

CONFERENCIA BOLÍVAR

Geología de la Unidad Salina de la Cuenca de Madrid. Recursos minerales, riesgos geológicos y mineralogénesis salina

Geology of the Saline Unit of the Madrid Basin. Mineral resources, geological hazards and salt mineralogenesis

Salvador Ordóñez

*Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente
Universidad de Alicante
salordelg@gmail.com*

4ª CONFERENCIA “IGNACIO BOLÍVAR” pronunciada el 22 de abril de 2021, de manera telemática. Esta actividad contó con la colaboración del Ilustre Colegio Oficial de Geólogos.

Palabras clave: Unidad Salina, Cuenca de Madrid, paleogeografía-lacustre, thenardita, glauberita, magnesita, salmueras medicinales de sulfato sódico.

Key words: Saline Unity, Madrid Basin, Lake Paleogeography, thenardite, glauberite, magnesite, sodium sulphate medicinal brines.

RESUMEN

La Unidad Salina de la Cuenca Cenozoica de Madrid, se conoce de forma indirecta desde la Prehistoria por sus manantiales salinos, objeto de aprovechamiento, para la obtención de sales y usos medicinales de sus salmueras. A principios del s. XX, se continuaron antiguas labores de investigación, para la extracción masiva de sulfato sódico para la industria química.

Los reconocimientos geológicos, y más fundamentalmente las técnicas de análisis de cuencas a partir de sondeos, el estudio de perfiles geofísicos, y las técnicas modernas mineralógicas, en especial la difracción de rayos X, han permitido definir con precisión la naturaleza petrográfica y mineralógica de la Unidad y mejorar el conocimiento de su posición en el marco estructural de la Cuenca de Madrid, así como su comparación con las sales de otras cuencas cenozoicas ibéricas.

Los datos sedimentológicos disponibles de las cuencas actuales y los diagramas de equilibrio del sistema $\text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}^{2+} - \text{Na}^{1+}$ apoyan la hipótesis del origen por lixiviación de antiguos depósitos de evaporitas, y su deposición en un sistema lacustre abierto con un exceso de iones de calcio durante el periodo de precipitación de grandes espesores de sedimentos ricos en glauberita.

La meteorización de la Unidad genera un residuo insoluble rico en yeso, con espesores superiores a 3-4 decenas de metros, y con texturas pseudomórficas de glauberita, anhidrita e incluso de halita, que muestran claramente el carácter secundario de esta formación secundaria de yesos. La génesis de estos “yesos secundarios” de la Unidad Salina, provoca colapsos que se rellenan por los materiales suprayacentes, y que pueden afectar a las cimentaciones e infraestructuras (túneles y galerías de servicios).

La meteorización puede generar zonas enriquecidas en mirabilita, que coexisten con salmueras sulfatadas sódicas que se manifiestan en un sinfín de eflorescencias, y manantiales salinos, cuyo aspecto varía estacionalmente por efecto de la influencia de la temperatura, sobre el grado de saturación de las salmueras en sulfato sódico.

ABSTRACT

The Saline Unit of the Cenozoic Basin of Madrid recognized since prehistoric times for its saline springs, which were object of exploitation to obtain salts and to use the medicinal properties of brines. At the beginning of the 20th century, the old mine works was continued, aimed at mining developments for the massive extraction of sodium sulphate for the chemical industry.

The petrographic and mineralogical distribution and position of Saline Unit through the basin supported on geological and geophysical surveys, and also basin analysis and especially X-ray diffraction salts mineralogy. The distribution across the basin let us define the petrographic and mineralogical nature of the Unit and improve knowledge of its position in the structural framework of the Cenozoic Madrid Basin, and its comparison with salts from other Iberian Cenozoic basins as Ebro, Calatayud, Cerezo de Rio Tirón...

The available sedimentological data from present-day basins and the equilibrium diagrams of the SO_4^{2-} - Ca^{2+} - Na^+ system, supported the hypothesis of leaching of ancient evaporite deposits, an open lake system with a surplus of calcium ions over the course of the precipitation of large thicknesses of glauberite rich sediments.

The weathering of the Unit generates an insoluble residue rich in gypsum, with thicknesses of more than 3-4 tens of metres, and with pseudomorphic textures of glauberite, anhydrite... and even halite, which clearly show the secondary character of this secondary gypsum formation.

The genesis of these “secondary gypsum layers” of the Saline Unit causes deformations in certain stratified levels, and produced locally sink holes filled by the overlying materials. These deformations may affect foundations and infrastructures (tunnels, service galleries, etc.).

Weathering can generate areas enriched in mirabilite, while coexisting with sodium sulphate brines that manifest themselves in many and seasonally varied efflorescence types, and saline springs. Their appearance varies seasonally due to the influence of temperature on the degree of saturation of the brines in sodium sulphate.

I. AGRADECIMIENTO E INTRODUCCIÓN

Habiéndome encargado por la J.G de la Real Sociedad Española de Historia Natural, en el año 2020, dictar la IV Conferencia Bolívar, yo propuse como tema: “Geología de Unidad Salina de la Cuenca de Madrid”. La pandemia que nos asola desde los primeros meses del año 2020, ha obligado a posponer a este año 2021, la conferencia encargada, y este año coincide con el sesquicentenario de la creación de la Sociedad, sean mis primeras palabras un justo tributo a D. Ignacio Bolívar, (1850, Madrid – 1944, México). Fundador y Presidente Honorífico, desde 1920, de la misma. En relación con la Sociedad y el tema de esta conferencia, resulta curioso señalar que en los *Anales* de 1873, se cita un nuevo mineral Ciempozuelita (ARETIO Y LARRINAGA, 1873), en un socavón abandonado de la Mina Consuelo en el término de Ciempozuelos (Madrid), que se describe como una especie mineral nueva, sulfato cálcico-sódico, semejante a la glauberita, pero con una proporción doble de calcio que este mineral. CALDERÓN (1910: 119), en *Los minerales de España*, señala que este mineral no es sino, “una mezcla de glauberita y thenardita, cuyas dos especies se han descrito en la expresada mina”.

La Unidad Salina siempre ha estado presente en las actividades industriales de la zona de Madrid y su área de influencia, las fuentes de aguas purgantes, las sales y las salinas de Espartinas, Belinchón, Carcaballana... así como las minas de sulfatos de los valles del Jarama y Tajo (GARCÍA DEL CURA, 2019). Se ha constatado la existencia de yacimientos arqueológicos que acreditan que desde el Neolítico, han sido aprovechadas estas sales y salmueras, mediante la técnica de briquetaje. Así mismo un discípulo de Linneo, el botánico Pehr Löfving (1729-1756) visitó Aranjuez, y las salinas de Espartinas, en el verano de 1753, estudiando su flora, visitando los cerros del Butarrón (Ciempozuelos) donde recogió una gran cantidad de plantas halófilas, sus trabajos fueron recogidos por Linneo, como se mostró en la Exposición “Pehr Löfving (1729-1756)” realizada en noviembre de 2018 en Ciempozuelos (Madrid), con motivo del II Congreso Internacional sobre la explotación histórica de la sal: investigación y puesta en valor.

2. LA UNIDAD SALINA, HOY

La presencia de sales, da nombre a la Unidad Salina de la Cuenca de Madrid, la investigación e interpretación geológica sigue activa (CAÑAVÉRAS *et al.* 2020). Aunque en los últimos años, la Unidad Salina ha sido objeto de interés por su impacto sobre las grandes infraestructuras del área metropolitana de Madrid, que se han extendido sobre esta Unidad dando lugar a un sinnúmero de problemas geotécnicos, como el del túnel de Regajal (Salobral de Ocaña), (MENÉNDEZ PIDAL *et al.* 2021) y la línea 7 del FC Metropolitano, en la zona de San Fernando de Henares, que aún se describen en la prensa al día de hoy; el levantamiento de terraplenes de la línea de alta velocidad en la zona de Nueva Seseña (Toledo); sin olvidar los problemas que aparecieron en los años de la década de 1980 en la construcción de los mercados centrales de Madrid.

Por su parte la empresa SAMCA extrae anualmente, 212 kt de sulfato sódico, en la Mina El Catellar, Villarrubia de Santiago (provincia de Toledo). Y la empresa SULQUISA,



Figura 1. Vista de la planta de Minera Santa Marta, en primer término, contigua al Río Tajo. Las líneas dan una idea de la galería de extracción y labores mineras. Se señala el encajado arroyo del Barantolín, que preserva los minerales salinos de la disolución por las aguas subterráneas.

fundada en 1978, en el término de Villacañeros (provincia de Madrid), extrae 302 kt de sulfato sódico, por disolución sobre capa, mediante la excavación de estanques, según el *Panorama Minero 2017* (IGME, 2017). Son importantes desde el s. XIX, las arcillas ilíticas de la Unidad Salina, que se explotan en Alcalá de Henares, La Sagra...

La Mina de El Castellar tiene una larga historia, los datos antiguos más fidedignos proceden de YEGROS (1852 y 1853). Según Yegros:

Después de un largo período de abandono, parece que un alemán llamado Barón de Karwinsky, Wilhelm Friedrich von Karwinsky von Karwin (1780-1855), estableció a fines del siglo XVIII, un socavón, en la falda occidental del cerro con objeto de reconocer los minados antiguos que tenían su entrada por el lado del Norte, o sea en la misma orilla izquierda del Tajo.

En 1808, Alexander Brongniart, identificó, en muestras recogidas en la Mina de El Castellar por A. M. C. Dumeril, un nuevo mineral que denominó glauberita. En 1828, MIÑANO señala la presencia de una mina de sal gema. A partir de 1947 se empieza la explotación del sulfato sódico, tras diversos fallos judiciales, véase FÁBREGA, 2020. Las minas las explotaba entonces la Sociedad Anónima Compañía Española de Thenardita. En las salinas de Carcaballana, se extraía thenardita desde 1852 hasta 1968 por Unión Salinera de España S.A. (USESA). En la segunda mitad del año 1963 (*Estadística Minera de 1964*) se investiga mediante sondeos, el yacimiento de El Castellar. A partir de estos sondeos, se definen tres niveles salinos, de techo a muro eran: a/ thenardita-glauberita (que se explota); b/ thenardita con sal común y glauberita, y c/ nivel de sal común con algo de glauberita... Según el informe al que nos referimos, el sulfato sódico desaparece lateralmente ante la presencia de la marga. La potencia media explotable puede considerarse que es de 4 metros; y las reservas probadas, 12 Mt de sulfato sódico.

En el año 1967 la empresa Aprovechamientos Salineros S.A., desarrolla un proyecto de modernización del Grupo minero del Castellar, y aparece USESA, como explotadora de la Mina de El Castellar. En 1986 F.M.C. Corp., anuncia que Foret S.A. compra la mina y

planta de sulfato sódico de U.S.E.S.A. En 2008 Foret S.A. vende la planta e instalaciones a Minera Santa Marta S.A., que en la actualidad explota el yacimiento.

