

Sequence Stratigraphy as a tool for water resources management in alluvial coastal aquifers: application to the Llobregat delta (Barcelona, Spain)

Desiré Gàmez Torrent

December 2007

APPENDIX V

PhD Thesis

Department of Geotechnical Engineering and Geo-Sciences (ETCG)
Technical University of Catalonia (UPC)

Supervisors:

Dr. J. Antonio Simó Marfà

Dr. Jesús Carrera Ramírez

Tutor:

Daniel Fernández García



HYDROGEOLOGY GROUP
TECHNICAL UNIVERSITY OF CATALONIA



geomodels
centre mixt d'investigació

Hydrogeochemistry
group



V.1 Estratigrafía y petrología del subsuelo precuaternario de la depresión de Barcelona

Parcerisa, D. ⁽¹⁾, Gámez, D. ⁽²⁾, Gómez-Gras, D. ⁽³⁾, Usera, J. ⁽⁴⁾, Simó, J. A. ⁽⁵⁾, Carrera, J. ⁽⁶⁾

¹ Departament d'Enginyeria Minera i Recursos Naturals (EPSEM). Universitat Politècnica de Catalunya, Av. Bases de Manresa 61-73, 08242 Manresa. E-mail: dparcerisa@emrn.upc.edu

² Institut Geomodels -Dep. Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica. Universitat Politècnica de Catalunya, Campus Nord. Edifici D2. C. Jordi Girona, 1-3. 08034 Barcelona. E-mail: desire.gomez@upc.edu

³ Unitat de Petrologia. Departament de Geologia. Universitat Autònoma de Barcelona, Campus UAB, 08193 Bellaterra, Barcelona. E-mail: david.gomez@uab.cat

⁴ Departament de Geologia, Facultat de Ciències Biològiques, Edifici A, Campus de Burjassot, C/ Dr. Moliner, 50, 46100 Burjassot (València).

⁵ ExxonMobil Upstream Reasearch Company. Houston, TX, USA.

⁶ Institut de Ciències de la Terra "Jaume Almera"-CSIC. C/ Lluís Solé Sabarís s/n, 08028 Barcelona.

Resumen: Las numerosas obras de Ingeniería Civil que se han realizado en los últimos años en la depresión de Barcelona (líneas de metro, AVE...) han permitido recabar mucha información sobre el subsuelo de esta área. En este trabajo se caracterizan las distintas unidades de subsuelo precuaternarias que aparecen en los numerosos sondeos realizados recientemente en el área de la depresión de Barcelona. Concretamente, se ha identificado un zócalo Triásico formado por areniscas del *Buntsandstein* y dos unidades de edad Miocena, una basal de carácter continental y otra a techo depositada en un ambiente marino. Todas estas unidades son fosilizadas en primer lugar por los sedimentos del Plioceno y finalmente por el Cuaternario. El análisis de las distintas unidades permite obtener datos sobre la evolución paleogeográfica y tectónica de la depresión de Barcelona durante el Neógeno, el Plioceno y el Cuaternario.

Palabras clave: depresión de Barcelona, Mioceno, estratigrafía, petrología, paleogeografía

Introducción

En los últimos años la geología de la depresión de Barcelona ha sido objeto de gran atención debido a las numerosas obras de gran envergadura que la han atravesado. Evidentemente, el interés por la geología de la depresión de Barcelona no es un fenómeno reciente puesto que ha sido motivo de numerosos estudios desde principios del siglo XX (Almera, 1891; Llopis, 1942a, 1946; Solé-Sabarís, 1957, 1963). En lo que se refiere a la geología del subsuelo, esta se empezó a establecer hacia los años

60 (MOP, 1966; Llamas y Molist, 1967). Más recientemente se han publicado estudios en detalle que han avanzado sensiblemente en la descripción de aspectos sedimentológicos, paleontológicos, geoquímicos e hidrogeológicos del subsuelo de la zona (Custodio et al. 1976; Bayó et al. 1976 y 1977; Candela 1980; Custodio y Queralt 1981; Subirana 1983; Serra y Verdaguer 1983; Custodio et al. 1983; Domènech et al. 1983; Marquès 1984; Manzano 1986-1987 y 1991). Estos estudios siempre se han centrado en los sedimentos cuaternarios de los deltas del Besós y del Llobregat, ya que los acuíferos cuaternarios son los que abastecen de agua el área metropolitana de Barcelona. Respecto al subsuelo precuaternario, Marquès (1984) denomina al sustrato infrayacente del Cuaternario "*fetge de vaca*" debido a su carácter arcilloso y su color grisáceo, atribuyéndole una edad pliocena (Magné, 1978); además también identifica un sustrato de edad indeterminada en sondeos localizados en el margen izquierdo del río Llobregat (Zona Franca). El análisis de los sondeos realizados a tenor de las obras ejecutadas en estos últimos años en la depresión de Barcelona ha permitido avanzar en el conocimiento de su subsuelo precuaternario. El presente artículo se centra esencialmente en la caracterización del sustrato infrayacente al Cuaternario en el margen izquierdo del Llobregat, para ello se presenta el resultado del análisis de diversos sondeos que atraviesan totalmente el Cuaternario, se individualizan y describen las facies y la petrología de las distintas unidades litoestratigráficas con una doble finalidad: por un lado, aportar nuevos parámetros a la comprensión de la geometría de las estructuras de subsuelo de la depresión de Barcelona y, por otro lado, establecer la evolución paleogeográfica de la depresión de Barcelona durante el Cenozoico.

Metodología

Para la realización de este estudio se han correlacionado estratigráficamente un total de 133 sondeos realizados en el margen izquierdo del río Llobregat (fig. 1). Se han descrito en detalle 33 sondeos y tomado muestras de unos 17 sondeos (fig. 1). Se han realizado 25 láminas delgadas de 11 sondeos diferentes (fig. 1). Se ha efectuado difracción de Rayos X en 33 muestras en los laboratorios del Centre de Géosciences de l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris. Asimismo se han analizado 33

muestras de agregados orientados para la determinación de los minerales de la arcilla. La separación de los minerales de la arcilla ha sido realizada por métodos de suspensión.

