME 56 (10)
32	215330037	Ctra. Sidi Guariach	3904712	504079	34	145	IGME 56 (8)
33	215330038	Barranco	3904500	503589	56,8	77	IGME 56 (9)
34	215330039	Barranco	3904220	503085	69,5	94,5	IGME 56 (13)
35	215330039	Barranco	3904220	503085	69,5	94,5	IGME 56 (12)
36	215330041	Aeropuerto II	3903681	503818	59,3	242	IGME 75-76
37	215330042	Barrio Real	3903321	504839	21	90	INC (10)
38	215330043	Altos del Real II	3903321	504839	21	126	IGME 78
39	215330044	Maestranza II	3903908	505078	19,8	115	IGME 78
40	215330045	Maestranza III	3903908	505078	19,8	87,5	INC (9)
41	215330046	Sidi Guariach 1-B	3904826	503107	39,8	140	IGME 77-81
42	215330047	Sidi Guariach 2-B	3904915	503413	30	120	IGME 76
43	215330048	Cañada de la Muerte	3906135	503373	25,9	75	INC (1)
44	215330049	Reina Regente	3906004	504193	30,9	50	SGOP
45	215330050	Ctra. Aeropuerto	3904029	504451	31,9	260	IGME 81

ID	REFERENCIA	TOPONIMIA	LATITUD	LONGITUD	COTA	PROFUNDIDAD	FUENTE
46		Aeropuerto III	3903545	504130	49,4	727	Archivo C.A. Melilla
47		Alcaraz	3905362	503981	21	54	Archivo C.A. Melilla
48		Río Nano	3906680	503075	44	100	Archivo C.A. Melilla
49		Álvarez Claro	3904580	504514	38	73	Archivo C.A. Melilla
50		Colon II	3906597	504496	68	140	Archivo C.A. Melilla
51		Músico Granados	3904927	505248	13	54	Archivo C.A. Melilla
52		Constitución	3905534	503879	19	162	Archivo C.A. Melilla
53		Reina Regente	3906011	504228	31	58	Archivo C.A. Melilla
54		Farhana II	3905348	502879	29	122	Archivo C.A. Melilla

*Tabla 1. Relación de sondeos con información litológica. Se muestran coordenadas de latitud y longitud (en metros), cota y profundidad del sondeo (en metros). La referencia se corresponde con la de la ficha del inventario de aguas del IGME.*

### 3. Antecedentes geofísicos

En la Ciudad Autónoma de Melilla se han realizado varias campañas de adquisición de datos geofísicos con distinta finalidad. A continuación se enumeran y describen con el objetivo de poner en contexto los nuevos datos que se obtendrán durante este trabajo.

#### 3.1. Datos gravimétricos y magnéticos en el entorno de Melilla

A partir de los años 50-60 del pasado siglo, se empezaron a realizar campañas de adquisición de datos gravimétricos y magnéticos en Marruecos. Sin embargo, no es hasta tres décadas después cuando la *Direction des Mines et de la Géologie* realizó un mapa gravimétrico general de Marruecos que se publicó en siete hojas de escala 1/500 000 (Van Den Bosch 1971, 1981). La ciudad de Melilla está comprendida dentro de la hoja gravimétrica de Oujda y tiene una densidad de medidas de 1-5 por km<sup>2</sup>. El mapa de mapa Anomalía de Bouguer (Fig. 8) muestra un aumento regional de la anomalía de sur a norte, que es consecuencia del adelgazamiento de la corteza continental del Rif hacia el Mar de Alborán. La información regional proporcionada por este mapa es útil para la realización posterior de campañas de detalle, como la que se propone en este informe.

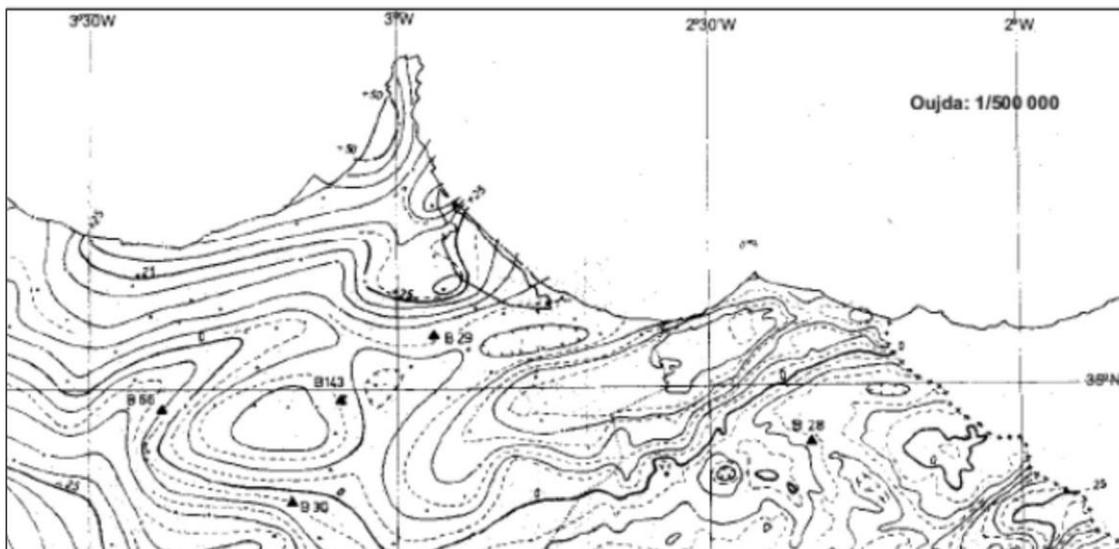


Figura 8. Mapa gravimétrico de la zona de estudio extraído de la hoja gravimétrica de Oujda de escala: 1/500 000 (Van Den Bosch 1971, 1981).

De manera similar a lo ocurrido con la investigación gravimétrica, el mapa aeromagnético de Marruecos a escala 1/2.500.000 (Fig. 9; Green et al., 1992) fue una realidad tras la compilación de medidas previas realizada por el African Magnetic Mapping Project (AMMP). En él se observa un dipolo muy intenso, orientado E-O, que cubre toda la cuenca de Melilla y su prolongación oriental hacia el Mar de Alborán. La amplitud de la anomalía magnética supera los 420 nT y tiene unas dimensiones de 96km en dirección E-O y de 70 km en dirección N-S. Dicha anomalía fue interpretada regionalmente (El Azzab, 1997) como consecuencia de la presencia de las rocas volcánicas del volcán de Gourougou, el cabo de Tres Forcas y las Islas Chafarinas

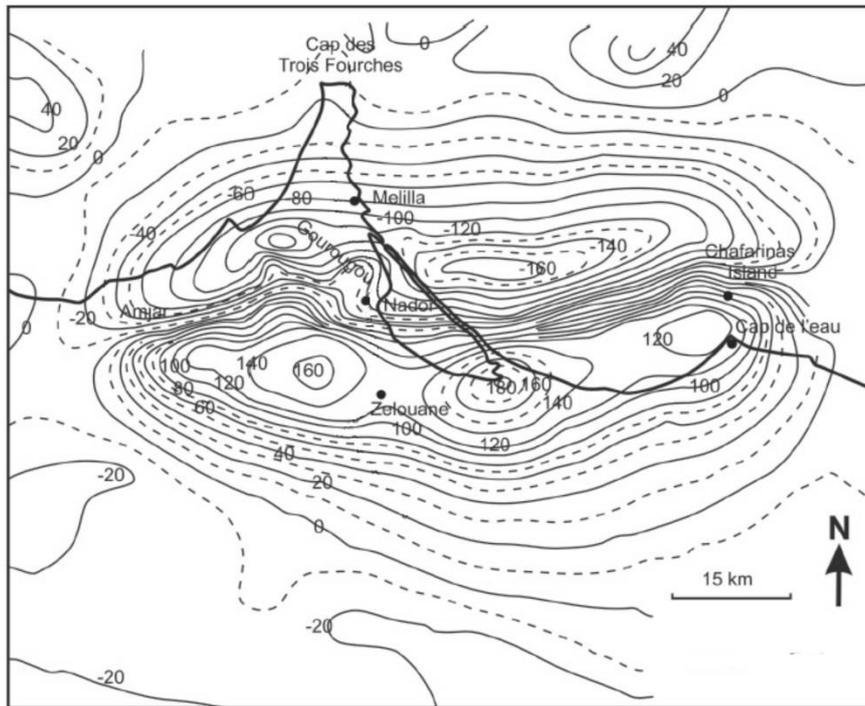


Figura 9. Mapa aeromagnético (nT) del sector de Melilla extraído del Mapa Aeromagnético de Marruecos de escala 1/2.500.000 (Service Géologique du Maroc, unpublished data); modificado de Anahnah et al, 2009.