3. LA UNIDAD SALINA EN EL S. XVIII Y XIX

En el *Ensayo sobre las aguas medicinales de Aranjuez*, GÁMEZ (1771) indica que fueron descubiertas por J. Belilla, farmacéutico de la Real Academia Médica de Madrid, que estudió las concreciones salinas de los manantiales, indicando los posibles usos medicinales de estas aguas en el tratamiento de enfermedades crónicas. El origen de la salinidad de las aguas, así como sus usos medicinales fueron recogidos por BOWLES, (1782: 507), que afirma que:

Las aguas del Tajo, cuando pasa por las colinas..., disuelve y arrastra las diferentes sales que la hacen mala para beber, guisar y lavar en Aranjuez; pero todas estas materias salinas desaparecen enteramente más abaxo en Toledo...

También afirma que:

En el lugar de Vacía-Madrid, a tres leguas de esta Villa, hay una fuente de agua mineral fría, que está cargada de sal de Glauber (sulfato de sodio), sal de Epsom (sulfato de magnesio) y Selenita (sulfato de calcio)... porque todo aquel terreno está lleno de yeso... por esta razón es muy purgante (ver GÁMEZ, 1771);... tal vez se reparará que esta obra toca muy superficialmente las aguas minerales... Se deja este campo abierto a los Sabios españoles... (BOWLES, 1782: 515).

W.K. Sullivan (1822-1890), profesor de química de la Universidad Católica de Irlanda, publica una memoria sobre los depósitos de sulfato del valle del Jarama, cerca de Aranjuez (SULLIVAN & O'REILLY, 1863), en el texto hace referencia a EZQUERRA DEL BAYO (1845: 139), señalando el carácter no marino de estas formaciones, y describen con todo detalle los afloramientos de los niveles salinos del valle del río Jarama, y del río Manzanares (EZQUERRA DEL BAYO, 1845: 141), así como, el encajamiento del río Jarama en la Unidad Salina, identificada en la zona en los escarpes a lo largo de todo el valle (EZQUERRA DEL BAYO, 1845:43). Describe el nivel mineralizado, atribuyéndole un espesor variable de 16 a 17 m, llegando en algunos sondeos a reconocerse espesores de 19 m, aunque la extensión o amplitud del horizonte hacia el Este no parece ser muy considerable, a juzgar por el hecho de la desaparición del nivel del sulfato de sosa en la dirección de la Mina El Consuelo. Esto parecía, en opinión de los autores, demostrar que el yacimiento tendría una forma lenticular, comparable a la que se habría generado en un depósito lacustre. En efecto, según los mencionados autores, es probable que aquí existiera antiguamente un lago, cuyos contornos serían indicados por los del sulfato de sosa. La mineralización de sulfato de sosa, se presenta en tres estados:

- 1). Como sulfato anhidro o thenardita;
- 2). Como sulfato hidratado, exantolosa o sal de Glauber; y
- 3). Como glauberita, cuya masa principal es el sulfato anhidro doble, que encierra pequeños grumos irregulares de yeso sacaroideo blanco, así como nódulos endurecidos de glauberita.

En su obra sobre la Geología de Madrid (PRADO, 1864), asegura que la "sal gema" suele acompañar a la sosa sulfatada y la glauberita, así se encuentra en las salinas de Villamanrique de Tajo y de Espartinas. El terreno terciario de agua dulce, que es sin duda el que aparece en la Península ocupando mayores espacios, se halla en varios puntos y en su zona media solamente, o sea en los niveles de arcillas y yesos, contiene sulfatos de sosa, a veces en capas muy estrechas, entre las de arcilla y yeso, aparecen en Ciempozuelos, Colmenar de Oreja, Chinchón y Aranjuez, y son objeto de minería, para obtener el carbonato y el sulfato de sosa. Fuera de la provincia de Madrid, se encuentra incluso en niveles más potentes. El mineral thenardita, sulfato sódico anhidro se halló por primera vez en las salinas de Espartinas por el químico José Luis Casaseca, especie nueva que dedicó al célebre químico, Thénard, J. (1777-1857), y cuyos cristales precipitan por la evaporación de aquellas en forma de costras cristalinas y cristales, cuyo hábito aparente es el de un prisma recto romboidal. En las cercanías de Aranjuez también aparecen con hábitos laminares y lenticulares.

Cita también PRADO (1864), el mineral glauberita, indicando que esta sal no debe confundirse con la sosa sulfatada hidratada, llamada sal de Glauber, o sulfato sódico decahidratado. La glauberita, se compone de sulfato de sosa y de sulfato de cal a partes molarmente equivalentes. Se halla con mucha abundancia en las arcillas de Ciempozuelos, Chinchón, Colmenar de Oreja, etc. En las salinas de Villarrubia, afloramiento situado en la rivera derecha del Río Tajo, en las proximidades de Villarrubia de Santiago.



Figura 2. Vista de la ribera izquierda del Jarama, en las proximidades de Las Casas del Consuelo. En el nivel en el que se desarrolla la Mina Consuelo.

Señala además PRADO (1864), que es muy abundante en el término de Ciempozuelos, mostrando los cristales un hábito apuntado muy agudo.

En el término de Villarrubia de Santiago, describe VILANOVA (1875), el afloramiento y la explotación de la Mina de El Castellar, de forma muy precisa:

Debajo de aquellas imponentes masas de espejuelo, aparecen varias capas de arcillas de colores oscuros, impregnadas de sal y de sulfato de sosa, cuya última sustancia aparece sobre todo en la superficie, en forma de preciosas eflorescencias blancas, que están en la roca, formando con frecuencia bonitos grupos de cristales transparentes como el agua.

Añade también consideraciones genéticas que ponen de manifiesto el carácter secundario de las eflorescencias de las fases sulfatadas sódicas, que aparecen en las galerías (cañones), según él, abiertas desde tiempo inmemorial, y que a veces presentan morfología estalactítica, recubriendo las maderas de entibación de la galería... Vilanova identifica la thenardita de tonos azulados así como la halita azul – morada, señalando que hasta aquel momento no existe una explicación aceptable.

Cita VILANOVA (1875) la presencia de cristales idiomorfos acaramelados de glauberita, en el seno de thenardita, así como yeso espejuelo, a techo de los niveles glauberíticos tan comunes en la zona. La glauberita aparece como cristales idiomorfos perfectos, en el seno de thenardita, y muestra estrías de crecimiento. La glauberita de Villarrubia es además célebre por haber sido la primera descrita por Brongniart. En el famoso texto de FUCUS & LAUNAY (1893), dicen que la “Glauberita forma, en España, interesantes yacimientos de los que el principal es el de Cien-Pozuelos, cerca de Aranjuez. Se presenta allí en capas regulares y potentes en el Mioceno”. Según estos autores, la glauberita aflora en estratos casi horizontales en las laderas del valle, dando lugar a bancos de más de 12 m de espesor con laminaciones arcillosas verdosas a

rojizas, y la glauberita aparece impregnándolos. Aseguran que se disuelve en agua con facilidad, dando un precipitado de yeso.

Un magnífico estudio de las sales de la Unidad Salina aparece en CALDERÓN (1895), cita a Vilanova, por su obra *Salinas de Villarrubia de Santiago* e indica que se encuentran en la parte media de la serie, conteniendo sal común que alterna con lechos de arcillas oscuras, los niveles salinos según él son de 40-50 varas, entre 30-40 m. El espesor de la Unidad Salina en la zona y la presencia de un gran número de manantiales salinos, cauces efímero -salinos, así como explotaciones, se extienden en un rectángulo desde el paralelo de Madrid – San Fernando de Henares hasta el valle del Tajo, con una extensión superior a 4.500 km². En él parecen abundar, en profundidad, los depósitos de sal, que en superficie se transforman en una cobertera yesífera secundaria, auténtico residuo insoluble de la Unidad Salina. Revisando a CALDERÓN (1910), se encuentran muy buenas descripciones mineralógicas de las sales sódicas, así como abundante bibliografía de la época.

4. LA GEOLOGÍA DE LA UNIDAD SALINA EN LA PRIMERA MITAD DEL S. XX

El área próxima a Madrid, fue siempre objeto reconocimientos en las excursiones de campo, así QUIROGA (1890), encontró unos cristales romboédricos de yeso, que presentó en la Sociedad Española de Historia Natural, que interpretó como pseudomorfofisis de cristales de calcita. Por su parte, HERNÁNDEZ-PACHECO & ROYO GÓMEZ (1916) hablan de una nueva forma cristalográfica del yeso, en el debate sobre la interpretación de estas formas romboédricas, descrito por GARCÍA DEL CURA & ORDÓÑEZ (2018), interviene F. Pardillo, y el debate concluye con una brillante idea de Lucas Fernández Navarro, que interpreta, que probablemente, estas formas son “pseudomorfofisis hipostáticas de cristales de glauberita”, lo que permitiría asegurar que los yesos del Cerro de los Ángeles son el producto de la disolución incongruente de la glauberita de la Unidad Salina, como más tarde se demostrará.

La estructura cristalina de la glauberita, fue objeto de estudio por MARTÍN CARDOSO *et al.* (1931), en el seno del “Curso de Aplicación de los rayos X a la investigación de la estructura de los cristales”. El trabajo fue contestado por PARDILLO (1935), el cual, usando muestras de la Mina Consuelo, identificó este mineral como del grupo C3/2h en vez del C6/2h, que era el que le había atribuido Cardoso.

El estudio de las series terciarias del centro de la península ibérica recibió, sin duda, un gran impulso, con el sondeo de Alcalá Henares (1927), que alcanzó los 1.000 m de profundidad, y que se describió en ROYO GÓMEZ & MENÉNDEZ-PUGUET (1928). Según estos autores, el sondeo alcanza el límite Oligoceno-Eoceno a unos 500 m de profundidad, y según los cálculos derivado de los datos geofísicos de KINDELÁN & GARCÍA SIÑERÍZ (1928), el sondeo de Alcalá se encuentra en el centro de la cuenca, y la posición de las calizas Cretácicas, estaría a unos 1.250 ± 100 m de profundidad; un hito para la tecnología de la época, ya que alcanzó la mayor profundidad investigada hasta el momento a nivel mundial. Los perfiles realizados con balanza de torsión entre Alcalá de Henares y Torrelaguna, Alcalá y Sayatón y Alcalá – Madrid – Villanueva de la Cañada, son complementados por ROYO GÓMEZ (1922), donde describe las cuencas terciarias ibéricas: su fauna y la correlación entre ellas.

Desde el punto de vista estructural, VIDAL BOX (1942) encaja la cuenca del Madrid en el contexto del borde sur de la Sierra del Guadarrama, usando los datos anteriores de Kindelán y García Siñeríz, y trazando un perfil donde se observa el borde sur hasta las proximidades de El Pardo.

ROYO GÓMEZ & MENÉNDEZ PUGET (1928), habían estudiado la composición del agua minero medicinal de Loeches, procedente, según ellos del Oligoceno, piso al que debería pertenecer la Unidad Salina, y con más de 60 g/l de sulfato sódico, 23 g/l de sulfato magnésico, 9 g/l de sulfato potásico, etc. representarían la parte soluble de la Unidad Salina. El residuo insoluble de la Unidad Salina sería lo que esto autores llaman las series de yesos secundarios, más adelante volveremos sobre el tema, ya que según ORDÓÑEZ *et al.* (1989), los datos geoquímicos y el uso de análisis discriminante sobre elementos traza en yesos, permiten separar los yesos de la Unidad Salina, resto insoluble de las sales sódicas y cálcicas, de los yesos detríticos y de los yesos primarios que se encuentran en la llamada Unidad Intermedia de la Cuenca de Madrid.