Cinco muestras de arenas, arenas limosas y margas precuaternarias de cuatro sondeos (SIT-4, SIT-16bis 2, SRB-2, I2+580, fig. 1) fueron seleccionadas para la determinación de la edad mediante la identificación de los foraminíferos. La preparación de la muestra consistió en la disgregación de los sedimentos mediante agua destilada. Una vez seca la muestra, se tamizaron 10 gr a diámetros de 0.5; 0.2 y 0.062 mm. Este tipo de tratamiento permite conservar la mayoría de individuos que son más frágiles, como los foraminíferos calcáreos y también permite retener los especímenes más pequeños.

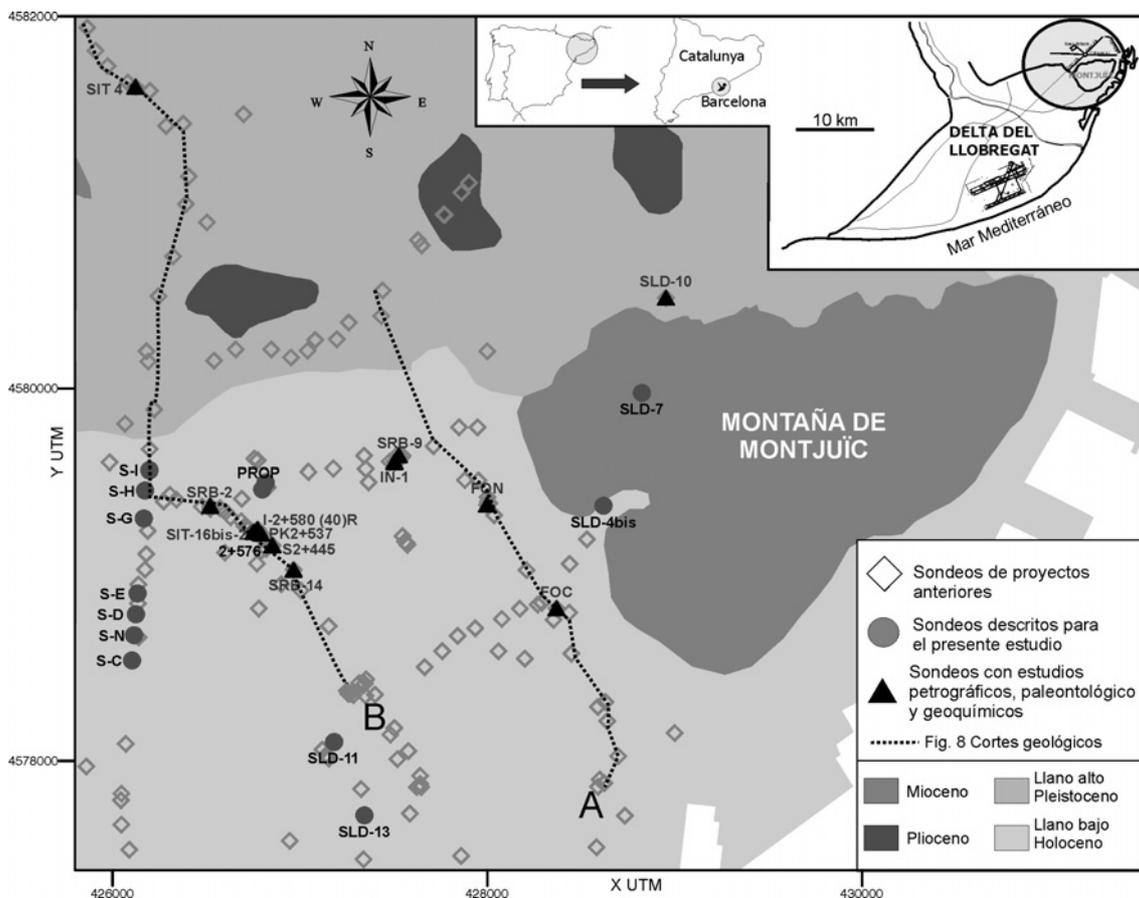


Figura 1: Situación geográfica (arriba derecha) y geológica del área de estudio. En símbolos se muestra la localización de los sondeos utilizada en el presente trabajo. Los rombos representan sondeos anteriores al presente estudio, los círculos sondeos descritos en este estudio, los triángulos rellenos sondeos descritos en este estudio y muestreados para el análisis petrográfico, paleontológico y geoquímico.