Además de la información proporcionada por los mapas regionales, se han realizado otros estudios gravimétricos y magnéticos en el entorno de la cuenca de Melilla (Anahnah, 2008). En dicho trabajo, se presentaron los resultados de tres perfiles (gravimétricos y magnéticos), con orientación N-S, que atraviesan el volcán del Cabo de Tres Forcas y el volcán de Gourougou (Fig. 10A). De ellos, el perfil más oriental pasa cerca de la ciudad de Melilla y proporciona información del contexto regional.

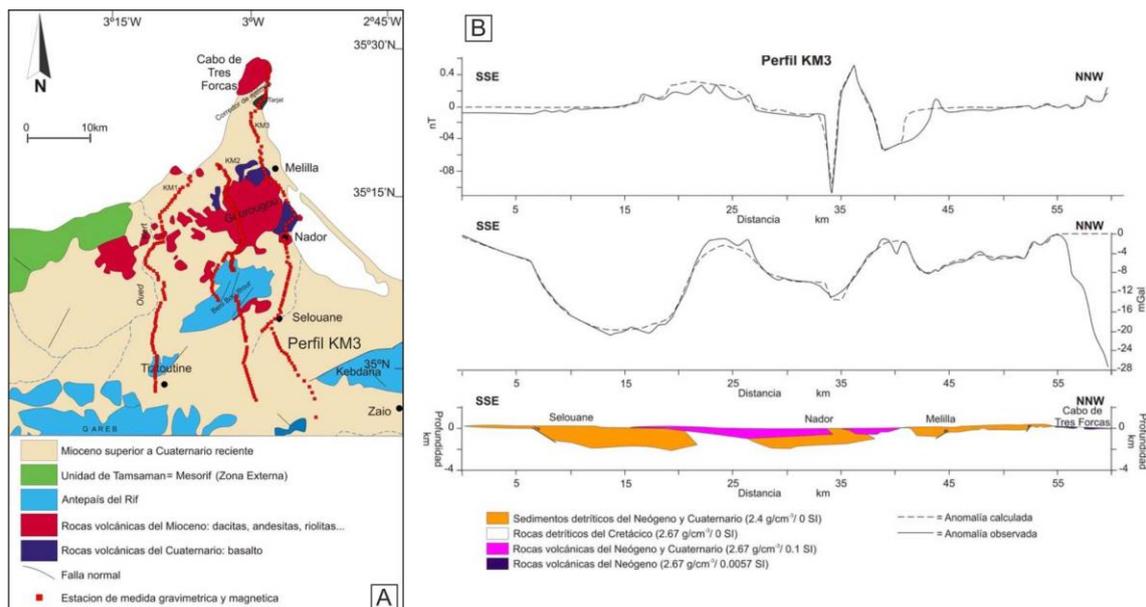


Figura 10. Mapa de localización de medidas (A) y modelo gravimétrico y magnético 2D (B); modificado de Anahnah, 2008.

El modelo 2D (Fig. 8B), que integra los datos gravimétricos y magnéticos, muestra que las cuencas que atraviesa son asimétricas y generalmente más profundas hacia los bordes donde limitan con los volcanes. Los autores de este trabajo señalan la presencia de fallas que afectan al basamento de las cuencas. Dichas estructuras, generalmente no se observan bien en superficie, aunque las variaciones muy pronunciadas en el espesor del relleno sedimentario sugieren su presencia. En este perfil se observa, así mismo, una anomalía magnética relacionada con las rocas volcánicas del volcán de Gourougou.

### 3.2. Sondeos eléctricos verticales (SEVs)

Respecto a los datos de prospección eléctrica disponibles en la ciudad de Melilla hay que destacar dos campañas. En 1963, el informe **“Prospección eléctrica en la plaza de Soberanía de Melilla para aguas subterráneas”** recoge la realización de una malla de 26 SEVs (en naranja en la figura 11) localizada en el extremo N del aeropuerto. Las curvas de resistividad de este trabajo proporcionan información hasta 120 metros de profundidad y se distribuyen en 3 perfiles. A partir de su análisis se generó un mapa de isobatas del muro de las calizas que afloran en el barranco del Nano, con profundidades de 30-10 metros bajo el nivel del mar. En 1974, el IGME realizó un **“Estudio geofísico e hidroquímico para la realización de nuevos sondeos de captación de aguas subterráneas, en la zona de soberanía de Melilla”** en el que se adquirieron 27 SEVs (Fig. 11; en verde).

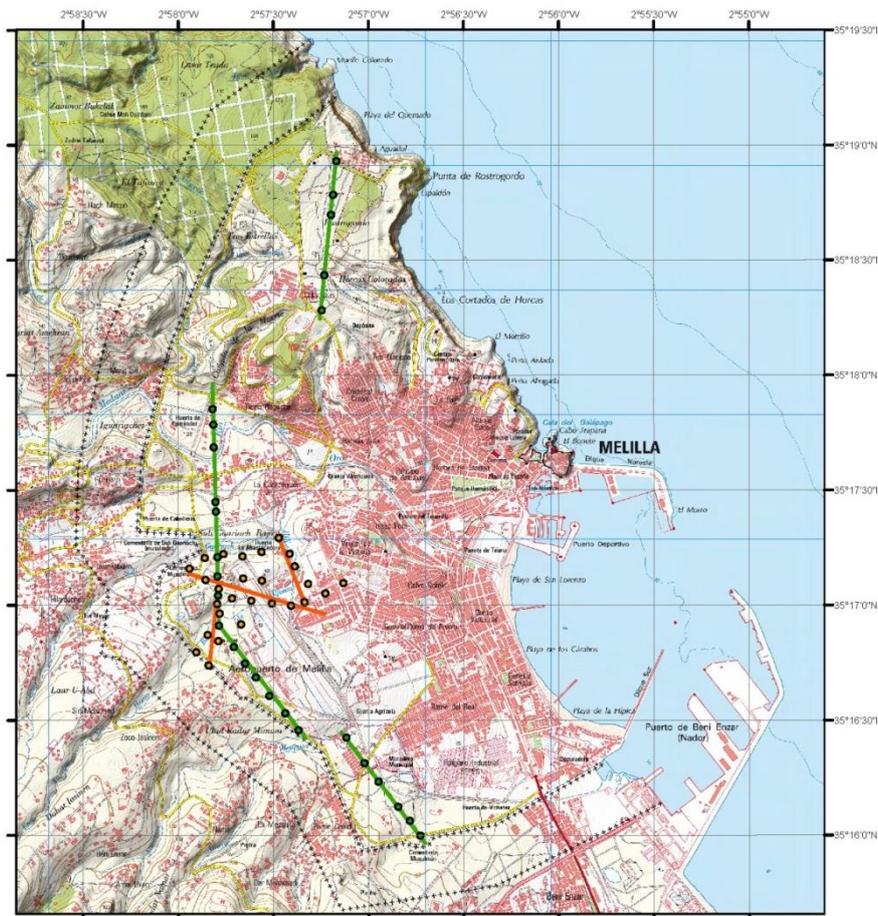


Figura 11. Posición de los sondeos eléctricos verticales realizados en la Ciudad Autónoma de Melilla.

Los SEVs se distribuyeron en 4 perfiles, con la finalidad de diferenciar las distintas formaciones geológicas que afloran en la ciudad y determinar sus espesores (Fig. 12). Los rangos de resistividad obtenidos para las distintas litologías fueron: travertinos (50-150 ohm.m), traquitas (10-75 ohm.m), calizas/areniscas más o menos fracturadas (50-200 ohm.m) y arcillas (35-80 ohm.m).