Desde la época de PRADO (1864: 137 y siguientes), se habían observado pequeñas deformaciones locales en la estratificación de las facies de yesos secundarios de la Unidad Salina, con formas de colapsos y pequeñas deformaciones intra-estratales, con hendiduras verticales y deformaciones de las capas suprayacentes. Las deformaciones

afectaban también a las unidades del Terciario y Cuaternario, incluso observándose colapsos rellenos. Estas observaciones fueron también hechas en las Canteras de Vallecas en Madrid, por OBERMAIER *et al.* (1921), indicando que en ellas la horizontalidad común de las series terciarias, se cambia a ondulaciones o pliegues en Valdemoro, Aranjuez, Getafe... También fueron observadas por HERNÁNDEZ-PACHECO, E. & ROYO GÓMEZ (1916) e interpretadas y relacionadas con movimientos tectónico “post miocenos o quizá pliocenos”. OBERMAIER *et al.* (1921) opinan que pueden atribuirse a fenómenos locales relacionados con la formación de yesos por hidratación de anhidrita, y “por redisolución por las aguas o por ambas cosas”. Recientemente esta interpretación ha sido validada y ampliada por GUTIÉRREZ *et al.* (2014).

5. LAS PRIMERAS APROXIMACIONES LITOLÓGICAS Y SEDIMENTOLÓGICAS

La modernización del análisis de cuencas, y su aplicación a la Unidad Salina se puede ver en BENAYAS *et al.* (1958), donde se aprecia el gigantesco avance en la caracterización de las diferentes facies, los modelos paleogeográficos resultantes, y la introducción del fértil concepto de cambio lateral de facies. En efecto BENAYAS *et al.* (1958) señalan el paso lateral entre las facies detríticas, que reflejan la naturaleza del borde, como p.e. las arcosas a partir de los granitoides de la sierra del Guadarrama, y su disposición en forma de aureola, Figura 3, alrededor de las facies evaporíticas (yeso, anhidrita, y sales solubles, glauberita y halita). En la Figura 3 se recogen los datos más

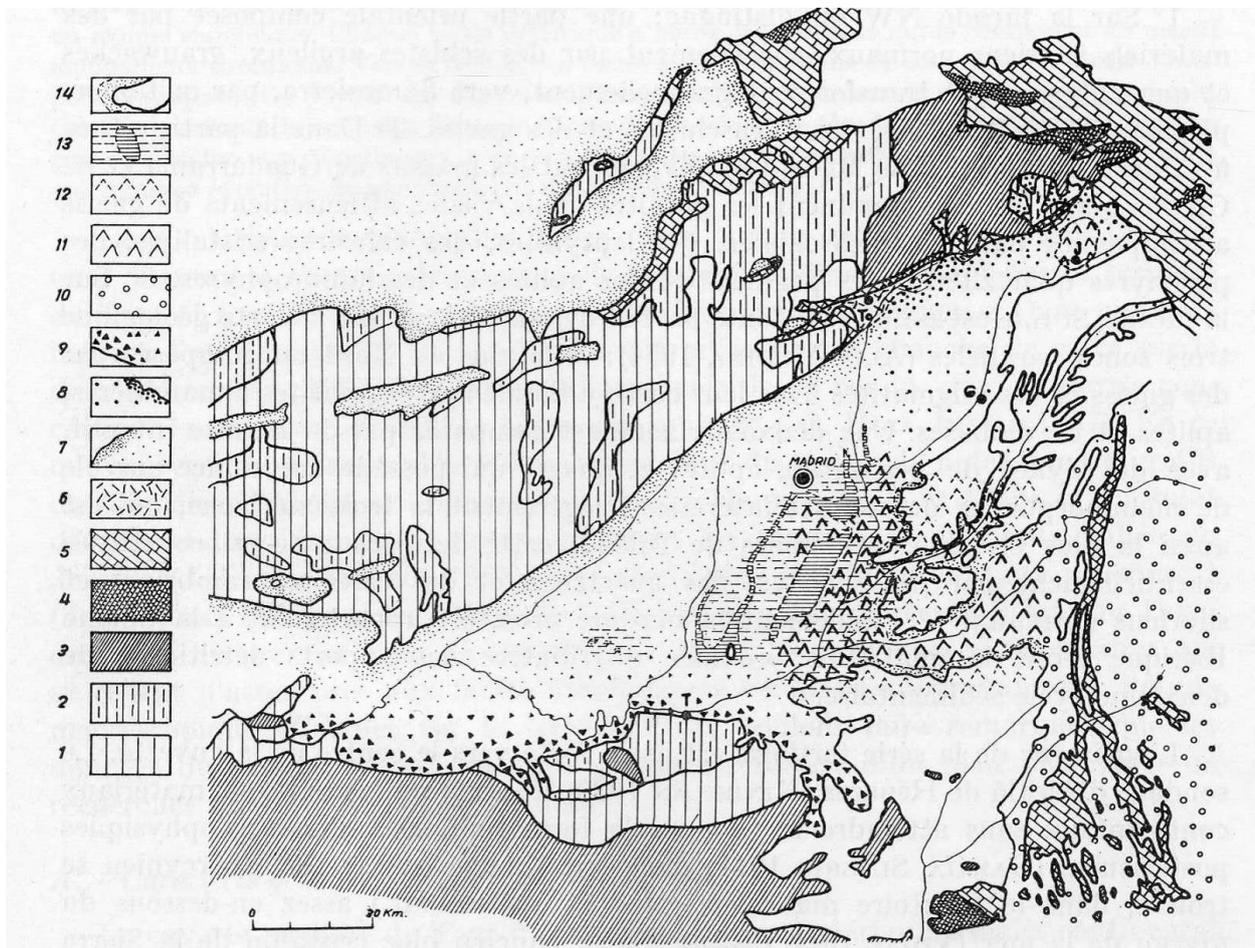


Figura 3. Distribución de facies del relleno terciario en relación con la litología de los macizos circundantes. Explicación: 1. Granito; 2. Gneis cristalino y pizarras; 3. Paleozoico: pizarras, cuarcitas y algunos lechos de caliza; 4. Areniscas y conglomerados rojos, Buntsandstein; 5. Serie de calizas mesozoicas; 6. Facies Torrelaguna y Jadraque; 7. Facies de Madrid; 8. Facies de Guadalajara; 9. Facies de Toledo; 10. Facies de Alcarria; 11 y 12. Facies centrales de evaporitas (yesos) (12 Las evaporitas debajo de las calizas de los páramos); 13) Facies de transición; 14) Calizas de los páramos. Tomado de BENAYAS *et al.* (1958).

importantes y la descripción de las facies, así como su disposición espacial. Los datos mineralógicos de minerales de la arcilla y los datos de minerales pesados sirven para apoyar un modelo estratigráfico moderno de la Cuenca del Tajo, llamada así hasta MEGIAS *et al.* 1980, quienes propusieron el nombre de Cuenca de Madrid, denominación consagrada junto con la de la Cuenca de Lisboa utilizada por ANTUNES *et al.* (1987), ambas en el valle del río Tajo, y que parecían singularizables por ser el asentamiento de dos grandes núcleos urbanos. En ANTUNES *et al.* (1987) se muestra la correlación bio-estratigráfica conocida en el momento entre ambas cuencas.

En las síntesis de cartografía existente hasta 1971 (IGME, 1971), las interpretaciones geológicas rehuían hablar de las facies centrales evaporíticas, y hablaban de grandes espesores de "yesos y margas yesíferas", de edades desde el Burdigaliense al Vindoboniense, como puede verse en CASTELLS & DE LA CONCHA (1951).

En la década de los 70 destaca una breve nota de SAN MIGUEL & MONTOTO (1971), en la que se describen las complejas paragénesis de la Unida Salina, así como los diferentes tipos y hábitos cristalinos de glauberitas sin-sedimentarias y diagenéticas.

6. SONDEOS, MINERALOGÍA DE DRX Y LÁMINAS DELGADAS DE LA UNIDAD SALINA; INTERPRETACIONES DESDE UNA NUEVA VISIÓN

Un importante cambio en el estudio de la Unida Salina de la Cuenca de Madrid, se introduce con la descripción de sondeos realizados para investigación por Unión Salinera Española en la Mina de El Castellar, al comienzo de la década de los 70' del siglo pasado. Hasta entonces por razones obvias, los sondeos en la Unida Salina se hacían por recuperación del polvo del sondeo, con una recuperación muy baja y con dificultades para interpretar las petrogénesis salina. Con los sondeos efectuados con salmuera saturada en sulfato sódico, se mejoraba la recuperación de testigos, y se permitía hacer observaciones de calidad sobre testigo. Por otra parte comenzó a hacerse petrografía microscópica puliendo las láminas con hidrocarburos, que no disuelven las sales, a la vez que se desarrolló la aplicación de la Difracción de Rayos X (DRX) que, mediante un estudio sistemático de las sales, obtenido a partir de diagramas de polvo, permite realizar una identificación de la mineralogía (ORDÓÑEZ *et al.* 1977).

Las columnas estratigráficas de síntesis obtenidas a partir de datos mineralógicos de DRX en los sondeos con apoyo petrográfico, (GARCÍA DEL CURA, 1979), muestran

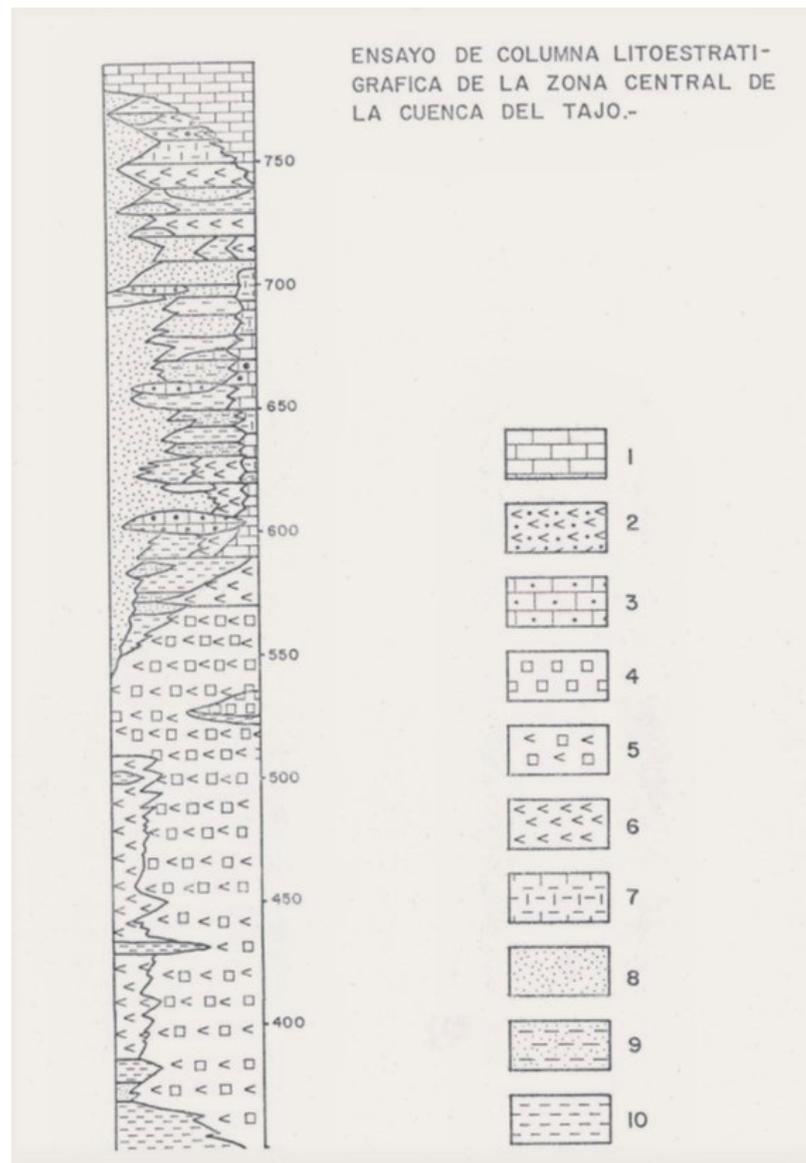


Figura 4. Primeros datos estratigráficos de la Cuenca de Madrid, para la zona próxima a la mina de El Castellar (Villarrubia de Santiago). 1. Calizas. 2. Yeso - silicificaciones. 3. Calizas y/o dolomías silicificadas. 4. Sales (glauberita, thenardita, halita). 5. Sulfato cálcico y/o margas con sulfato cálcico (anhidrita) con otras sales (glauberita, thenardita, halita, polihalita, magnesita...). 6. Sulfato cálcico y margas con sulfato cálcico. 7. Margas. 8. Samitas con algún nivel conglomerático. 9. Samitas aleuríticas. 10. Lutitas. Tomado de GARCÍA DEL CURA, 1979.