Contexto Geológico

La depresión de Barcelona constituye una zona de transición entre los horsts de Garraf, Collserola y Montnegre al NW y el graben de Barcelona al SE. El límite con dichas estructuras lo constituyen sendas fallas normales: la falla de Tibidabo al NW tiene un salto hectométrico y separa los horsts de Garraf, Collserola y Montnegre de la depresión de Barcelona; la falla de Barcelona al SE tiene un salto de unos 6 km y separa la depresión de Barcelona del graben de Barcelona. Estructuralmente, la depresión de Barcelona constituye una zona de enlace entre los horsts de Garraf, Collserola y Montnegre y el graben de Barcelona. Su estructura geológica es relativamente compleja, puesto que está formada por diversas unidades tectónicas menores afectadas por fallas normales con un salto decamétrico (fallas dels Turons y del Morrot). Todo este conjunto de fallas tiene una orientación general NE-SW (Llopis, 1942b; Solé Sabarís, 1963; Medialdea Vega y Solé Sabarís, 1973; Alonso et al., 1977; Roca y Casas, 1981). Des del alto de Collserola hasta el mar Mediterráneo se distinguen las siguientes unidades: 1) Las depresiones de Sarriá y Vall d'Hebron (Llopis, 1942b) se sitúan al pie del alto de Collserola y están controladas por la falla de Tibidabo. Estas dos depresiones rellenadas de sedimentos cuaternarios están separadas del resto de la depresión de Barcelona por el bloque basculado dels Turons; 2) El bloque basculado dels Turons (Monteroles, Putxet, Vallcarca, Carmel) está formado esencialmente por metapelitas del Ordoviciense y del Siluriense y por rocas carbonáticas siluro-devonianas; 3) La depresión de Barcelona sensu stricto está limitada por la falla dels Turons al NW y por la falla de Barcelona al SE (Llopis, 1942b; Roca y Casas, 1981) esta depresión tiene más de 300 m de espesor y ha sido rellenada por sedimentos marinos del Plioceno y por depósitos continentales del Cuaternario (Almera, 1894; Llopis, 1942b; Solé Sabarís, 1963b; Alonso et al., 1977; Roca y Casas, 1981); 4) El bloque basculado de Montjuïc está delimitado al SE por la falla del Morrot y al N por una falla menor orientada E- W (Roca y Casas, 1981).

El relleno cuaternario del área de estudio está ligado al delta del Llobregat e integra dos unidades geomorfológicas, el Llano alto y el Llano bajo, las cuáles están separadas por un escarpe (Casassas y Riba 1992; fig. 1). El Llano alto consiste en depósitos intercalados de limos rojos, arcillas grises y amarillas, gravas poco

seleccionadas con clastos sub-angulosos, arenas finas bien seleccionadas y horizontes bien desarrollados de páleosuelos y costras carbonatadas (Casassas y Riba, 1992). Estos depósitos se interpretan como facies de abanicos aluviales y su arquitectura esta controlada por ciclos glacioeustáticos durante el Pleistoceno. Esta unidad descansa discordantemente encima de materiales Paleozoicos a Pliocenos y presenta una potencia irregular (inferior a 20 m), probablemente el relleno aluvial fue controlado por fallas activas durante el Cuaternario (Ventayol et al., 2002; Perea, 2006).

El Llano Bajo es la depresión que forman los actuales deltas del Llobregat y del Besòs (fig. 1). La geología superficial del delta se empezó a estudiar a finales del siglo XIX por Almera (1891), Llopis (1942a, 1946) y Solé-Sabarís (1957, 1963). La *Comisaria d'Aigües del Prepirineu Oriental* fue la primera en describir las unidades hidrogeológicas en de la llanura deltaica (MOP, 1966). Marques (1984) estableció dos complejos detríticos cuaternarios en el delta del Llobregat basados en análisis litológicos y faunísticos, el Complejo Deltaico de edad holocena y el Complejo Detrítico Inferior de edad pleistocena. Estudios posteriores realizados a partir de perfiles sísmicos realizados a mar permitieron reconocer 4 unidades deltaicas (Medialdea et al., 1986; Medialdea et al., 1989). Las tres unidades más antiguas se correlacionan con el Complejo Detrítico Inferior descrito en la llanura deltaica (Simó et al., 2005; Gàmez, 2007) y la unidad sísmica más moderna se relaciona con el Complejo Deltaico (Medialdea et al., 1986; Checa et al., 1988; Medialdea et al., 1989).

Estratigrafía y petrología de los sondeos

Los sondeos analizados en este trabajo han sido realizados en diferentes áreas del delta del Llobregat (fig. 1). La parte más superficial del sondeo corresponde siempre a los materiales cuaternarios del delta del Llobregat. Desde el punto de vista litoestratigráfico se han identificado 5 unidades diferentes en función de los distintos tipos de materiales que aparecen por debajo de dicho Cuaternario.

Unidad de Dolomicritas

Las dolomicritas aparecen como la parte basal del sondeo SIT-4 (fig. 1). Estas dolomicritas pueden presentar algún fragmento de crinoideo y están muy fracturadas, el relleno de las fracturas suele ser de óxidos de hierro o de calcita. Esta formación tiene

una potencia de más de 21 m y se halla entre 40 y 62 m de profundidad respecto a la superficie. Esta unidad constituye el zócalo paleozoico y se correlaciona con las rocas carbonáticas siluro-devonienses que afloran en el bloque basculado dels Turons. El zócalo paleozoico es diverso y su caracterización no es el objeto de este estudio.

Unidad de Areniscas Rojas

Estos materiales se hallan en el área de Amadeu Torner en la Zona Franca (fig. 1) y siempre se encuentran en la parte más profunda de los sondeos pk2+537, pk2+576, SRB-14 y S2+445, SIT-16 bis2 y I2+580 (fig. 1). La Unidad de Areniscas Rojas está formada por areniscas rojas bien cementadas. Esta formación puede llegar a tener más de 23 m de potencia y el techo de la unidad se ha detectado a profundidades de 28 a 46 m respecto al nivel del mar sin haber llegado a su base. Litológicamente, está formada por ciclos granodecrecientes de conglomerados con cantos de cuarzo y areniscas gruesas a medias con estratificación cruzada (fig. 2). Esta formación puede presentar numerosas fracturas que pueden estar rellenas de arcilla roja o bien de cemento de cuarzo. En uno de los sondeos (S2+445, fig. 1) se preservan marcas de exposición subaérea en el techo de esta formación en forma de marcas poligonales en las paredes de las fracturas producto de la calcificación de raíces de plantas.

Petroológicamente, las areniscas y conglomerados están moderadamente seleccionados, son cuarzoarenitas/cuarzoruditas formados casi exclusivamente por clastos de cuarzo subangulares a subredondeados que presentan sobrecrecimientos de cuarzo marcados por un *pore-lining* ferruginoso. Los contactos entre granos son concavo-convexos y aun queda preservada parte de la porosidad primaria intersticial (fig. 3).