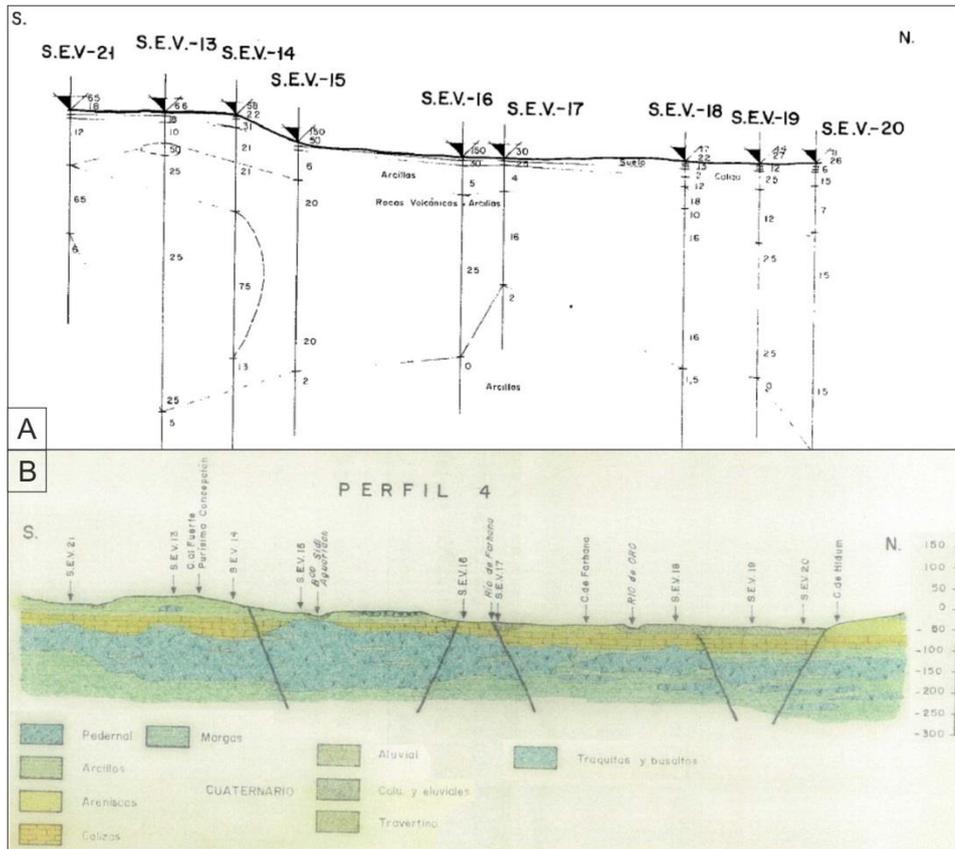
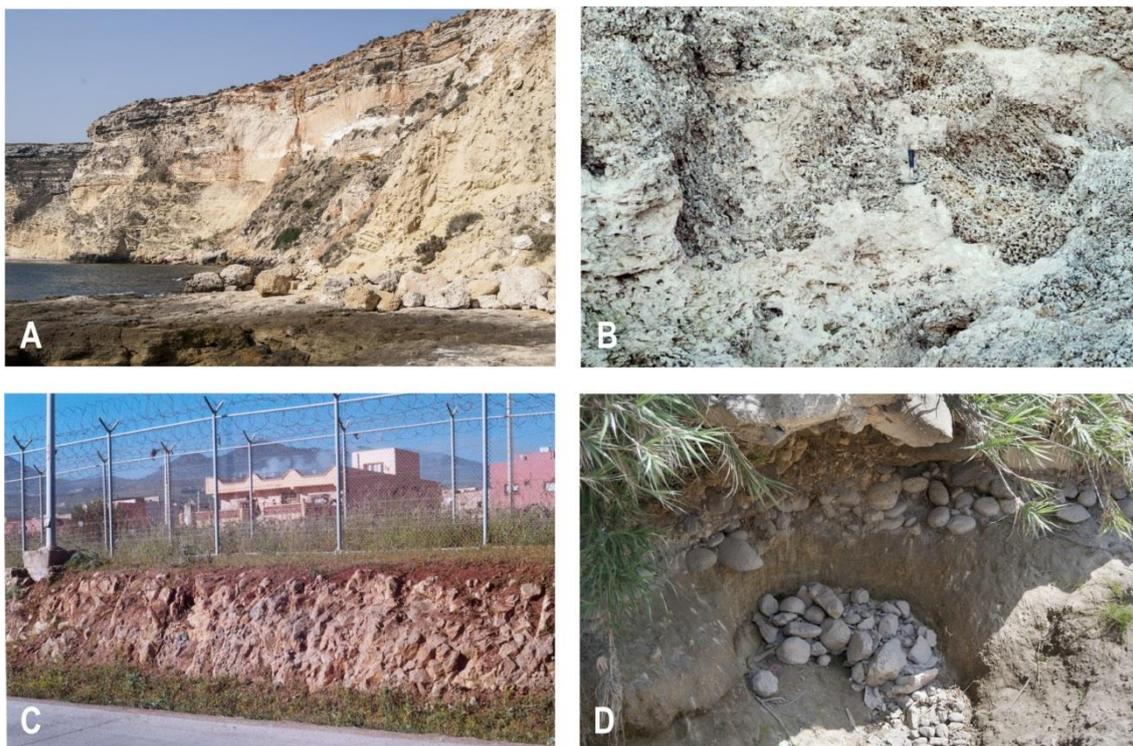


Figura 12. Ejemplo de uno de los perfiles de resistividad (A) y de su interpretación geológica (B) presentados en el informe del IGME, 1974.

#### 4. Reconocimiento de campo y toma de muestras

El mapa geológico de Melilla a escala 1:25.000 ha supuesto una importante mejora en el conocimiento geológico de la región. La adquisición de numerosas muestras de rocas y sedimentos, el levantamiento de series estratigráficas y la realización de una cartografía geológica de gran detalle ha permitido tener un conocimiento de detalle de la geología aflorante en la región.

No obstante, en el marco de este proyecto los geólogos del IGME han realizado un reconocimiento de campo de las diferentes formaciones geológicas presentes en Melilla (Fig. 13). Del mismo modo se ha realizado una visita en territorio marroquí para observar las mismas formaciones geológicas que afloran en territorio español. En esta campaña de campo se adquirió una decena de muestras de rocas de las principales formaciones geológicas. Estas muestras junto con la veintena de muestras adquiridas durante la realización del mapa geológico de Melilla comprenden una colección de rocas que permitirán en posteriores fases del proyecto realizar determinaciones en el laboratorio de parámetros como la densidad, susceptibilidad magnética, porosidad, permeabilidad, etc. necesarias para la modelización gravimétrica o el cálculo de reservas de agua.



*Figura 13: Fotografías de campo de algunas de las formaciones aflorantes en la Ciudad Autónoma de Melilla. A) Vista desde la Punta de Rostrogordo hacia el sur, donde se observa la serie deltaica progradante detrítica. A techo la serie calcarenítica carbonatada (Mioceno superior). B) Calizas arrecifales bajo el faro de Melilla. Calcisiltitas y calcarenitas blancas (de talud arrecifal) entre huecos de las formaciones coralinas. C) Rocas volcánicas terciarias de una colada proveniente del Monte Gurugú. D) Sedimentos aluviales cuaternarios en el Río del Oro.*

## 5. Planificación de futuras campañas de prospección geofísica y de sondeos de investigación geológica - hidrogeológica

Se proponen realizar distintas campañas de geofísica y de realización de sondeos mecánicos cuya viabilidad será analizada con posterioridad, para investigar la geometría y espesor del subsuelo de la Ciudad Autónoma de Melilla. No obstante el diseño final de estas campañas estará condicionado por las limitaciones económicas, de acceso a los lugares de interés y de los datos geológicos que se vayan adquiriendo además de las eventualidades técnicas que puedan surgir (ruido electromagnético, etc.).

### 5.1. Campaña de prospección gravimétrica a realizar en 2015

#### Fundamentos del método

La gravimetría es un método de prospección geofísica que trata de determinar la diferencia entre el valor real de la aceleración de gravedad y el valor teórico de la misma en un punto determinado de la superficie terrestre, como consecuencia de la variación de densidad de los materiales. Esta diferencia se denomina anomalía gravimétrica y su estudio permite determinar, de manera indirecta, la naturaleza y disposición de los materiales del terreno.