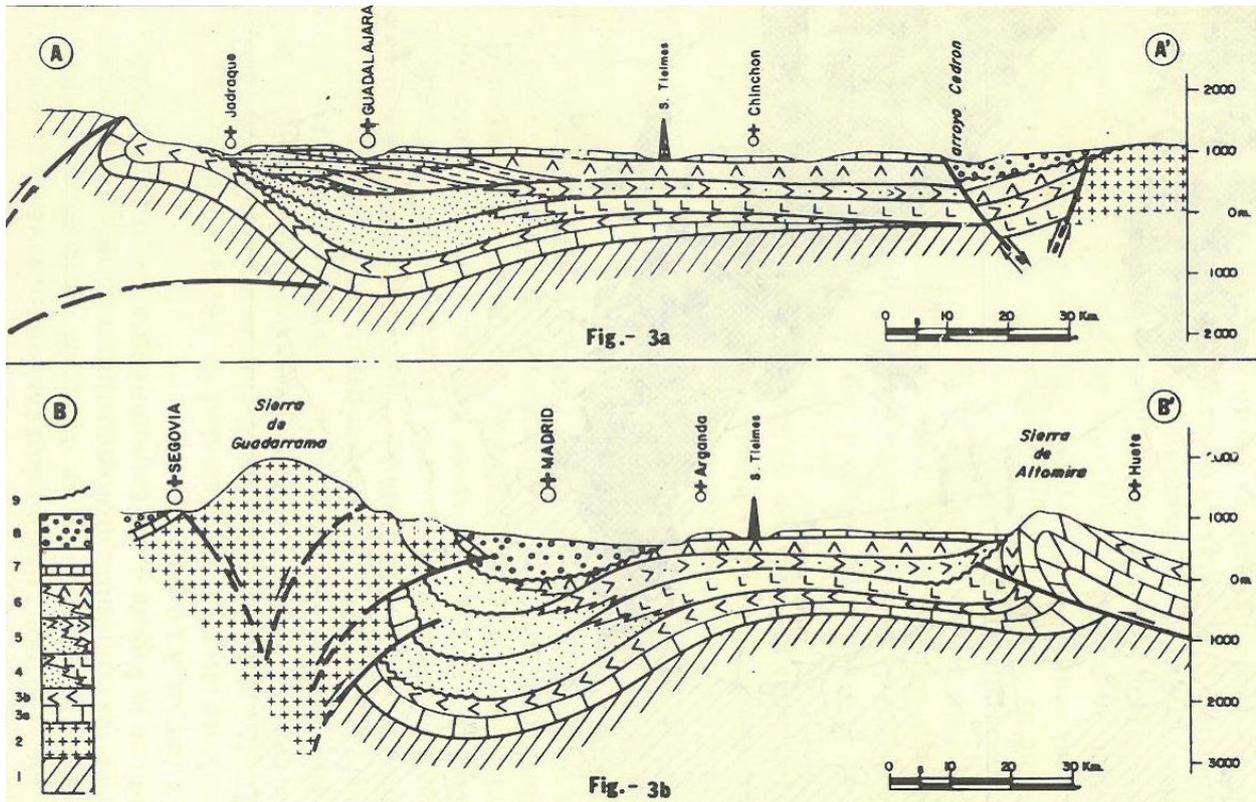


Figura 5. Cortes geológicos interpretativos de la Cuenca de Madrid: Zócalo Paleozoico indiferenciado; 2. Zócalo granítico; 3a. Mesozoico indiferenciado. 3b. Eoceno-Oligoceno (\pm evaporítico); 4 y 5. Unidad Salina y series equivalentes; 6. Unidad Detrítico-Yesífera y series equivalentes. 7. Unidades fluvio-lacustres terminales; 8. Unidad Arcósica; 9. Ruptura sedimentaria a nivel cuencial. (Nota: las potencias de las unidades están exageradas por motivo de dibujo). Tomado de MEGÍAS *et al.*, 1983.

la importancia de la Unidad Salina, Figura 4, definida a partir de la síntesis de sondeos estudiados; sin duda un avance en relación con las columnas descritas hasta entonces. En ellas pueden observarse los niveles de sales sulfatadas sódico – cálcicas (anhidrita – glauberita), sulfatadas sódicas (thenardita), cloruradas sódicas y la primera cita de polihalita sulfato hidratado de potasio, calcio y magnesio (GARCÍA DEL CURA *et al.*, 1978), así como la presencia de filosilicatos detríticos de decantación de naturaleza íltica y de un carbonato, magnesita (ORDÓÑEZ *et al.*, 1977).

La Unidad Salina, se extiende como mínimo en la zona de Villarrubia entre 350 m s.n.m. a 580 m s.n.m.; en el sondeo profundo de Valdebro, en Tielmes n° 1 (C. de Madrid) en 1965, descrito por CARAMÉS *et al.* (1973), cita la presencia, en el fondo, de Senonense (Cretácico), y atribuye todo el sondeo prácticamente a las facies evaporíticas centrales definidas por BENAYAS *et al.* (1958). Y en él se hace referencia por primera vez a la presencia de anhidrita como fase más común en el sondeo, así mismo coincide con las descripciones del sondeo de Tribaldos de Amospain (1974), con cuyos datos MEGÍAS *et al.* (1983), presentan un corte de conjunto de la cuenca, situándola en relación con el sondeo de Tielmes y dividiendo el relleno en una serie de unidades: 5. Unidad Salina y series equivalentes; 6. Unidad Detrítico-Yesífera y series equivalentes. 7. Unidades fluvio-lacustre terminales; 8. Unidad Arcósica; unidades separadas entre ellas por “rupturas sedimentarias” de escala cuencial que se habían identificado sobre el terreno, Figura 5.

Resulta importante el trabajo de ORTÍ *et al.* (1979), sobre la Unidad Salina, centrado exclusivamente sobre el yacimiento de sales sódicas de Villarrubia de Santiago (Mina de El Castellar), con una descripción microscópica de la mineralización e interpretándolo en el contexto de un modelo de “playa lake”, los trabajos anteriores habían definido para la Unidad Salina un ambiente paleogeográfico de lago salino perenne, más adecuado a las observaciones de granoselección y orientación por decantación de los cristales de glauberita, el origen por decantación de los niveles de terrígenos con presencia de orientación en los antiguos planos de sedimentación y la ausencia de figuras de retracción-deseccación en los sedimentos. En el contexto del estudio geológico del término municipal de Madrid, se realizaron sondeos en el área urbana de Madrid, descritos por GARCÍA DEL

CURA *et al.* (1986), mostrando la homogeneidad de esta formación desde Villarrubia de Santiago hasta Madrid capital, situada a una distancia de casi un centenar de km, este trabajo describe con muchas precisiones de los diferentes tipos de hábitos cristalinos de las sales de la Unidad Salina y su interpretación sedimentológica más aceptada. Estos trabajos fueron sintetizados en ORDÓÑEZ *et al.* (1991) y ORDÓÑEZ & GARCÍA DEL CURA (1994), estos datos, así como la disposición en conjunto de la Unidad Salina confirman la idea de un lago salino permanente. El dispositivo estratigráfico se puede ver en la Figura 6, así como las dimensiones del modelo, la disposición de sondeos y minería en la zona.

La Figura 6, se complementa con la Figura 7, que es una proyección isométrica de los datos litoestratigráficos y posición de los sondeos reconocidos por los autores, así como la interpretación del borde E. de la Cuenca. La ruptura sedimentaria a techo de la Unidad Salina, se relaciona con la aparición en la Unidad Intermedia de un nivel de yesos detríticos de desmantelamiento centrifugo de la Unidad Salina, con presencia de estructuras turbidíticas, MEGÍAS *et al.* (1982), con estructuras de corriente y deformación: ripples, laminación paralela y lenticular, granoselección, cantos blandos, estructuras "dishes", huellas de flujo-carga, que se reconocen en Esquivias, Chinchón, Huerta de Valdecarábanos ... De acuerdo con los resultados obtenidos en las descripciones de estas secuencias de yesos detríticos, la zona de mayores aportes estaría situada al sur de la cuenca, y podría interpretarse dentro de un modelo de desmantelamiento progresivo de la Unidad Salina, y acumulación en lagos perennes poco profundos, que orlaban un alto interno, y con aguas salobres, saturadas en yeso y lodos dolomíticos. Algunos afloramientos se describen en la bibliografía como yesos, comparables a los yesos generados por meteorización *in situ* de la Unidad Salina. La parte superior de la Unidad Salina, presenta acumulaciones y cementaciones de thenardita sobre niveles ricos en halita con cristales diseminados e idiomorfos de glauberita, todo ello cubierto por niveles enriquecidos en mirabilita. Sobre este conjunto se disponen los yesos tipo "espejuelo" generados por meteorización *in situ* de la Unidad Salina.