El análisis semicuantitativo de Rayos X en muestra total y en agregados orientados indica un alto porcentaje de cuarzo (90%), el resto de componentes de la roca son minerales de la arcilla, esencialmente esmectita e illita con pequeñas cantidades de caolinita (fig. 4).



Unidad de Areniscas Rojas



Unidad de Brechas y Arcillas Rojas



Unidad de Brechas y Arcillas Ocre



Unidad de Areniscas Ocre y Blancas



Unidad de Areniscas y Limos Marrones



Unidad de Limos y Arcillas Amarillas y Grises

Figura 2: Fotos de los sondeos donde se muestra el aspecto de las distintas unidades identificadas en este estudio.

Unidad de Brechas y Arcillas Rojas

Esta unidad se halla en el área de Plaza Cerda-Foneria en la Zona Franca y se encuentra en la parte más profunda de los sondeos SRB-9, CERDA, IN-1, FON (fig. 1). La Unidad de Brechas y Arcillas Rojas se caracteriza por la presencia de una formación de brechas, limos y arcillas rojas sin cementar. Esta formación puede tener más de 27 m de potencia y su techo aparece a profundidades de entre 43 a 52 m respecto al nivel del mar sin haber llegado a la base de la formación. Litológicamente la base de esta formación se caracteriza por la presencia de ciclos granodecrecientes de entre 1 y 2 m de potencia, estos ciclos presentan la base erosiva y empiezan con brechas formadas

por una matriz roja arcillosa y cantos metamórficos de algunos centímetros de diámetro (fig. 2), el diámetro de los cantos disminuye progresivamente y la proporción de arcilla roja aumenta hasta que, a techo de los ciclos dominan las arcillas rojas con algún canto aislado. En algunas partes de los sondeos estos ciclos están incompletos y se amalgaman formando estratos de varios metros de potencia. En los últimos 13 m de esta formación predominan las arcillas de color rojo, marrón o gris con algún nivel rico en microfauna y alguna intercalación de limos y areniscas.

Petrologicamente, los sedimentos arenosos y conglomeráticos son inmaduros presentando una mala selección con cantos subangulares envueltos en una matriz arcillo-ferruginosa. El esqueleto está formado por fragmentos de roca metamórfica, cuarzo (que a veces procede del *Buntsandstein* ya que tiene sobrecrecimientos de cuarzo heredados) chert y se puede clasificar como litarenita/litarudita (fig. 3). Localmente estos sedimentos aparecen cementados por calcita.

El cuarzo (30 a 50%) es el mineral más importante en los análisis de Rayos X en muestra total; además, también hay minerales de la arcilla (35 a 40%) y cantidades variables de calcita (0 a 35%) y hematites (0 a 5%). La illita (80%) es el mineral de la arcilla característico de esta unidad, acompañada de un 20% de caolinita (fig. 4).

Unidad de Brechas y Arcillas Ocreas

Estos materiales yacen en el norte del área (Collserola) y se encuentran en la parte más profunda de los sondeos. Se caracterizan por una potente formación de brechas con matriz arcillosa de color ocre a rojo (fig. 2). Esta formación puede llegar a tener más de 39 m de potencia y se encuentra a profundidades de entre 26 y 65 m respecto a la superficie. Litológicamente, esta constituida por capas métricas de brechas masivas donde dominan los cantos de fragmentos de roca metamórfica con algún canto aislado de granitoide. La granulometría varía entre las diferentes capas desde brechas pudiéndose encontrar capas donde dominan los cantos de 3 a 5 cm de diámetro hasta capas de arena gruesa a media.

Petrologicamente, los sedimentos arenosos y conglomeráticos son inmaduros presentando una mala selección con cantos subangulares envueltos en una matriz arcillosa, a veces arcillo-ferruginosa. El esqueleto está formado sobretudo por

fragmentos de roca metamórfica con algun clasto de dolomicrita, cuarzo y de feldespatos potásico y se puede clasificar como litarenita/litarudita.

Unidad de Areniscas Ocre y Blancas

Esta unidad aparece tapizando a las unidades anteriores y compone el sustrato más extenso del margen este del delta del Llobregat. Esta unidad se ha descrito para los sondeos FOC, FOC, SLD-10, SLD- 7, SLD-4 bis2, pk2+537, pk2+576, SRB-14 y S2+445, SIT-16 bis2 y I2+580 (fig. 1). Se caracteriza por la presencia de arenas y limos con cementación variable y matriz arcillosa de color blanco a ocre (fig. 2). La potencia máxima de la formación de areniscas y limos con matriz blanca a ocre es de 40 m aunque puede tener solo 5 m, el techo de la unidad aparece entre 56 y 30 m respecto al nivel del mar. Litológicamente, esta formada por capas de 1 a 5 m de arenas bien seleccionadas con alguna intercalación centimétrica a decimétrica de gravas y limos. Petroológicamente, las areniscas son submaduras con una selección buena a moderada, clastos subredondeados a redondeados y, a veces, presencia de matriz arcillosa (fig. 3). El esqueleto está formado por cuarzo, feldespatos potásico, fragmentos de roca metamórfica y, como accesorios, fragmentos de bivalvos y gasterópodos, plagioclasa, mica y epidota. Se puede clasificar entre arcosa y sublitarenita. La cementación es variable tanto dentro de un mismo sondeo (en los sondeos SLD 7 y 10 la cementación se pirdede en profundidad; fig. 1) como arealmente, de manera que hay zonas donde esta unidad no está cementada (zona adyacente a los sondeos IN-1 y FON; fig. 1) y otras fuertemente cementadas (zona adyacente a los sondeos Pk2+576 y SIT-16 bis 2; fig. 1). Los principales cementos son los sobrecrecimientos de feldespatos potásico, diagnósticos de esta unidad y los sobrecrecimientos de cuarzo. Localmente también se han observado cementaciones de calcita formando nódulos centimétricos.