Si la Tierra fuera una esfera perfecta, homogénea y no rotara, la atracción en la superficie del planeta sería la misma en cualquier punto. Sin embargo, la tierra tiene un movimiento de rotación, está achatada en los polos y tiene irregularidades laterales de densidad. Por ello, el valor de la gravedad depende de la latitud, la elevación, la topografía, las mareas y los cambios laterales en la densidad de los materiales. Las variaciones no asociadas a rasgos geológicos pueden ser estimadas con el fin de aislar las variaciones debidas exclusivamente a la disposición de las rocas en el subsuelo. Para ello es necesario realizar una serie de correcciones.

1) *Las variaciones temporales* de la gravedad se deben a la deriva instrumental del equipo de medida y a la atracción que ejercen el sol y la luna. Para corregirlas se realiza la denominada Corrección de mareas y se calcula la deriva instrumental del gravímetro.

2) *Las variaciones espaciales*, consecuencia del movimiento y geometría de la Tierra, están condicionadas por los siguientes factores:

2.a) La latitud: El valor de la gravedad aumenta progresivamente desde el Ecuador a los polos debido a la disminución del radio terrestre y de la fuerza centrífuga. El valor teórico de la gravedad a nivel del mar, en función de la latitud sobre el esferoide, se determina mediante la fórmula propuesta por el Sistema de Referencia Geodésico (GRS, 1967).

$$g_{teorica} = 978031,849 (1+0,005278895 \sin^2\phi + 0,000023462 \sin^4 \phi) \text{ (mGal)} \quad (1)$$

( $\phi$  = latitud expresada en grados).

2.b) La altitud y el relieve: La distancia entre el nivel del mar y el punto de medida va a condicionar las siguientes correcciones:

- *Corrección de aire libre (CAL)*, que depende de la cota (h) a la que se encuentre el punto de medida, y utiliza el nivel del mar como nivel de referencia.

$$CAL = + 0,3086 h \text{ (mGal)} \quad (2)$$

(h= altura sobre el nivel del mar)

- *Corrección de Bouguer (CB)*, que elimina la atracción que se produce como consecuencia de la presencia de masas entre la superficie topográfica, considerada plana, y el nivel del mar.

$$CB = - (0,04193 \rho h) \text{ (mGal)} \quad (3)$$

( $\rho$  = densidad media de las rocas medida en  $\text{g/cm}^3$ )

- *Corrección topográfica (CT)*, debida a la influencia de la topografía existente alrededor del punto de medida.

Si se aplican todas las correcciones señaladas a los valores medidos en campo y se resta el valor teórico de la gravedad, se obtiene la Anomalía de Bouguer. Esta anomalía está asociada exclusivamente a los cambios de densidad de los materiales y permite establecer modelos de distribución de cuerpos en función de estos cambios.

$$\Delta_{\text{Bouguer}} = g_{\text{observada}} + (0,3086 h) - (0,04193 \rho h) + CT - g_{\text{teórica}} \text{ (mGal)} \quad (4)$$

### **Campaña y equipos de medida**

Durante este estudio, se ha planificado una campaña gravimétrica con un total de 180 medidas con un espaciado aproximado de 250 metros entre ellas (Fig. 14). El objetivo es mejorar el conocimiento del subsuelo y la profundidad del basamento de la cuenca de Melilla. La medición de la gravedad terrestre en diferentes puntos homogéneamente distribuidos y su posterior modelización 3D permitirá establecer la geometría profunda del substrato.

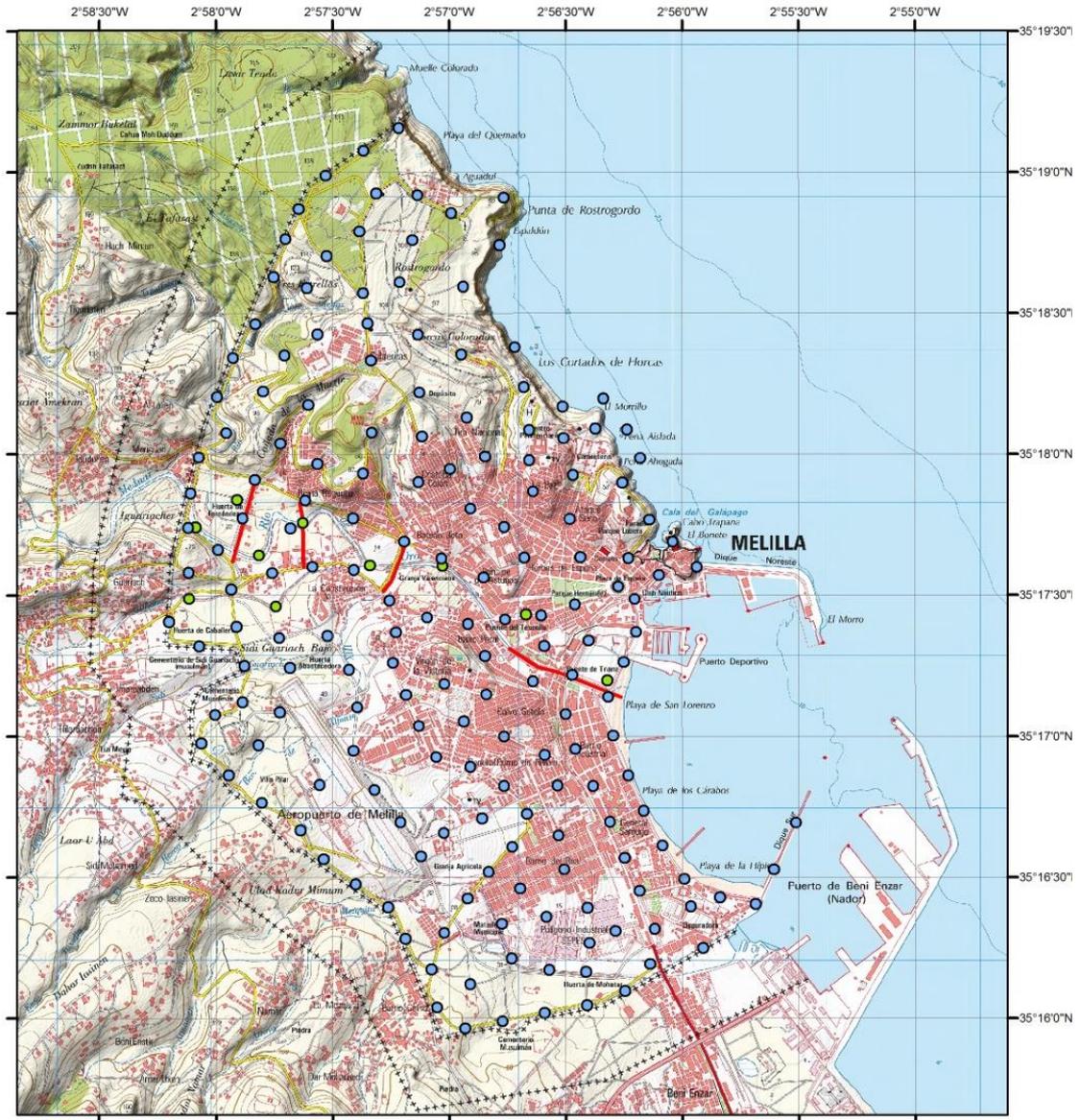


Figura 14: Planificación de futuras campañas de geofísica que se realizarán en función de las necesidades del estudio. En azul, medidas de gravimetría; en verde, sondeos; en rojo, perfiles de tomografía eléctrica.



Figura 15: Equipo de gravimetría. (A) Gravímetro Scintrex Autograv CG-05 sobre trípode; (B) Detalle de la pantalla de adquisición; (C) Realización de una medida gravimétrica sobre trípode.

La obtención de las medidas gravimétricas se realizará con un gravímetro Scintrex Autograv modelo CG-5 (Figura 15), instrumento con una precisión de 0,001 mGal.

Para el posicionamiento preciso de las medidas gravimétricas durante la campaña se utilizará un GPS diferencial GPS Leica 1200 (figura 16). El Sistema de Posicionamiento Global (GPS), es un sistema que permite la localización geográfica exacta en los distintos puntos del planeta. El equipo está compuesto por: un receptor de referencia o estación base que se sitúa sobre un punto de coordenadas conocidas y un receptor móvil que se sitúa sucesivamente en cada una de las estaciones de medida. Mediante antena de radio, el receptor de referencia transmite las correcciones al receptor móvil para la determinación de su posición.