7. INTERPRETACIONES ESTRUCTURALES

Al comienzo de la década de 1980, MEGÍAS *et al.* (1983), habían propuesto una distribución de unidades litoestratigráficas definidas entre dos rupturas sedimentarias,

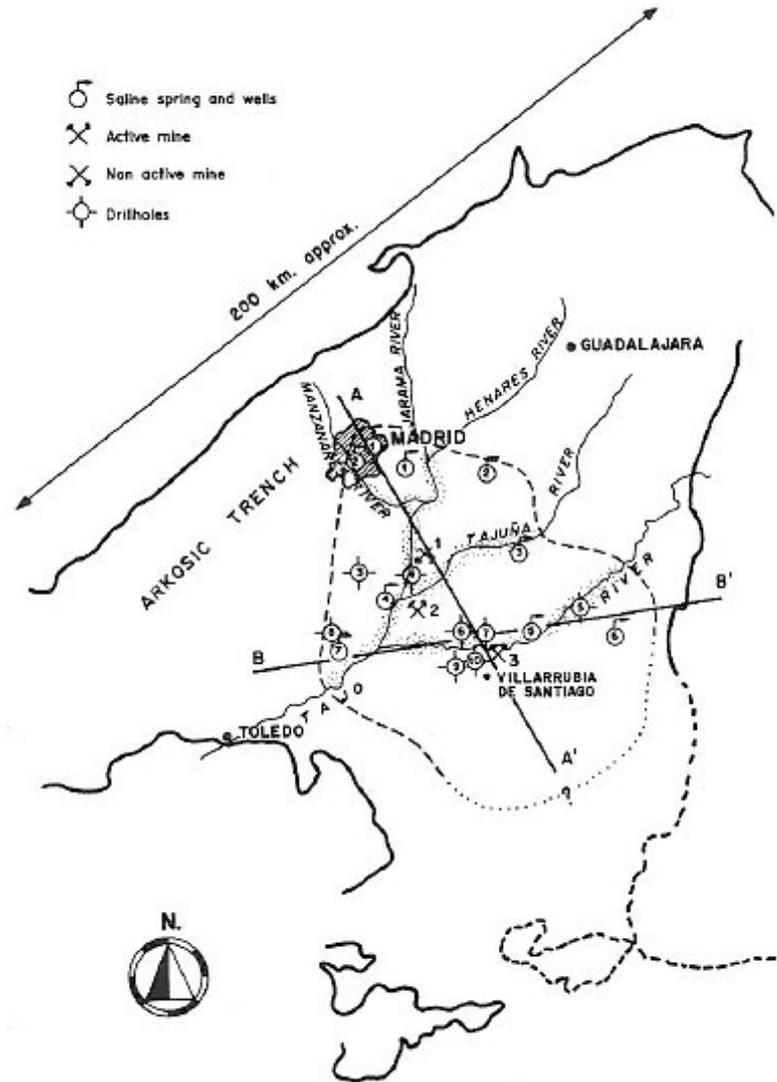


Figura 6. Mapa que muestra la distribución de la Unidad Salina (línea gruesa) y los lugares de muestreo. La línea discontinua clara al sur de Madrid muestra los afloramientos de la Unidad Salina meteorizada. Sondeos: 1-San Blas, 2-Yallecas, 3- Valdemoro, 4-Titulcia, 5-Fuentidueña del Tajo, 6-Colmenar de Oreja, 7-Cerro del Soldado, 8-Borox, 9-Noblejas, 10-Villarrubia de Santiago. Fuentes y pozos salinos: 1-Piedra Negra, 2-Loeches, 3-Carabaña, 4-Espartinas, 5-Carcaballana, 6-Belinchón y 7-Borox. Tomado de ORDÓÑEZ & GARCÍA DEL CURA, 1994.

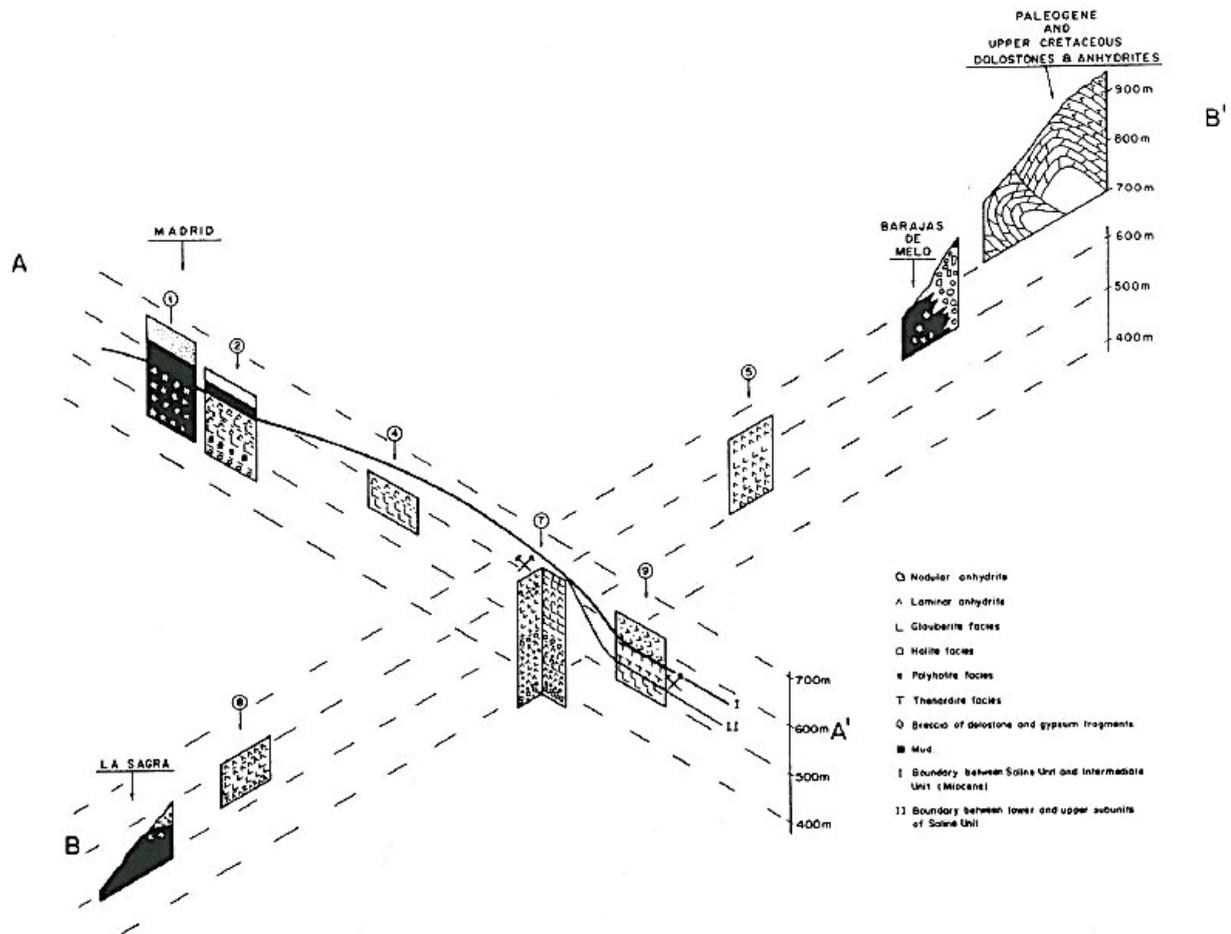


Figura 7. Representación isométrica de secciones de la Unidad Salina con representación de las facies de sales, posición en coordenadas, (x, y, z), z en m s. n. m. de los diferentes niveles estratigráficos. Se ha representado con números los sondeos: 1-San Blas, 2-Vallecas, 4-Titulcia, 5-Fuentidueña del Tajo, 6-Colmenar de Oreja, 7-Cerro del Soldado, 8-Borox, 9-Noblejas, 10-Villarrubia de Santiago. Anhidrita Nodular. Anhidrita laminar. Facies con glauberita. Facies con polihalita. Facies con thenardita. Brecha de dolomías y yesos. Lodos. I. Límite entre la Unidad Salina y la Unidad Intermedia. II. Límite entre la Unidad Salina Inferior y la Unidad Salina Superior. Tomado de ORDÓÑEZ & GARCÍA DEL CURA, 1994.

llamadas Unidades Tectosedimentarias (UTS), y que los materiales contenidos entre dos rupturas se consideraran coetáneos desde el punto de vista crono estratigráfico. Estas rupturas se asociaban a grandes cambios estratigráficos, relacionados con momentos de cambios en el estado tensional cortical. Consideraciones similares pueden verse en RODRÍGUEZ-ARANDA *et al.* (1991). Sin embargo el Análisis estructural de las Cuenas Terciarias (Cenozoicas) Ibéricas permitió nuevas interpretaciones más referenciables a escala de dinámica global, ya que parece que, a partir del Oligoceno tardío, se desarrollaron amplios sistemas lacustres salinos, lo que indica que los materiales salinos del Mesozoico y del Paleógeno ya habían sido levantados tectónicamente, luego erosionados y posteriormente depositados en entornos endorreicos (MUÑOZ-MARTÍN *et al.* 1998, y VICENTE *et al.* 2011). Estos autores apuntan que el primer cambio paleo geográfico importante en la Península se produjo en la transición del Eoceno Inferior al Medio, con la apertura de un gran número de cuencas cenozoicas. Las Cuenas del Duero y de Madrid comenzaron a separarse en cuencas individuales, produciéndose una subsidencia continuada desde el Cretácico Superior que se registra en los sectores septentrional y oriental de la Cuenca de Madrid y también en la parte SW de la Cuenca del Duero. Durante el Oligoceno-Mioceno Inferior (34 -16 Ma), el relleno de la Cuenca de Madrid, se caracterizó, en general, por el desarrollo de varias unidades tectono-estratigráficas, separadas por rupturas en la sedimentación. La subsidencia más importante, por tanto, se desarrolló durante el Oligoceno, en la parte oriental de la Cuenca de Madrid. VICENTE *et al.* (2011), determinan con gran precisión la subsidencia

tectónica en las diferentes cuencas ibéricas, así como la situación de los eventos tectónicos y la subsidencia y los levantamientos asociados, el modelo general del estado de tensiones, y la distribución de las facies evaporíticas en la Cuenca de Madrid.

8. MINERALOGÉNESIS: RECURSOS MINERALES Y RIESGOS

El conocimiento de que disponemos en la actualidad de los procesos genéticos de la glauberita en estas unidades terciarias dista mucho de ser satisfactorio (ORTÍ, 2000). En particular, la disyuntiva interpretativa “precipitado directo (subacuoso) en medio lacustre” versus “producto de reemplazamiento (intersticial y sin-sedimentario) del yeso preexistente”, requiere nuevos estudios y observaciones, este dilema puede aplicarse a la génesis de la anhidrita, común en la Unidad Salina. Muchas interpretaciones se han dado a la singénesis o génesis sedimentaria: cristalización de sales en el seno de una salmuera y decantación sobre el fondo; formación de lodos salinos (pasty): glauberita, halita, anhidrita - yeso, carbonatos Mg-Ca; recrecimiento de estas fases salinas en el seno de los lodos dando lugar a texturas desplazativas que engloban a los lodos sobre las superficies de crecimiento. Además este dispositivo sedimentológico se manifestaría en formas concéntricas alrededor de los depocentros. La Unidad Salina disminuye en espesor desde la zona del Sur del río Tajo hasta los alrededores de Madrid (Vallecas, San Fernando de Henares) (GARCÍA DEL CURA *et al.* 1986).

Las fases minerales más comunes son: a) glauberitas idiomorfas con el eje mayor paralelo a la estratificación; b) glauberitas idiomorfas en el seno de una matriz de cristales esferulíticos y fibroso-radiados de polihalita; c) halita, asociada a polihalita, incluso se identifican cristales de polihalita penetrando los borde de la halita; la halita muestra formas “chevron” de crecimiento sobre el fondo. Es notable la asociación de estas facies con anhidrita glandular en el seno de magnesita y/o margas magnésicas, lo que es un dato que corrobora la falta de valor de caracterización sedimentológica que tienen las estructuras glandulares en anhidrita... La interpretación de series glauberíticas sedimentológica más usada es la de GROKHOSKII (1977), de lagos salado en ambiente árido, lo que junto con los datos isotópicos de las sales recogidos de diferentes artículos por ORDOÑEZ & GARCÍA DEL CURA (1994) y GARCÍA DEL CURA *et al.* (2017), que permiten señalar el carácter de evaporitas procedentes de antiguos depósitos, es coherente con las interpretaciones estructurales obtenidas partir de datos geofísicos.