Des del punto de vista geoquímico esta unidad se caracteriza por la presencia de cantidades elevadas de cuarzo (>50%), juntamente con minerales de la arcilla (10 a 30%), feldespatos potásico (0 a 15%) y, de forma localizada, calcita y trazas de alunita (fig. 4). Los minerales de la arcilla característicos de esta unidad son la caolinita, que se encuentra usualmente en porcentajes superiores al del resto de unidades (>25%), y la illita (>30%), además de cantidades variables de esmectita, interestratificados y, localmente, clorita (fig. 4).

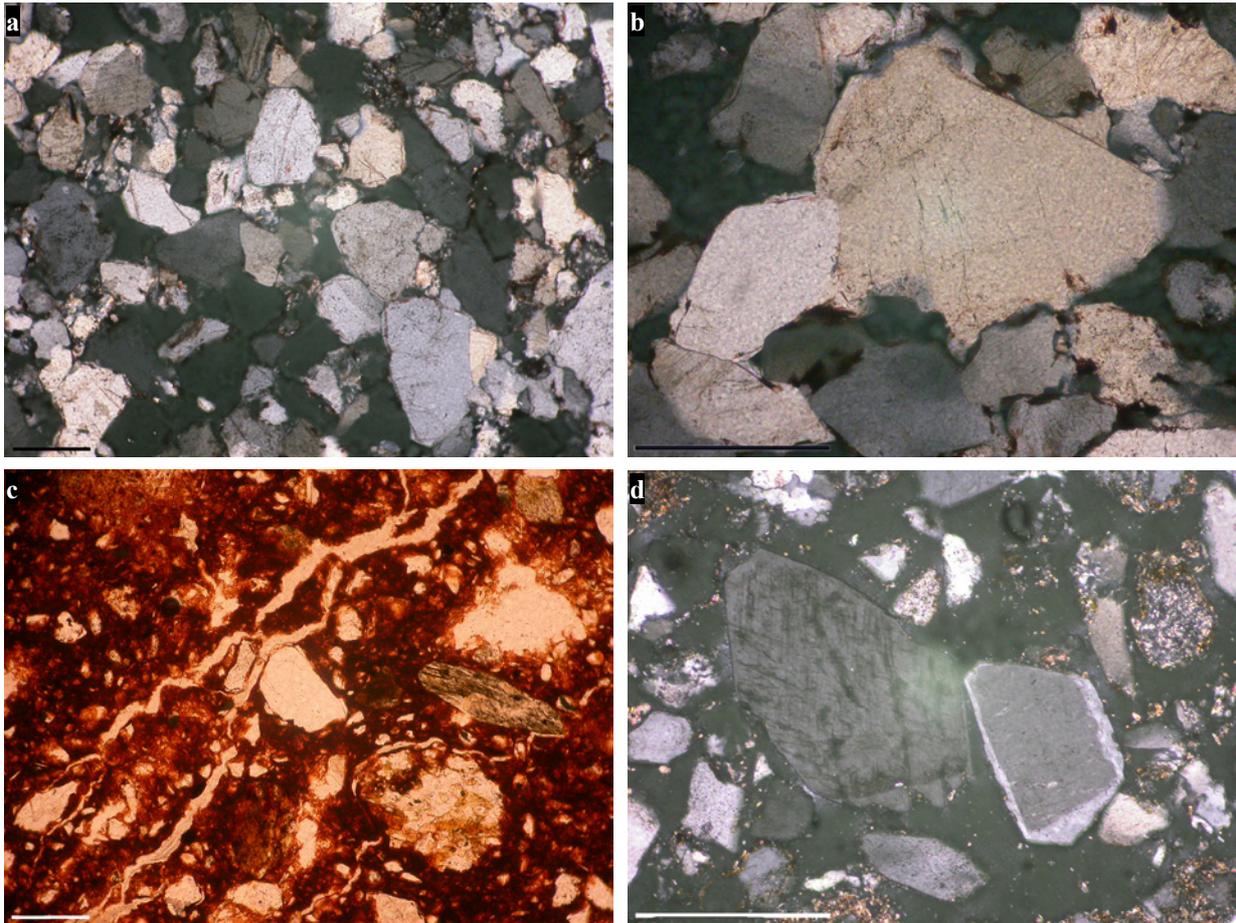


Figura 3: a) Aspecto general de la cuarzoarenita de la Unidad de Arenisca Rojas. Escala 500 micras. Nícoles cruzados; b) Detalle de contactos concavo-convexos y cementos de cuarzo sintaxiales asociados en la Unidad de Areniscas Rojas. Escala 250 micras. Nícoles cruzados; c) aspecto general de la Unidad de Brechas y Arcillas Rojas, se observa la matriz arcillosa y diversos granos de cuarzo con cementos sintaxiales heredados (centro) y un fragmento de roca metamórfica. Escala 500 micras. Nícoles paralelos; d) Detalle de la Unidad de Areniscas Ocre y Blancas con feldspatos que presentan cementos sintaxiales aunque la cementación general de la roca es escasa. Escala 250 micras. Nícoles cruzados.

Unidad de Areniscas y Limos Marrones

Se encuentra en la zona de Collserola (SIT-4, fig. 1). Tapizando la Unidad de Brechas y Arcillas Ocre, aparece una formación de arenas y limos marrones bien seleccionados y poco cementados, la cual tiene una potencia de entre 11 y 23 m que se puede encontrar a profundidades de entre 8 y 29 m respecto de la superficie. Litológicamente, estos materiales se organizan en capas de orden decimétrico donde dominan las arenas finas a medias de color ocre (fig. 2) con alguna intercalación de gravas y limos, estos últimos pueden contener microfauna.