*Figura 16: Equipo GPS Leica 1200 para posicionamiento de las estaciones de medida.*

## **5.2. Campaña de tomografía eléctrica prevista**

La tomografía eléctrica 2D es un método de prospección eléctrica multielectrónico de corriente, continua o alterna, de baja frecuencia con el que se obtienen secciones de las resistividades del subsuelo. Dentro de los métodos eléctrico-resistivos, es una de las técnicas más utilizadas para estudios superficiales de detalle debido a la alta robustez del método y a su intuitiva visualización e interpretación.

Se proponen realizar varios perfiles de tomografía eléctrica en el aluvial del Río del oro con la finalidad de determinar su espesor (perfiles transversales al cauce) y la geometría de la posible intrusión salina del acuífero (perfil costero paralelo al cauce del río). La posición y número de perfiles a realizar (Fig. 14) es preliminar y estará condicionado a la accesibilidad de los sitios de medida y a los resultados proporcionados por las otras técnicas aplicadas. La realización de la tomografía eléctrica se realizará con un tomógrafo Terrameter SAS 4000 con cuatro canales de entrada (Fig. 15). Este equipo permite una resolución de  $1\mu\text{V}$  para 0.5s de tiempo de integración (tiempo durante el cual el detector monitoriza cada una de las masas seleccionadas), tres rangos de medición automática ( $\pm 250\text{mV}$ ,  $\pm 10\text{V}$  y  $\pm 400\text{V}$ ), precisión y exactitud mayores del 1% en todo el rango de temperaturas, y un almacenamiento de más de un millón de puntos de medida en la memoria interna.

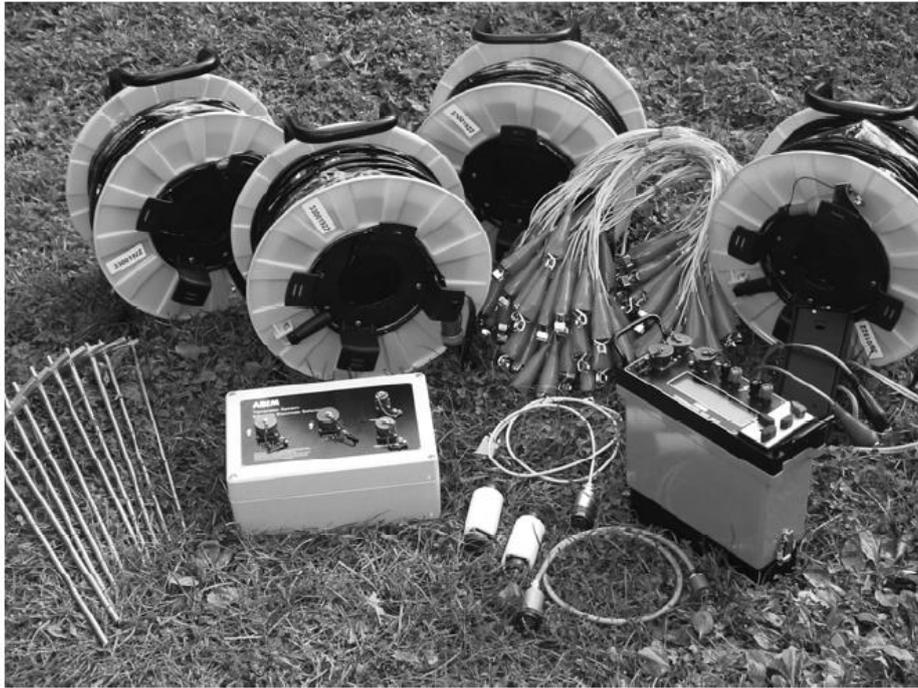


Figura 17. Distintos componentes del equipo utilizado para la realización de los tres perfiles de tomografía (Fuente: Geotomo Software, 2006).

Los componentes del equipo utilizado son los siguientes (Fig. 17):

- a. Una unidad central formada por una microcomputadora, una caja de conexiones, una batería de 12V para la alimentación y los correspondientes cables de conexión de la microcomputadora con la batería y la caja de conexiones.
- b. Cuatro bobinas de 100m de cable cada una con conexiones para los electrodos cada 5m.
- c. 80 piquetas de acero inoxidable utilizadas como electrodos.
- d. 80 conectores utilizados para conectar las piquetas con las bobinas de cable.
- e. 2 conectores utilizados para conectar las bobinas de cable de los extremos con las bobinas centrales.

En la campaña de medidas que se realizará en el aluvial del río del Oro, se utilizará un dispositivo "4-channel multiple gradient" (Fig. 18). Este protocolo realiza las medidas en dos ciclos:

- a. Un ciclo largo, denominado GRAD4LX8, en el que se utilizan los electrodos de todas las bobinas de cable. Con ello se pretende obtener datos a la máxima profundidad posible, pese a la pérdida de resolución.
- b. Un ciclo corto, llamado GRAD4S8, en el que las medidas se llevan a cabo utilizando las bobinas centrales del dispositivo. Este segundo ciclo permite una mayor resolución en los primeros metros del subsuelo.

En la figura 18 se puede apreciar la densidad, distribución y número de datos obtenidos en una medición empleando el dispositivo mencionado, además de la configuración del equipo durante la toma de datos.

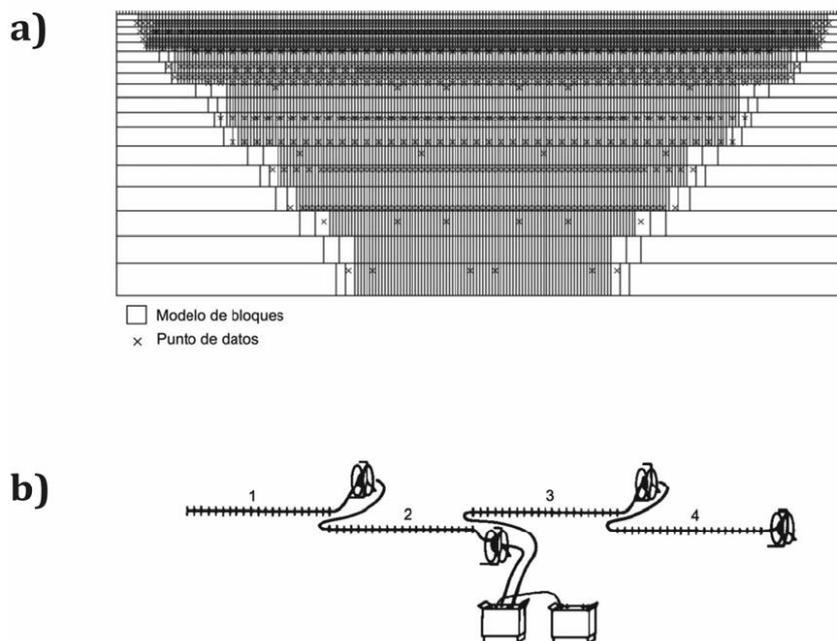
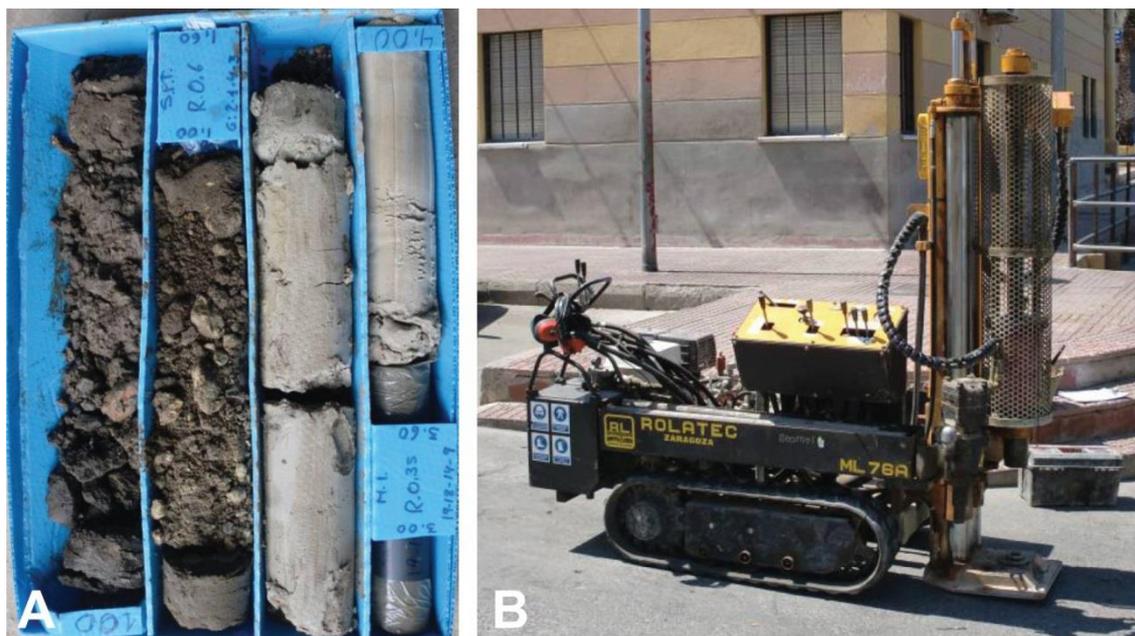