Los modelos hidroquímicos apuntan a que la sedimentación puede responder a un modelo de lago perenne, en un clima árido, en el que la evaporación supera a la entrada de aguas diluidas freáticas o de escorrentía, SÁNCHEZ-MORAL *et al.* (2002). Las aguas que alimentaron este lago podrían proceder del lixiviado de las series evaporíticas Triásicas (Keuper) y Cretácicas-Paleógenas que afloran al N y Oeste de la Cuenca de Madrid (RODRÍGUEZ – ARANDA *et al.*, 1991); los datos de campo obtenidos en el borde este de la S^a de Altomira apoyan esta hipótesis, así como los datos de sondeos profundos para petróleo, ver LANAJAS DEL BUSTO, 1987). Los datos isotópicos ($\delta^{34}\text{S}_{\text{CD}}$ y $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$) obtenidos, y sintetizados por ORDOÑEZ *et al.* (1991), soportan la idea de una Unidad Salina, cuyas sales primarias tiene un origen común en sulfatos cretácico-paleógeno y triásicos y forman parte de la paragénesis inicial (anhidrita, glauberita, polihalita, thenardita...).

Resulta importante señalar los valores isotópicos especiales de la magnesita, que presentan valores muy negativos del $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$, indicando una fuerte actividad biológica de acuerdo con el modelo de SANZ-MONTERO & RODRÍGUEZ-ARANDA (2012), que interpretan la formación de magnesita, el carbonato más común en la Unidad Salina no meteorizada, a través de las biosignaturas, morfológicas y geoquímicas, observadas en los cristales de magnesita, y que sugieren que la actividad microbiológica sobre sustancias poliméricas extracelulares (EPS) influyó en la génesis de las magnesitas.

Como hemos dicho anteriormente, GROKHOSKII (1977), en su clásica revisión de las sales sódicas, cita a menudo los potentes niveles de glauberita del Thien-San, en el seno de los cuales aparecen niveles de glauberita alternando con thenardita. Cita también niveles de sales sódicas en el Mar Caspio. En el mismo trabajo, se describe la asociación glauberita – halita en la región de Kichik-Kul (Aral) Asia Central, en el que se citan cuerpos lenticulares de glauberita con más 85 m de espesor, de los cuales 42 m, eran bastante puros, con un nivel de 12 m con hasta un 93% de glauberita. La roca de glauberita contiene poco NaCl y relativamente poco MgCO_3 , mientras que el encajante tiene arcillas y magnesita y arcilla (30-75%). El contenido medio de glauberita era próximo a 50%. El yacimiento está recubierto por un horizonte de meteorización

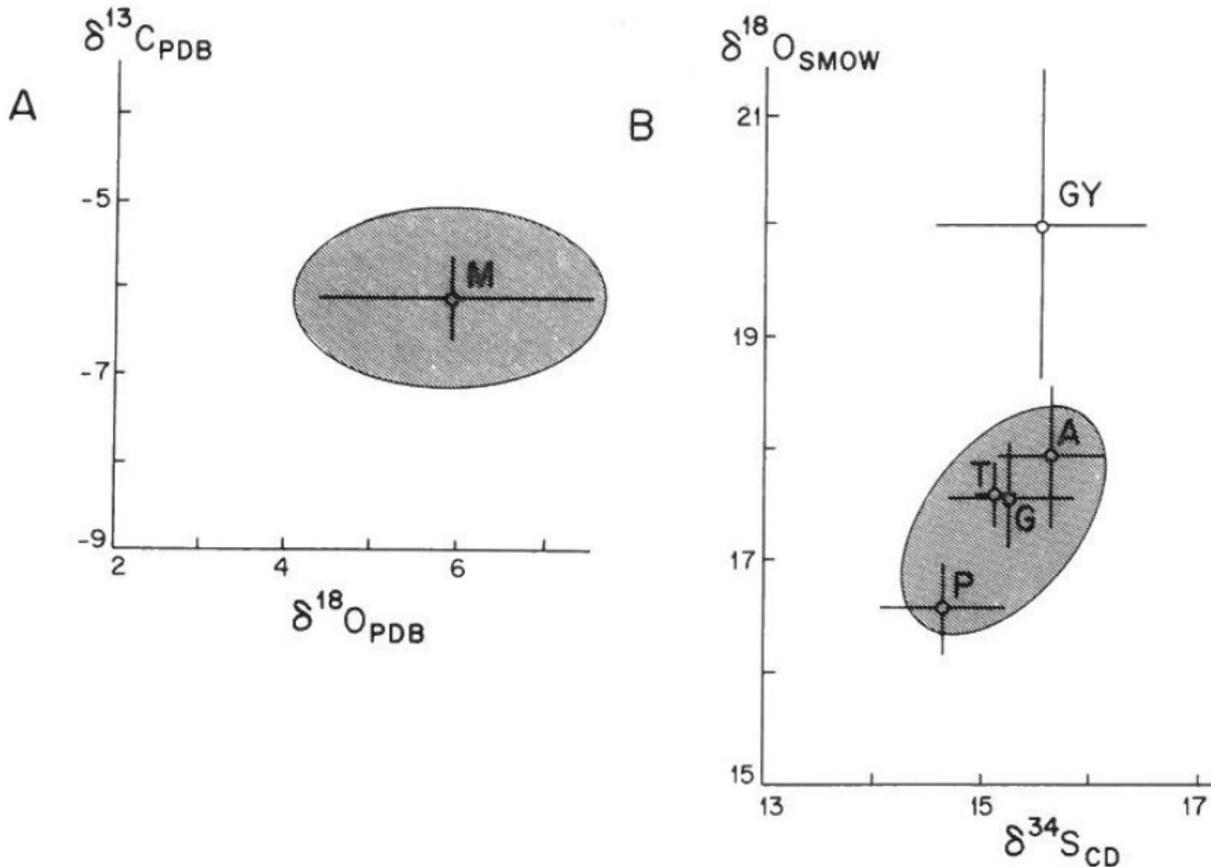


Figura 8. Valores medios de los isótopos de carbono, $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$; oxígeno, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$; y azufre, $\delta^{34}\text{S}_{\text{CD}}$ de la Unidad Salina, en las magnesitas (M) n° muestras = 5; yeso (GY) con n° = 10; anhidrita (A) n° = 6; glauberita (G) n° = 5; thenardita (T), n° = 3; polihalita (P), n° 3. El eje de los elipsoides está centrado sobre los valores medios de cada mineral, representa los valores de la desviación estándar (σ) de los datos (n). Tomado de ORDÓÑEZ *et al.* 1991.

de mirabilita. La revisión de GARRET (2001), recoge todos estos datos, y revisa los yacimientos mundiales y españoles. Este autor pone mucha atención en la glauberita, sin duda el mineral más emblemático de la Unidad Salina, y asegura que la glauberita, $\text{Na}_2\text{Ca}_2(\text{SO}_4)_4$, es el principal mineral de sulfato de sodio en varios yacimientos muy grandes, tanto solo como mezclado con astrakanita (blöedita), o intercalada o subyacente a la thenardita. Se encuentra con frecuencia en los depósitos de halita lacustres, en cantidades más pequeñas en las playas salinas y ocasionalmente en otros depósitos u ocurrencias de sulfato de sodio soluble o sal soluble. Es bastante soluble en agua, y moderadamente soluble en soluciones de cloruro de sodio, por lo que requiere una concentración de sulfato de sodio > 20-25% para precipitar cuando hay menos de 5% de cloruro de sodio presente, y > 10% de Na_2SO_4 cuando la solución está saturada de NaCl. Se trata de soluciones muy concentradas y sólo pueden encontrarse cerca del final del ciclo de evaporación de una cuenca, por lo que en cuencas cerradas solo pueden precipitarse pequeñas cantidades de glauberita. Sin embargo en una cuenca abierta conteniendo salmueras ricas en sulfato sódico, la entrada de aguas bicarbonatadas o sulfatadas cálcicas en las últimas etapas de la evaporación conlleva un amplio margen para la precipitación de glauberita.

Modernamente se han citado depósitos de glauberita, que no tienen un espesor económico, pero son de gran importancia en términos de la existencia de yacimientos de sulfato de Na, en la cuenca de Çankir-Çorum en Turquía, SOMMEZ (2014), en los sondeos realizados se describen una capa intermedia de glauberita y sal gema. Se han descrito también depósitos de glauberita, (KADINKIZ *et al.* 2017), en la cuenca Eregli-Bor (centro-sur de Turquía), se encuentran a veces alternando con niveles de halita, a una profundidad aproximada de 400 m en el yacimiento de sulfato de sodio de Yeniköy.

Entre los depósitos actuales, KOLPAKOVA & GASKOVA (2018), describen en Mongolia – Oeste, un lago clorurado Davsan-Nuur, en el que la saturación de la salmuera en

glauberita $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$ conduce a una reducción de la concentración de calcio en la solución, llegando a desaparecer este mineral del precipitado, este hecho se corresponde con el concepto de “fraccionamiento químico” de HARDIE & EUGSTER (1979), lo que implica la necesidad de un modelo abierto en que la entrada de aguas bicarbonatadas cálcicas permanezca durante el proceso evaporítico que genera glauberita. El campo de estabilidad de la glauberita fue propuesto desde hace años, y confirmado por LÓPEZ & MANDADO (2007): el equilibrio para la glauberita exige la alta actividad de agua, es decir concentraciones elevadas, y mantener constantes la relación entre la $a_{\text{Ca}^{2+}} / (a_{\text{Na}^{1+}})^2$, Figura 9.