Petrologicamente, son areniscas submaduras con una selección moderada, clastos subredondeados y matriz arcillosa o carbonática. El esqueleto está formado por fragmentos de roca metamórfica, biotita y cantidades menores de cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa y fósiles. Se pueden clasificar como litarenitas.

Unidad de Limos y Arcillas Amarillas y Grises

Estos materiales se encuentran encima de la mayoría de las unidades anteriores, y aparecen hacia el centro del área de estudio. Se han descrito en los sondeos S-I, S-H, S-G, S-E, S-D, S-N, PROP, SIT-24b, SRB-2, pk2+537, pk2+576, SIT-16 bis2 y I2+580 (fig. 1). Hacia base de los sondeos se observa una importante potencia de margas a margas arenosas de coloraciones grisáceas con abundantes restos de fauna, estas margas han sido clásicamente denominadas como “fetge de vaca” (fig. 2). La potencia máxima perforada en estos materiales ha sido de 40 m aunque hacia los márgenes del delta puede tener unos 8 m de potencia. El techo de la unidad aparece entre 40 y 20 m respecto el nivel del mar. En ninguno de los sondeos realizados más hacia el centro del delta del Llobregat se ha llegado a la base de esta unidad. Hacia techo, esta unidad adquiere una coloración amarillenta con indicios de costras carbonatadas y óxidos de hierro (fig. 2).

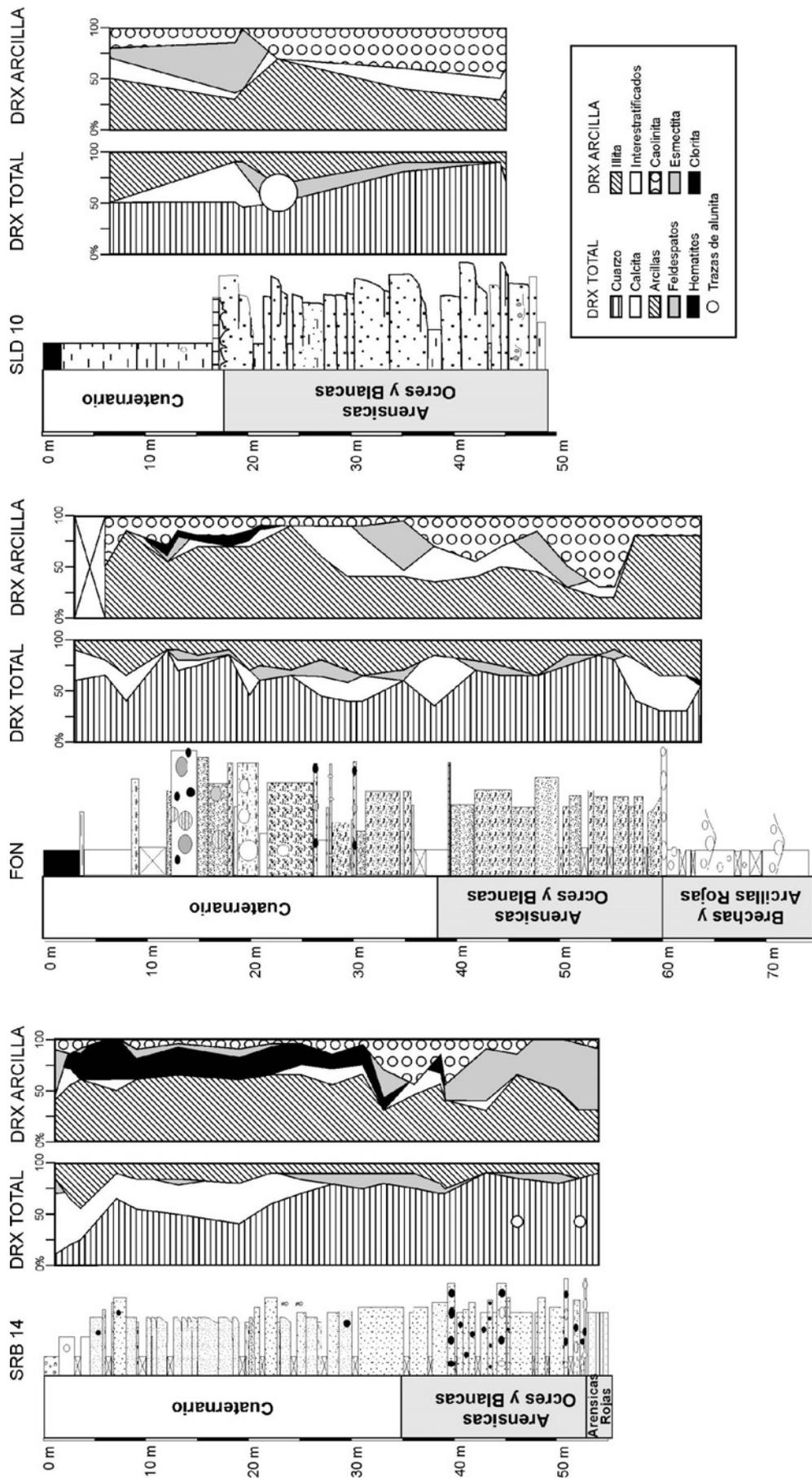


Figura 4: Composición mineralógica total y de los minerales de la arcilla de las distintas unidades de la depresión de Barcelona. El análisis semicuantitativo se ha realizado a partir de diagramas de Rayos X totales y de agregados orientados.