Figura 18: Protocolo de medida de tomografía eléctrica. a) Cobertura de datos de los protocolos GRAD4LX8 y GRAD4S8 para el despliegue a lo largo de tres estaciones de medida completas. b) Dispositivo “4-Channel multiple gradient” en el que se utilizan cuatro bobinas de cable para el ciclo largo de medida (GRAD4LX8) y dos para el ciclo corto (GRAD4S8). (Fuente: Geotomo Software, 2006).

### 5.3. Análisis sobre la viabilidad de realizar una campaña de sondeos para la investigación somera de formaciones.

Uno de los objetivos de los trabajos que se están llevando a cabo es el estudio del acuífero aluvial del Río de Oro que en la actualidad tiene extracciones significativas de agua para abastecimiento a la Ciudad Autónoma.

Se analizará la posibilidad de realizar para el año 2016 un total de 11 sondeos a rotación con obtención de testigo continuo con un diámetro de perforación de 101 mm (figura 19). El análisis de los testigos permitirá describir la columna litológica atravesada. Los sondeos estarán ubicados en los sedimentos aluviales del Río del Oro y sus principales afluentes (figura 14). Los sondeos serán de pequeña profundidad para investigar la formación aluvial cuaternaria además de las formaciones suprayacentes. Estos sondeos irían equipados con una tubería de PVC piezométrica y arquetas para su utilización como una futura red de control del acuífero aluvial caso de tener nivel de agua.



*Figura 19. A) Caja de testigos obtenida mediante perforación a rotación. B) Perforadora a rotación para sondeos de pequeña profundidad y diámetro.*

Durante la campaña de perforación el IGME realizaría en los sondeos perforados registros de diagrfías de tipo Rayos Gamma, conductividad y temperatura del agua y medidor de flujo con el equipo de diagrfías del IGME (figura 20). El registro de Rayos Gama mide la presencia de radioactividad en los materiales perforados y permite tener un control en el contenido de arcillas y permite determinar límites litológicos. El registro de conductividad y temperatura del agua permite determinar la presencia de flujos verticales y la salinidad del agua. Por último el medidor de flujo o “flowmeter” determina la presencia de flujos verticales en ausencia de bombeo y cuantificar la entrada de agua al sondeo en presencia de bombeos.

Otra posibilidad es realizar en los sondeos perforados ensayos slug. Los ensayos slug o también denominados de valvuleo o cuchareo consisten en evaluación “in situ” de los parámetros hidráulicos de un acuífero. Se realizan provocando una rápida perturbación del nivel piezométrico y midiendo la posterior recuperación del nivel respecto a sus condiciones previas. La perturbación del nivel se puede realizar mediante la incorporación súbita de un cuerpo sólido bajo el n.p. La unidad móvil del IGME dispone del equipo necesario para realizar este tipo de ensayo.



*Figura 20: Unidad móvil del IGME para la adquisición de diagráfias en sondeos y ensayos slug.*

## 6. Proyecto SIG

Para la gestión de toda la información generada en este proyecto se está utilizando un sistema de información geográfica. En concreto se utiliza el programa ArcGis. Este programa está orientado a la gestión y explotación de la información espacial. Las numerosas capas de información generadas (sondeos, cartografía topográfica, cartografía geológica, muestras de campo, campañas geofísicas, etc.) es gestionada con este programa. Toda la información georeferenciada se integra en el modelo geológico 3D del subsuelo que está en la actualidad en construcción. Las capas de información utilizadas en este proyecto son las siguientes:

**Modelo Digital del Terreno:** Modelo digital del terreno con paso de malla de 5 m, obtenido por estereocorrelación automática de vuelos fotogramétricos del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) con resolución de 25 a 50cm/píxel, revisada e interpolada con líneas de ruptura. Fuente: Instituto Geográfico Nacional.

**Ortofotografía:** Mosaicos de ortofotos del PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea) en formato ECW. Fuente: Instituto Geográfico Nacional.

**Mapa topográfico 1:5000:** Plano de la Ciudad Autónoma de Melilla a escala 1:5000. Fuente: Consejería de Medio Ambiente de la Ciudad Autónoma de Melilla.

**Mapa topográfico 1:25.000:** Archivo raster de la última actualización del Mapa Topográfico Nacional a escala 1:25.000, generado por medio de una rasterización digital (conversión vector a raster) con incorporación de sombreado y sin exteriores. Fuente: Instituto Geográfico Nacional.

**Sondeos de investigación:** Shapefile de puntos con campos que describen las características de los sondeos a partir de la recopilación bibliográfica realizada en este proyecto. Fuente: IGME.

**Inventario de puntos de agua:** Shapefile de inventario realizado para este proyecto en el que se indican las principales características de los puntos de agua. Fuente: IGME.

**Capas de información geofísica:** Diferentes tipo de capas de información con la posición de las campañas geofísicas previas, realizadas o diseñadas para este proyecto (SEVs, gravimetría, magnetometría, tomografía eléctrica). Fuente: IGME.

**Mapas y cortes geológicos:** Mapa geológico de Melilla a escala 1:25.000 del Plan Magna. El mapa consiste en varios shapefiles. También existen shapefiles de polilíneas que indican la posición de los cortes geológicos existentes y los nuevos cortes confeccionados para este proyecto. Fuente: IGME.

**Muestras:** Shapefile de puntos relacionados con la posición de las muestras obtenidas en campo. Fuente: IGME.

Al finalizar el proyecto se proporcionará a la Consejería de Medio Ambiente de la Ciudad Autónoma de Melilla el proyecto SIG adecuadamente organizado que incluya toda la información georeferenciada disponible. Este proyecto SIG es de gran interés para la gestión y