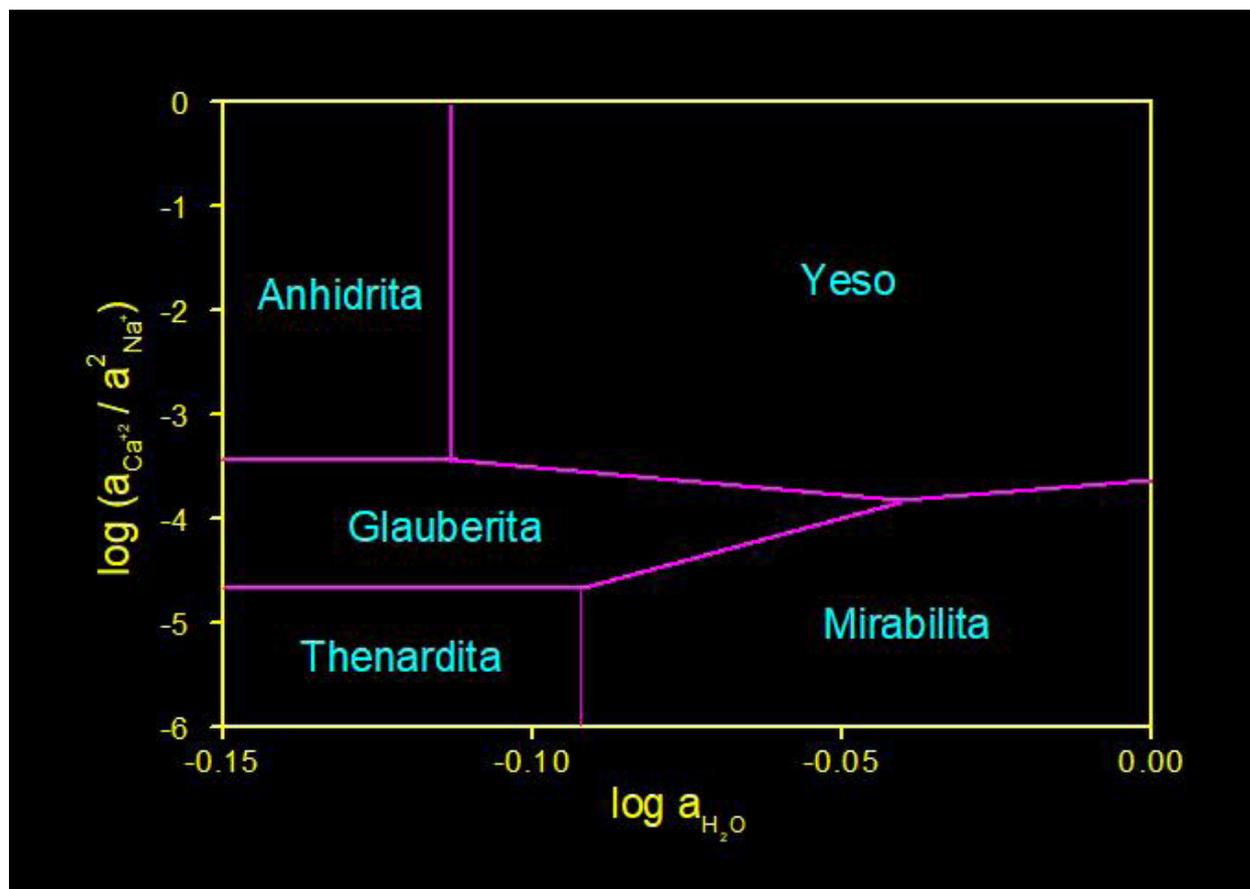


Figura 9. Diagrama de estabilidad para las fases del sistema $(\text{SO}_4^{2-})\text{-Na}^+\text{-Ca}^{2+}$, donde se puede ver el campo de estabilidad de la glauberita, influenciado por la salinidad explicada aquí por el $\log a_{\text{H}_2\text{O}}$.

9. CONSIDERACIONES FINALES

La Unidad Salina, cuyo significado y propiedades hemos analizado someramente en este trabajo, ocupa la parte cuasi central de la que hemos denominado Cuenca de Madrid. El primer cambio paleogeográfico importante se produjo en la transición del Eoceno Inferior al Medio, con la apertura de un gran número de cuencas cenozoicas. Las Cuencas del Duero y de Madrid comenzaron a separarse en cuencas individuales, mostrando una subsidencia continuada. Desde el Cretácico Superior se registra en los sectores septentrional y oriental de la Cuenca de Madrid y también en la parte SW de la Cuenca del Duero. Durante el Oligoceno-Mioceno Inferior (34-16 Ma), el relleno de la cuenca sedimentaria se caracterizó, en general, por el desarrollo de varias unidades tectono-estratigráficas, separadas por rupturas en la sedimentación.

En la Unidad Salina en el término de Villarrubia de Santiago, Brogniart en 1808, descubrió la glauberita. El mineral thenardita, fue descubierto en las Salinas de Espartinas por Casaseca y Cordier, en 1826. En esta Unidad Salina se hizo la primera cita de

polihalita (DRX) en 1978, por la misma época se encuentra magnesita como el principal carbonato asociado a esta Unidad.

Existen datos sobre minería prehistórica e histórica de sales en la cuenca de Madrid, y en las salinas alimentadas con las salmueras generadas en su drenaje. Los manantiales salados procedentes de la Unidad Salina, bien conocidos, Carabaña, Loeches, Ciempozuelos, Espartinas, Carcaballana... constituyen parte del Patrimonio de Aguas Minero-Medicinales de España.

Estas salinas se explotaron para sulfatos sódicos desde el s. XIX, desarrollándose una industria del sulfato sódico y de su beneficio para fabricar carbonatos y sulfatos de sosa. Esta minería prosigue en la actualidad con las empresas Sulquisa y SAMCA. En la unidad estratigráfica de la Unidad Salina, cuando desaparecen las sales, y en tránsito lateral a las mismas, existen niveles de arcillas cerámicas ílticas: Arcillas de La Sagra y Alcalá de Henares, a las que se asocia un amplio Patrimonio Industrial.

La meteorización de la Unidad Salina deja un residuo insoluble de yeso pseudomórfico de glauberita y de anhidrita, así como disoluciones inter-estratales, pliegues, colapsos rellenos de sedimentos supra-yacentes, ejerce acción de presión de cristalización de sales, agresividad en armaduras metálicas, depósitos de sales... que han sido el origen de problemas geotécnicos en las obras ejecutadas al sur del área urbana de Madrid. Es común en esta zona de meteorización la presencia de eflorescencias de mirabilita, que aparecen y desaparecen en función de la humedad relativa ambiental. Los colapsos de la Unidad Salina, afectan a los depósitos fluviales y unidades del Cuaternario suprayacente, (WOLF *et al.* 2013). Estos problemas se han intentado solucionar mediante bombeo en aquellos niveles salinos situados por debajo del nivel freático, provocando auténticos vertederos de sales sulfatadas sódicas. En este sentido sería adecuado aislar o apantallar la Unidad Salina, y evitar las aguas de infiltración. Cuando las sales se encuentran sobre el nivel freático sería suficiente evitar la infiltración vertical o lateral.

Los yesos residuo insoluble de la Unidad Salina, a veces yesos de la Unidad Salina, por su origen no son una unidad litoestratigráfica s.s., y se pueden confundir con otras unidades yesíferas de la Unidad Intermedia de las que se diferencian bastante en cuanto a génesis y significación sedimentológica.

Falta aún, pues mucho trabajo, para definir correctamente la Unidad Salina, que contiene sales solubles fácilmente meteorizables, y que soporta la actividad de varios millones de personas, con una expansión incesante de infraestructuras y edificios, una importante actividad industrial y explotaciones mineras.

BIBLIOGRAFIA

- ANTUNES, M.T., CALVO, J.P., HOYOS, M., MORALES, J., ORDÓÑEZ, S., PAÍS, J. & SESE, C. 1987. Ensayo de Correlación Entre el Neógeno de las Áreas de Madrid y Lisboa (Cuencas Alta y Baja del Rio Tajo). *Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal*, 73, 112: 85-102.
- ARETIO Y LARRINAGA, A. 1873. Ciempozuelita, nuevo sulfato de cal y sosa encontrado en la Mina Consuelo (Ciempozuelos). *Anales de la Sociedad Española de Historia Natural*, 2: 393-396.
- BENAYAS, J., PÉREZ-MATEOS, J. & RIBA, O. 1958. Nouvelles observations sur la sédimentation continentale du bassin tertiaire du Tage. V Congrès Intern. Sédimentologie *Eglogae Geologicae Helveticae*, 51(3): 834-842.
- BOWLES, G. 1782. *Introducción a la Historia Natural y a la Geografía Física de España*. 2ª ed. En Madrid: en la Imprenta Real. 576 pp.
- CALDERÓN, S. 1895. Origen de la sal común y de los sulfatos de los terrenos terciarios lacustres de la Península. *Anales Sociedad Española Historia Natural*, XXIV: 341-356.
- 1910. *Los Minerales de España*. Junta para la Ampliación de Estudios e Investigaciones Científicas, Madrid, Imprenta Eduardo Arias. 2 tomos, 416 + 561 pp. [Reedición facsímil prologada, Sociedad Española de Mineralogía, 2000]
- CAÑAVERAS, J. C., CALVO, J. P., ORDÓÑEZ, S., MUÑOZ-CERVERA, M. C., & SÁNCHEZ-MORAL, S. 2020. Tectono - Sedimentary Evolution of the Madrid Basin (Spain) during the Late Miocene: Data from Paleokarst Profiles in Diagenetically Complex Continental Carbonates. *Geosciences*, 10(11): 433.
- CARAMÉS, M. LÓPEZ AGUAYO, F. & MARTÍN VIVALDI, J.L. 1973. Nota sobre la mineralogía del sondeo de Tielmes en el Terciario de la Cuenca del Tajo, *Estudios Geológicos*, vol. 29: 308-313.
- CASTELLS, J. Y DE LA CONCHA, S. 1951. *Mapa geológico de España, escala 1:50.000, Hoja nº 582 (Getafe)*. IGME, Madrid.
- EUGSTER H.P. & JONES B.F. 1979. Behavior of major solutes during closed-basin brine. *American Journal of Science*, 279: 609-631.
- EZQUERRA DEL BAYO, J. 1845. Indicaciones Geognósticas sobre las formaciones terciarias del Centro de España, *Anales de Minas*, Dirección General del Ramo, Imprenta de D. Antonio Yenes. Madrid. T. III, 301- 306.