Cronostratigrafía

El estudio de los foraminíferos terciarios de los afloramientos situados en los alrededores de Barcelona ha sido realizado por diferentes autores, desde mediados del siglo pasado. Los primeros trabajos son de Colom y Bauzá (1945) sobre muestras recolectadas en los niveles margosos 5, 6 y 8 del corte dado por Faura y Sans (1917). En él se citan 28 especies de foraminíferos bentónicos y planctónicos y, aunque no se precisa su edad dentro del Mioceno, parece tratarse por el tipo de asociación del Langhiense-Serravaliense. El siguiente trabajo corresponde a Magné (1978), remuestreando el corte clásico, ya modificado por la actuación urbanística, determina sesenta especies de foraminíferos, catorce de las cuales son planctónicas y a partir de las mismas atribuye estos niveles a la zona N 16 de Blow (1969), Tortoniense. Por último, Gómez-Gras *et al.* (2001) atribuyen los materiales de la serie de Montjuïc al Serravaliense, biozonas N9-N10 de Blow (1969). En este caso el estudio se basa en las muestras recogidas en tres niveles o unidades litoestratigráficas: Morrot, Castell y Miramar. En ellas se han identificado 32 especies de foraminíferos y a partir de la presencia de *Globorotalia archaeomenardii* se asignan a estos niveles una edad Serravaliense.

Por lo que respecta a los sondeos analizados en este trabajo, se han identificado 68 especies de foraminíferos bentónicos y 9 de planctónicos en las muestras SIT-4:15.7, SIT-16bis2: 21, 28.8, SRB-2: 18 (tabla 1). La asociación de foraminíferos corresponde a un ambiente de aguas cálidas donde tanto las especies bentónicas como las planctónicas llegan a alcanzar sus desarrollo ontogenéticos finales. Tal es el caso de *Globigerinoides sacculifer* (Brady) que está presente en todo su desarrollo, incluida la morfología *Globigerinoides trilobus* de sus fases iniciales (Hemleben *et al.*, 1988). Faltan en esta asociación el conjunto de especies del género *Globorotalia* (*G. peripheroacuta*, *G. pephoreronda*, *G. praefohsi*, *G. fohsi*, *G. mayeri*, etc) empleadas en las zonaciones de Blow (1969), Kennet (1973) y Srinivasan y Kennett (1981). La razón podría estar ligada a la escasa profundidad de la cuenca en este punto, no permitiendo el ciclo biológico de estas especies u otras ya citadas en la zona, como *Globorotalia archaeomenardi* Bolli

(Gómez-Gras, *et al.*, 2001), o *Globorotalia* gr. *scitula* y *G. cf. cultrata menardii* que fueron identificadas por Magné (1978) en estos niveles.

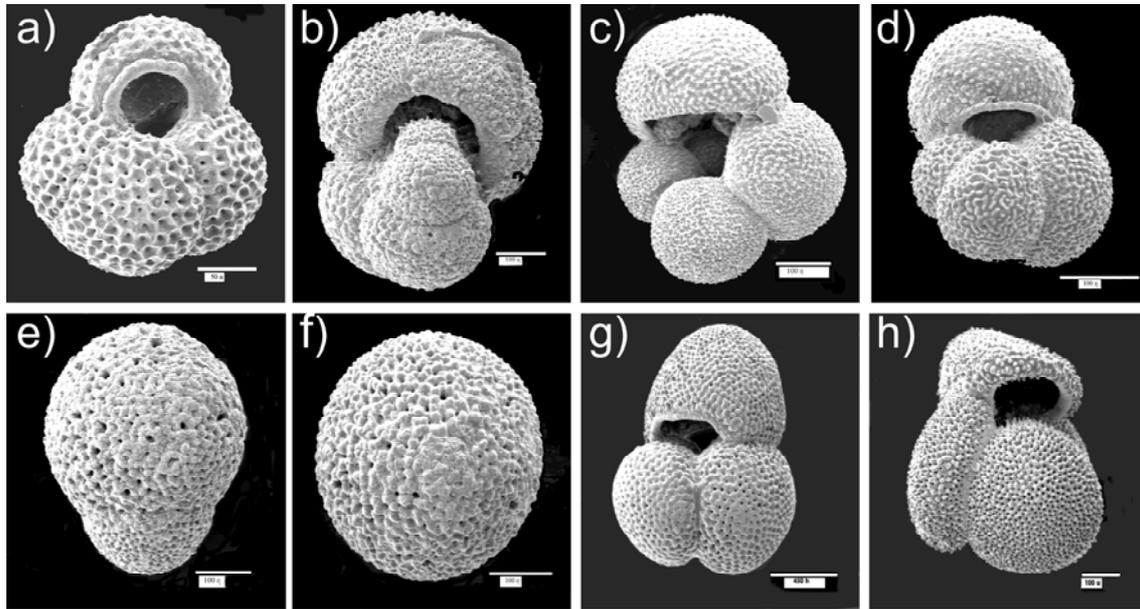


Figura 5: Especies de foraminíferos representativas de la asociación miocena langhiense-serravaliense: *especie*, escala de la barra, muestra. a) *Globigerina decoraperta* Takayanagi & Saito, 50 μ , SRB 2: 18,2-18,3; b) *Globigerinella aequilateralis* (Brady), 100 μ , I 2+ 580 31; c) *Globigerina bulloides* D'Orbigny, 100 μ , SIT 16 bis 28.8; d) *Globigerina falconensis* Blow, 100 μ , SIT 16 bis 28.8; e) *Orbulina univversa* D'Orbigny, 100 μ , SIT 16 bis 28.8; f) *Orbulina suturalis* Brönnimann, 100 μ , SIT 16 bis 28.8; g) *Globigerinoide sacculifer* (Brady), 450 μ , SIT 16b 2-21; y h) *Globigerinoides obliquus* Bolli, 100 μ , I2+580 31.

Las muestras tomadas en la Unidad de Areniscas Ocre y Blancas y en la Unidad de Areniscas y Limos Marrones (fig. 6) han sido datad como Langhiense-Serravalliense (Tabla 1), mientras que las muestras tomadas en la Unidad de Limos y Arcillas Amarillas y Grises (fig. 6), tal y como era de esperar, han arrojado una edad Pliocena (Tabla 1). La muestra tomada en el techo de la Unidad de Limos y Arcillas Amarillas y Grises del sondeo SRB-12 (fig. 6) ha sido datada como Langhiense-Serravalliense (Tabla 1) y se interpreta, por su localización, que en realidad refleja el retrabajamiento de materiales de la Unidad de Areniscas Ocre y Blancas (Tabla 1 y fig. 6).