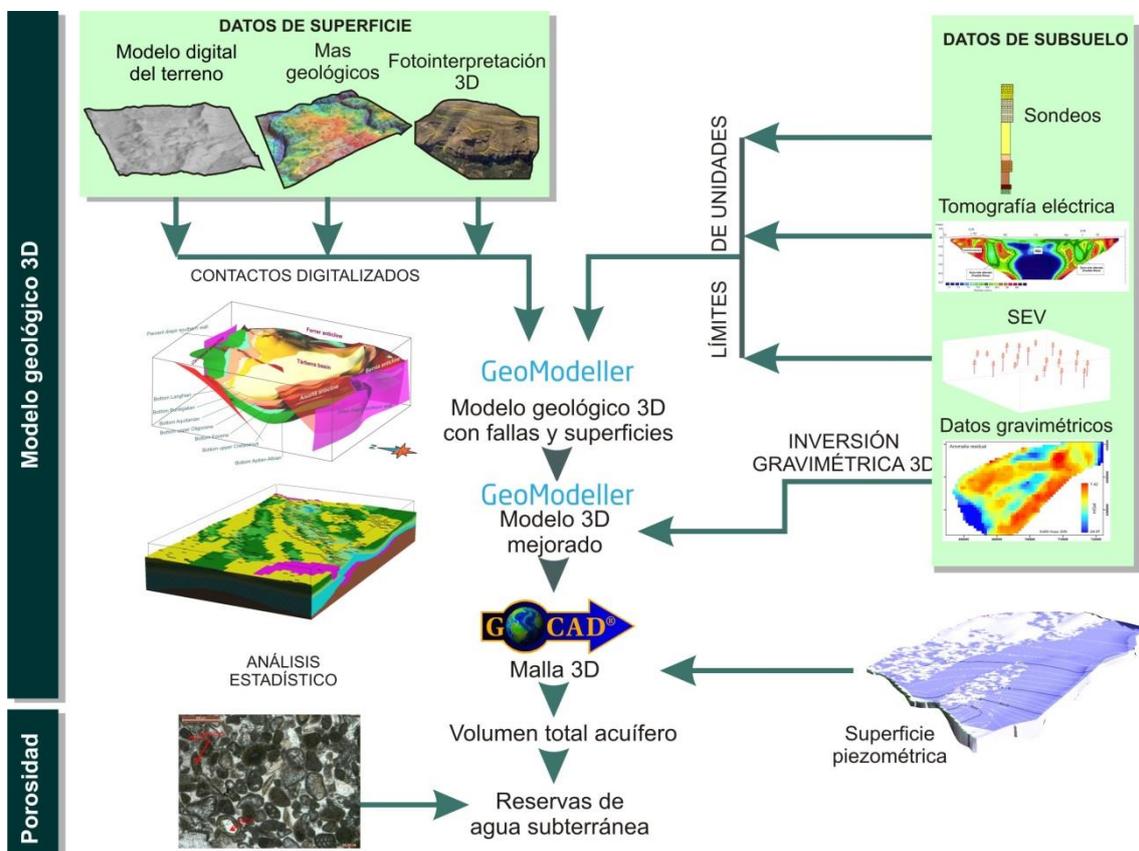
planificación del territorio y podrá ser utilizados en el futuro en otros campos de interés para la gestión del territorio de Melilla (medio ambiente, planificación urbanística, etc.).

## 7. Modelo geológico 3D de la Ciudad Autónoma de Melilla

### 7.1. Metodología

Un modelo geológico 3D es una representación en una computadora de una porción de la corteza terrestre basado en observaciones geológicas en la superficie, en sondeos y en observaciones geofísicas. Los modelos geológicos 3D son cada vez más utilizados para la gestión de recursos naturales como el agua subterránea de los acuíferos. Los modelos geológicos 3D integran de una forma compatible toda la información disponible tanto de superficie como del subsuelo.

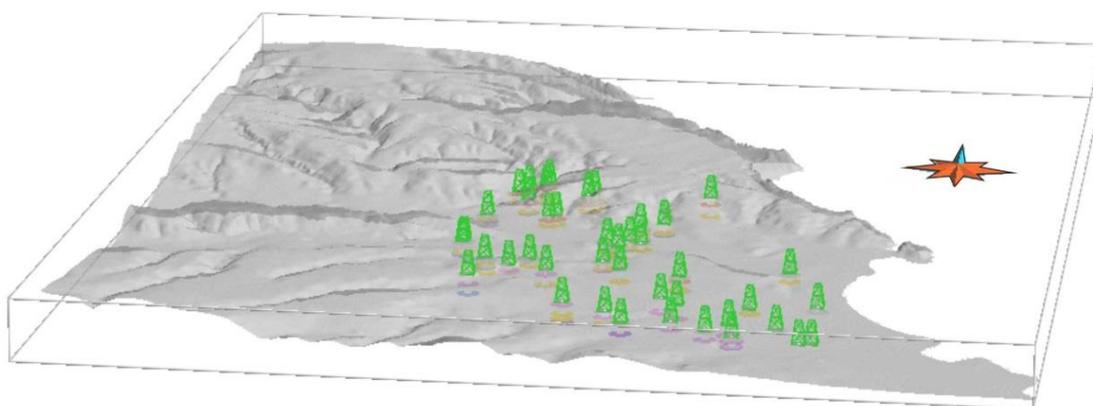
En el proceso de elaboración del modelo geológico 3D se están utilizando principalmente los programas *3D GeoModeller* y *Gocad*. Estos programas permiten integrar de manera fácil y gráfica todos los datos existentes en un determinado sector: información cartográfica y estructural de detalle, datos geofísicos (gravimetría; magnetometría; SEVs; Tomografías eléctricas) e información litológica procedente de los sondeos. También disponen de módulos de inversión geofísica que permiten interpretar datos de campos potenciales como la gravimetría o la magnetometría. En la figura 21 se muestra la metodología que se está utilizando para construir el modelo geológico 3D de Melilla.



*Figura 21: Esquema metodológico utilizado para la construcción de un modelo geológico 3D del subsuelo de Melilla.*

## **7.2. Avance del modelo 3D de Melilla**

El modelo geológico 3D de Melilla se realizará para el sector comprendido entre las coordenadas de latitud 3910000-3901205 (en metros) y longitud 508500-500505 (en metros), lo que supone una extensión de 8.8 x 8 km. Los datos que se integrarán serán aquellos proporcionados por los estudios geológicos (cartografía MAGNA y observaciones de campo propias), geofísicos (SEVs, gravimetría, tomografía) y sondeos (Fig. 22). Las unidades estratigráficas que se diferenciarán son: rocas paleozoicas del basamento metamórfico (no afloran), calcarenitas Tortonenses (no afloran), margas grises del Messiniense (no afloran; UC2), rocas volcánicas (UC1), tobas volcánicas (UC3), Unidad Carbonática Inferior (engloba UC6 y UC7), Unidad detrítica Intermedia (UC8), Unidad Carbonática Superior (engloba UC9, UC10, UC11 y UC12), los sedimentos aluviales (engloba UC16 y UC17).



*Figura 22. Vista 3D de la topografía de Melilla y de los datos de sondeos disponibles (en verde).*

## 8. Referencias

- Adaro, L. y Valle, A. Del (1910). "Nota acerca de la constitución geológica de Guelaya". Ingeniería, 119.
- Anahnah, F., 2008. Anomalías gravimétricas y magnéticas asociadas a la estructura cortical de las cuencas neógenas litorales del Rif oriental. Tesis de Master. Universidad de Granada.
- Anahnah, F., Galindo-Zaldívar, J., Azzouz, O., RUANO, P., Chalouan, A. Pedrera, A., Ruiz-Constán, A. y Bouregba, N. (2009). The Nador dipole: one of the main magnetic anomalies of the NE Rif. Trabajos de Geología, Universidad de Oviedo, 29: 84-89.
- André, J.P.; Benmoussa, A.; Cornée, J.J.; Muller, J.; Saint Martin, J.P. y Bessedik, M. (1993). "Les corps carbonatés bioclastiques progradants du Messinien d'Afrique du Nord". En: Carbonates Intertropicaux, Réunions Spécialisée de la Societé géologique de France. Paris, 3-4, Resumés: 8.
- Andrieux, J., (1971): La structure du Rif Central. Etude des relations entre la tectonique de compression et les nappes de glissement dans un troncon de la chaine alpine. Ed. Notes et Mem. Serv. Geol. Maroc, 155 pp.
- Asebriy, L. (1984): Etude géologique de la zone subrifaine: nouvelle interprétation paléogéographique et structurale du Rif externe; exemple du Moyen Ouerrha, Maroc. Thèse 3ème cycle, University of Rabat, 187 p.
- Azdimoussa, A., Bourgois, J., Poupeau, G. y Montigny, R. (1998) : Histoire thermique du massif de Ketama (Maroc): sa place en Afrique du Nord et dans les Cordilleres Betiques, C. R. Acad. Sci., 326: 847–853.
- Bellon, H. (1976) : Séries magmatiques néogènes et quaternaires du pourtour de la Méditerranée occidentale, comparées dans leur cadre géochronométrique: implications géodynamiques. Tesis Univ. Paris Sud, Orsay, 363 p.
- Ben Yaïch, A., (1991) : Evolution tectono-sédimentaire du Rif externe centroccidental (regions de M'Sila et Ouezzane, Maroc): la marge africaine du Jurassique au Crétacé; les bassins néogènes d'avant-fose. Thèse Doct. Etat, Univ. Pau et Pays de l'Adour, 308p.
- Benmoussa, A.; El Hajjaji, KH; Cornée, J.J.; Saint Martin, J.P. y Muller, J. (1994). "Les unités biosédimentaires de la plate-forme carbonatée messinienne de Melilla (NE Maroc)". En: Interim-Colloquium of the Regional Committee on Mediterranean Neogene Stratigraphy. Marseille, Abstracts, 5.
- Charlot, R.; Choubert, G.; Faure-Muret, A.; Hottinger, L.; Marçais, J. y Tisserand, D. (1967). "Note au sujet de l'âge isotopique de la limite Miocène-Pliocène au Maroc". C.R. Acad. Sci. Paris, 264 (D), 222-224.
- Choubert, G.; Charlot, R.; Faure-Muret, A.; Hottinger, L.; Marçais, J.; Tisserand, D. y Vidal, PH. (1968). "Note préliminaire sur le volcanisme messinien-pontien au Maroc". C.R. Acad. Sci. Paris, 266 D, 197-199.
- Choubert, G.; Faure-Muret, A.; Hottinger, L. y Lecointre, G. (1966). "Le Néogène du bassin de Melilla (Maroc septentrional) et sa signification pour définir la limite mio-pliocène". Proc.Cong. Int. Neogene Med. 3 se., Berne, 238-249.
- Concha, S. De La (1958). "Informe sobre el alumbramiento de aguas subterráneas en la Zona de Soberanía de Melilla". Notas y Comunicaciones del I.G.M.E., 52 (4 trimestre), pág. 17.