- FÁBREGA, A. 2020. *Apuntes sobre la historia de la sal en España*. <https://www.academia.edu/42191201/Apuntes_sobre_la_historia_de_la_sal_en_Espa%C3%B1a> [Consulta: 9-2-2021].
- FUCUS, E. & LAUNAY, L de. 1893. *Traité de gîtes minéraux et metallifères*. Libraire Polytechnique. Baudryetc Editeurs. 2 t. 824 pp y 1016 pp.
- GÁMEZ, J. 1771. *Ensayo sobre las aguas medicinales de Aranjuez*. Impreso por D. Joachin Ibarra, Impresor de Cámara de S. M. Madrid.
- GARCÍA DEL CURA, M.A. 1979. Las Sales Sódicas, Calcosódicas y Magnésicas de la Cuenca del Tajo. Memoria de la Beca Fundación Juan March. 186 pp.. Resumen en Serie Universitaria, 109: 39 pp. Fundación Juan March. Madrid.
- 2019. Geología de los depósitos salinos de la Cuenca de Madrid. En Ayarzagüena Sanz, M., López Ciudad, J.F y Valiente Cánovas, S, (Eds) *Explotaciones Históricas de la Sal*. Ayuntamiento de Ciempozuelos 7-20
- GARCÍA-DEL-CURA, M.A. & ORDÓÑEZ S. 2018. Una polémica sobre la génesis del yeso del Cerro de los Ángeles (Madrid) en el siglo XX (1916-1918). En: *Ciencia y Técnica en la Universidad: Trabajos de Historia de las Ciencias y de las Técnicas*. Universidad de Alcalá. Servicio de Publicaciones, Madrid, pp. 119-128.
- GARCÍA DEL CURA, M. A, ORDÓÑEZ, S. & CALVO, J.P. 1986. La Unidad Salina (Mioceno) en el Área de Madrid. Características petrológicas y mineralógicas. *Boletín Sociedad Española de Mineralogía*, 9: 329-338.
- GARCÍA-DEL-CURA, M.A., BENAVENTE, D., CUEVAS, J. & ORDÓÑEZ, S. 2017. Minería y salinas de sulfato sódico en la cuenca de Madrid. Una revisión geológico-geoquímica. *XII Congreso Nacional y XI Ibérico de Geoquímica*. Linares (Jaén), 26 a 28 sept. 2017, 206-290.
- GARCÍA DEL CURA, M.A., ORDÓÑEZ, S., LOPEZ AGUAYO F. & MINGARRO, F. 1978. Sodic salts (SO₄= and Cl-) in the Tagus basin (Spain). Xth International Sedimentological Congress. Jerusalem t 1, 166-168. Jerusalem.
- GARRET, D.E. 2001. *Sodium Sulfate: Handbook of Deposits, Processing, Properties and Uses*. Academic Press. 384 pp.
- GROKHOVSKII, L.M. 1978. Glauberite as a source of Sodium sulfate, *Lithology & Mineral Resources*, Springer 12, 356-360.
- GUTIÉRREZ, F., PARISE, M., DE WAELE, J. & JOURDE, H. 2014. A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst, *Earth-Science Reviews*, 138: 61–88.
- HERNÁNDEZ-PACHECO, E. & ROYO GÓMEZ, J. 1916. Mineralogía, Geología, y Paleontología del Cerro de los Ángeles (Madrid). *Boletín Real Sociedad Española de Historia Natural*, 16: 536-539.
- IGME. 2017. http://www.igme.es/PanoramaMinero/actual/PANORAMA_MINERO_2017 (9-2-2021)
- IGME. 1971. *Mapa geológica de España. Escala 1:200.000*. Cátedra de Geodinámica Interna de la Universidad de Madrid. y División de Geología del IGME Síntesis de la Cartografía existente. 19 págs. 1 Mapa. Madrid.
- KADINKIZ, G. PEKGOZ, M. KARAKAŞ, M. & MURAT, A. 2017. Sodium sulfate (glauberite – blöedite) – halite association in the Tertiary (Upper Miocene – Pliocene) Katrandepetepe Form. Eregli-Bor Basin (Turkey) . *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 154: 135-156.
- KINDELÁN, V. & GARCÍA SIÑERIZ, J. 1928. *Estudios Geofísicos en las provincias de Madrid y Guadalajara*. En IGME (1928) *Memorias del IGME*, 249- 296, t.. 35. Datos para el estudio de la geología de la provincia de Madrid. Cuenca terciaria del Ato Tajo. Hoja número 560 Alcalá de Henares. 296 pp.
- KOLPAKOVA, M.N., GASKOVA, O.L. 2018. Major ions behavior during evaporation of different saline type water of Western Mongolian lakes (geochemical modelling). *Hydrology Research*, 49 (1): 163–176.
- LANAJA DEL BUSTO, J.M. 1987. *Síntesis de la geología y geofísica realizada en la exploración petrolera de la cuenca del Tajo*. Memoria Tesis Doctoral UPM , Madrid, 465 pp.
- LÓPEZ, P.L. & MANDADO, J.M. 2007. Experimental evaporation of superficial brines from continental playa–lake systems located in Central Ebro Basin (Northeast Spain). *Geological Society, London, Special Publications*, 285: 143-154.
- MARTIN CARDOSO, G., GARRIDO, J. & CUEVA, G. de la . 1931. El grupo estereocristalino de la glauberita. *Boletín Real Sociedad Española de Historia Natural*, 31: 547-552.
- MEGIAS, A. G., ORDÓÑEZ, S. & CALVO, J.P. 1980. Rupturas sedimentarias en series continentales: aplicación a la Cuenca de Madrid. *Actas X Congreso nacional de Sedimentología*, Salamanca, 2: 666-680.
- 1983. Nuevas aportaciones al conocimiento geológico de la Cuenca de Madrid. *Revista de Materiales y Procesos Geológicos*, 1, 163-192.
- MENÉNDEZ PIDAL, I., MANCEBO PIQUERAS, J.A., SANZ PÉREZ, E. & SAENZ SANZ, C. 2021. Influence of Hydro-geochemistry on Tunnel Drainage in Evaporitic Formations: El Regajal Tunnel Case Study (Aranjuez, Spain). *Sustainability*, 13(3), 1505: 2-25.
- MIÑANO, S. 1828. *Diccionario geográfico-estadístico de España y Portugal*. T.IX, 467 pp.
- MEGIAS, A.G., ORDÓÑEZ, S., CALVO, J.P. & GARCÍA DEL CURA, M.A. 1982. Sedimentos de flujo gravitacional yesíferos y facies asociadas en la Cuenca Neógena de Madrid. *Quinto Congreso Latinoamericano de Geología*, Argentina. Actas. II: 311-328.

- MUÑOZ-MARTÍN, A., CLOETINGH, S. A. P. L., DE VICENTE, G., & ANDEWEG, B. 1998. Finite-element modelling of Tertiary paleo stress fields in the eastern part of the Tajo Basin (central Spain). *Tectonophysics*, 300(1-4): 47-62.
- OBERMAIER, H., WERNERT, P. & PÉREZ DE BARRADAS, J. 1921. El cuaternario de las canteras de Vallecas (Madrid). *Boletín del Instituto Geológico y Minero*, 42: 305-332.
- ORDÓÑEZ, S., CALVO, J.P., GARCÍA DEL CURA, M.A., ALONSO ZARZA, A.M. & HOYOS, M. 1991. Sedimentology of sodium sulphate deposits and special clays from the Tertiary Madrid Basin (Spain). *Special Publication International Association Sedimentology*, 13: 39-55.
- ORDÓÑEZ, S. & GARCÍA DEL CURA, M.A. 1994. Deposition and diagenesis of sodium calcium sulfate salts in the Tertiary saline lakes in the Madrid Basin (Spain). In *Sedimentology and Geochemistry of Modern and Ancient Saline Lakes*, Last, W. M. & Renaut R. W. eds. Spec. Publication SEPM vol 50, Tulsa, 229-238.
- ORDÓÑEZ, S., FORT, R. & BUSTILLO, M. 1989. Caracterización geoquímica de la ruptura sedimentaria entre los yesos de la Unidad Salina e Intermedia de la Cuenca de Madrid. *Estudios Geológicos*, 45: 45-53.
- ORDÓÑEZ, S., LÓPEZ AGUAYO, F. & GARCÍA DEL CURA, M.A. 1977. Contribución al conocimiento de la mineralogía del yacimiento de sales de Villarrubia de Santiago (Toledo). *Estudios Geológicos*, 33: 167-172.
- ORTÍ, F. 2000. Unidades glauberíticas del Terciario Ibérico - Nuevas aportaciones. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 13 (2): 227-249.
- ORTÍ, F., PUEYO, J.J. & SAN MIGUEL, A. 1979. Petrogénesis del yacimiento de sales sódicas de Villarrubia de Santiago, Toledo (Terciario continental de la Cuenca del Tajo). *Boletín Geológico y Minero*, 94: 347-373.
- PARDILLO, F. 1934. Nueva investigación acerca de la estructura cristalina de la glauberita. *Memòries de l'Acadèmia de Ciències i Arts de Barcelona* vol. XXV, n° 1, Barcelona.
- 1935. La distribución atómica en la estructura cristalina de $(\text{SO}_4)_2\text{CaNa}_2$ (Glauberita). *Boletín de la Sociedad Española de Historia Natural*, 35: 333-350.
- PRADO, C. de. 1864. Descripción Física y Geológica de la Provincia de Madrid. Imprenta Nacional. Madrid. 352 pp.
- PUCHE RIART, O.; MAZADIEGO MARTÍNEZ, L.F.; JORDÁ BORDEHORE, L. & CARVAJAL GARCÍA, D. 2005. *El magnífico paisaje subterráneo de la mina Consuelo, Chinchón (Madrid): un paisaje cultural*. En: "2º Simposio sobre la Minería y Metalurgia históricas en el sudoeste europeo", 23-27 Junio 2004, Madrid.
- QUIROGA, F. 1890. Yeso pseudomórfico de calcita. *Actas de la Real Sociedad Española de Historia Natural*, XIX, 100.
- RODRÍGUEZ-ARANDA, J.P., CALVO, J.P. & ORDÓÑEZ, S. 1991. Transición de abanicos aluviales a evaporitas en el Mioceno del borde oriental de la Cuenca de Madrid (Sector Barajas de Melo-Illana). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 4: 33-50.
- ROYO GÓMEZ, J. 1917. Datos para la Geología de la Submeseta del Tajo. *Boletín de la Sociedad Española de Historia Natural*, 17: 519-527.
- 1922. *El Mioceno Continental Ibérico y su fauna malacológica*. Comisión de Investigaciones paleontológicas y prehistóricas. *Memorias del Museo Nacional de Ciencias Naturales*, 30. 230 pp.
- ROYO GÓMEZ, J. & MENÉNDEZ PUGET, L. 1928. Memoria Explicativa Mapa Geológico Alcalá de Henares, n° 560. 56 pp.
- SÁNCHEZ-MORAL, S., ORDÓÑEZ, S., BENAVENTE, D., & GARCÍA DEL CURA, M.A. 2002. The water balance equations in saline playa lakes: comparison between experimental and recent data from Quero Playa Lake (central Spain). *Sedimentary Geology*, 148(1-2): 221-234.
- SAN MIGUEL, A. & MONTOTO, M. 1971. Mineralogía y petrogénesis de los yacimientos salinos de Villarrubia de Santiago (Toledo). *I Congreso Hispano-Luso-Americano de Geología Económica*. Madrid-Lisboa 19-25 Septiembre. T.1, Sección 4. Investigación Minera, 315-316.
- SANZ-MONTERO, M. E., & RODRÍGUEZ-ARANDA, J. P. 2012. Magnesite formation by microbial activity: Evidence from a Miocene hypersaline lake. *Sedimentary geology*, 263: 6-15.
- SOMMEZ, I. 2014. Glauberite in Bozkir formation (Pliocene, Çankiri -Çorum Basin, Central Anatolia, Turkey). *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 149: 153-175.
- SULLIVAN, W. K., & O'REILLY, J. P. 1863. *Notes on the geology and mineralogy of the Spanish provinces of Santander and Madrid*. Williams & Norgate. London: 196 pp
- VICENTE, G. DE, CLOETINGH, S. A. P. L., VAN WEES, J. D., & CUNHA, P. P. 2011. Tectonic classification of Cenozoic Iberian foreland basins. *Tectonophysics*, 502(1-2): 38-61.
- VIDAL BOX, C. 1942. La línea morfo-tectónica meridional de la Sª del Guadarrama. *Boletín Real Sociedad Española Historia Natural*, 40: 117 – Basado en García Siñeriz (1933) Memorias del IGME. 1933.
- VILANOVA, J. 1875. Salinas de Villarrubia de Santiago. *Actas Sociedad Española Historia Natural* .T. 4 : 545-546.
- YEGROS, S. 1852. Apuntes sobre salinas. *Revista Minera*, III: 106-111; 129-152; 162-174; 197-204; 225-235; 257-267 y 289-304. (1853).
- 1853. Nuevos apuntes sobre salinas, *Revista Minera*, IV: 149-163; 171-181 y 193-201.
- WOLF, D., SEIM, A., DEL OLMO, F. D., & FAUST, D. 2013. Late Quaternary fluvial dynamics of the Jarama River in central Spain. *Quaternary International*, 302, 20-41.