- Cornée, J.J. ; Guieu, G.; Muller, J. y Saint Martin, J.P. (1994). "Mediterranean Messinian carbonate platforms: some controlling factors". *Géologie Méditerranéenne*, 21 (3-4), 45-48.
- Cunningham, K. J.; Farr, M. R. y Rakic-El Bied, K. (1994). "Magnetostratigraphy dating of an Upper Miocene shallow-marine and sedimentary succession in northeastern Morocco". *Earth and Planetary Science Letters*, 127, 77-93.
- DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F. y Stein, S. (1994): Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motion. *Geophysical Research Letters*, 21(20): 2191-2194.
- El Azzab, D., Galdeano, A., Feinberg, H. y Michard, A. (1997): Prolongement en profondeur d'une écaïlle ultrabasique allochtone: traitement des données aéromagnétiques et modélisation 3D des péridotites des Béni-Malek (Rif, Maroc). *Bulletin de la Société Géologique de France*, 168: 15-23.
- El Bakkali, S.; Bourdier, J.L. ET Gourgaud, A. (1998). "Caractérisation et stratigraphie de dépôts volcanoclastiques marqueurs dans le Miocène supérieur du bassin de Melilla-bas Kert (Rif oriental, Maroc)". *C. R. Acad. Sci. Paris*, 327, 93-100.
- Ennadifi, Y. (1974) : Etude géologique du Prérif oriental et son avant-pays (région comprise entre Mezguitem, Ain Zora et Tizroutine). *Notes & Mém. Serv. géol. Maroc*, 253, 66 p.
- Fallot, P. (1937). "Essai sur la géologie du Rif septentrional". *Notes et Mem. Serv. géol. Maroc*, 40.
- Fallot, P. Y Marín, A. (1939). "La Cordillera del Rif (Tomos I y II)". *Memorias del I.G.M.E.*, XLIII.
- Fernández Navarro, L. (1908). "Datos geológicos acerca de las Posesiones Españolas del Norte de África". *Soc. Española de Hist. Nat., Mem.*, 5, 259-340.
- Fernández Navarro, L. (1909). "La península del Cabo de Tres Forcas (Yebel Guork)". *Soc. Española de Hist. Nat.*, 9, 421-436.
- Fernández Navarro, L. (1911). "Estudios geológicos en el Rif Oriental". *Soc. Española de Hist. Nat., Mem.*, 8, 5-60.
- FRASA, (1990). Sondeo profundo para captación de aguas subterráneas.
- FRASA, (1988). Informe de Evaluación de Recursos Hidráulicos y propuestas de actuaciones para el abastecimiento de Agua de Melilla.
- Frizon de Lamotte, D. (1982) : Contribution à l'étude de l'évolution structurale du Rif oriental. *Notes Mém. Serv. Géol. (Morocco)*, 314 : 239-309.
- Gómez-Gras, D. y Parcerisa, D. (2004). Sedimentología del Mioceno de la Ciudad Autónoma de Melilla. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 17 (3-4), 169-185.
- Green, C. M., Barritt, S. D. Fairhead J. D. y Misener D. J., (1992). The African magnetic mapping project. 54th EAEG Meeting.
- Hernandez, J. (1983): Le volcanisme miocène du Rif oriental (Maroc). *Géologie, pétrologie et minéralogie d'une province shoshonitique*. Ph. Doctoral Thesis, University Paul et Marie Curie, Paris VI, 592 p.
- Hernandez, J. y Bellon, H. (1985). "Chronologie K- Ar du volcanisme miocène du Rif Oriental (Maroc): implications tectoniques et magmatologiques". *Rev. Géol. Dyn. et Géog. Phys.*, 26 (2), 85-94.
- IGME, (1964). Informe sobre los sondeos realizados por el Instituto Nacional de Colonización en el territorio de soberanía de Melilla.
- ITGE, (1985). Síntesis hidrogeológica de Ceuta y Melilla. Trabajos hidrogeológicos en los planes de gestión, planificación y vigilancia de acuíferos y estudios sobre la contaminación de los acuíferos (Programa 236 de fomento minero). ITGE, Madrid.
- Leblanc, D., (1979) : Etude géologique du Rif externe oriental au nord de Taza (Maroc), *Notes Mem. Serv. Geol. Maroc*, 281: 1-159.

- Maury, R.C.; Fourcade, S.; Coulon, C.; El Azzouzi, M.; Bellon, H.; Coutelle, A.; Ouabadi, A.; Semroud, B.; Megartsi, M.; Cotten, J.; Belanteur, O.; Louni-Hacini, A.; Piqué, A.; Capdevila, R.; Hernandez, J. y Réhault, J. P. (2000). "Post-collisional Neogene magmatism of the Mediterranean Maghreb margin: a consequence of slab breakoff". C.R. Acad. Sc. Paris, série IIa, 331, 159-173.
- Münch, P.; Roger, S.; Cornée, J.J.; Saint Martin, J.P.; Féraud, G. y Benmoussa, A. (2001). "Restriction des communications entre l'Atlantique et la Méditerranée au Messinien: apport de la téphrochronologie dans la plate-forme carbonatée et le bassin de Melilla-Nador (Rif Nord-oriental, Maroc)". C.R. Acad. Sc. Paris, Sciences de la Terre et des planètes, 332, 569-576.
- Pineda Velasco, A. et al., 2013. Mapa geológico de Melilla e Islas Chafarinas a escala 1:25.000. Madrid: IGME. Instituto Geológico y Minero. (Mapa Geológico de España, MAGNA, hoja 1111).
- Rampnoux, J.P.; Angelier, J.; Coletta, B.; Fudral, S.; Guillemin, M. y Pierre, G. (1979). "Sur l'évolution néotectonique du Maroc septentrional". Géologie Méditerranéenne, 5, 439-464.
- Roger, S.; Münch, P.; Cornée, J.J.; Saint Martin, J.P.; Féraud, G.; Pestrea, S.; Conesa, A. y Benmoussa, A. (2000). "40Ar/39Ar dating of the pre-evaporitic Messinian marine sequences of the Melilla basin (Morocco): a proposal for some biosedimentary events as isochrones around the Alboran sea". Earth and Planetary Sc. Letters, 179, 101-113.
- Rouchy, J.M. (1982). "La génèse des évaporites messiniennes de Méditerranée". Mémoires du Muséum national d' Histoire naturelle de Paris (C), 50, 267 p gs.
- Saint Martin, J. P. (1990). "Les formations récifales coralliennes du Miocène supérieur d'Algérie et du Maroc". Mem. Mus. Nat. d' Hist. Nat., 56, 1-351.
- SGOP, (1975). Informe sobre la ejecución de pozos y piez metros en Melilla.
- Suter, G. (1980) : Carte géologique du Rif, 1/500.000, Notes Mém. Serv. Geol. Maroc 245a y b.
- Van Den Bosch, J.W.M. (1971): Carte Gravimétrique du Maroc, au 1:500000. Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc, 234.
- Van Den Bosch, J.W.M. (1981): Memoire explicative de la carte gravimetrique du Maroc (province du Nord) au 1:500000. Notes et Memoires du Service Geologique du Maroc, 219 p.