Tabla 1: Especies de foraminíferos planctónicos y bentónicos encontrados en diferentes sondeos del delta del Llobregat y de la depresión de Barcelona. En la figura 6 se puede observar en que sondeo y en que unidad se han recolectado las muestras analizadas.

Sondeo	SRB-2	SIT-16 bis2		I2+580	SIT-4
Profundidad (m)	18.2	21	28.8	31	15.7
UNIDAD LITOESTRATIGRÁFICA	Limos y Arcillas Amarillas y Grises	Limos y Arcillas Amarillas y Grises	Areniscas Ocre y Blancas	Limos y Arcillas Amarillas y Grises	Areniscas y Limos Marrones
EDAD	Langhiense-Serravallense	Plioceno medio	Langhiense-Serravallense	Plioceno medio	Langhiense-Serravallense
Bentónicos					
<i>Allomophina trigona</i>		x			
<i>Ammonia beccarii</i>	x				x
<i>Ammonia beccarii inflata</i>					x
<i>Ammonia beccarii puntogranosa</i>		x			
<i>Amphycorina scalaris</i>				x	
<i>Angulogerina sp.</i>					x
<i>Asterigerina planorbis</i>					x
<i>Bigerina nodosaria</i>	x				x
<i>Bolivina antiqua</i>			x		x
<i>Bolivina arta</i>	x				x
<i>Brizalina alata</i>	x		x	x	
<i>Brizalina spathulata</i>					x
<i>Bulimina alazanensis</i>					x
<i>Bulimina elongata</i>	x				x
<i>Bulimina marginata</i>	x		x	x	
<i>Cancris auricula</i>	x		x		x
<i>Cassidulina laevigata</i>	x		x		x
<i>Chrysalogonium sp.</i>	x				
<i>Cibicidoides cullebergi</i>	x				
<i>Cibicidoides ungerianus</i>					x
<i>Cyclamina latidorsata</i>			x		
<i>Dentalina leguminiformis</i>			x		
<i>Dorothia brevis</i>	x				
<i>Dorothia gibosa</i>	x				
<i>Elphidium crispum</i>					x
<i>Elphidium macellum</i>					x
<i>Fursenkoina schreiberiana</i>	x				x
<i>Globobulimina pyrula</i>	x	x	x	x	
<i>Globocassidulina oblonga</i>			x		x
<i>Gyroidinoides umbonatus</i>			x		x
<i>Hanzawaia boueana</i>					x
<i>Heterolepa dertonensis</i>	x	x	x	x	x
<i>Heterolepa dutemplei</i>					x
<i>Heterolepa floridana</i>			x	x	
<i>Heterolepa perlucida</i>	x				
<i>Hopkinsina bononiensis</i>	x				x
<i>Lenticulina calcar</i>	x	x	x	x	x
<i>Lenticulina cultrata</i>	x		x		
<i>Lenticulina dilecta</i>					x
<i>Lenticulina gibba</i>			x		
<i>Lenticulina peregrina</i>			x		
<i>Lenticulina sp.</i>	x				
<i>Lobatula lobatula</i>	x				x
<i>Marginulina costata</i>	x		x	x	x
<i>Marginulina glabra</i>		cf			
<i>Marginulina subbullata</i>					x
<i>Martinottiella communis</i>	x	x	x		x
<i>Melonis barleeaunum</i>					x
<i>Melonis pompilioides</i>	x	x		x	
<i>Neoeponides schreibersii</i>	x				
<i>Nodosaria acuminata</i>	x		x		x
<i>Nodosaria radícula</i>			x		
<i>Nonion commune</i>	x	x	x	x	x
<i>Oridorsalis umbonatus</i>			x		x
<i>Orthomorphina tenuicostata</i>	x	x			
<i>Praeglobobulimina pupoides</i>			x		
<i>Pullenia bulloides</i>	x	x	x	x	x
<i>Reussella spinulosa</i>					x
<i>Rosalina obtusa</i>					x
<i>Sphaeroidina bulloides</i>	x				x
<i>Textularia abbreviata</i>			x		
<i>Textularia gramen</i>	x	x			x
<i>Textularia mariae</i>	x	x			
<i>Textularia sagitula</i>	x	x	x	x	x
<i>Uvigerina peregrina</i>	x	x	x	x	x
<i>Valvulineria bradyana</i>	x	x	x	x	x
Plantónicos					
<i>Globigerina bulloides</i>	x		x	x	
<i>Globigerina decoraperta</i>	x			x	x
<i>Globigerina falconensis</i>		x	x		
<i>Globigerinella aequilateralis</i>	x		x	x	x
<i>Globigerinoides obliquus</i>	x	x	x	x	x
<i>Globigerinoides sacculifer</i>	x	x	x		x
<i>Globigerinoides sicanus</i>	cf.	cf.			
<i>Orbulina suturalis</i>			x		
<i>Orbulina universa</i>	x	x	x	x	x

Distribución y correlación entre las unidades descritas

A partir de la distribución en planta de las unidades definidas en el apartado de estratigrafía y petrología, se han podido diferenciar principalmente dos áreas. La primera área se localiza en la llanura del delta del Llobregat, hacia el sur de la zona de estudio (figs. 6 y 7). Esta área está compuesta por las unidades de Areniscas Rojas, Brechas y Arcillas Rojas, y Areniscas Ocre y Blancas. La segunda área se sitúa al norte de la zona de estudio y está formada por las unidades de Brechas y Arcillas Marrones, y de Areniscas y Limos Marrones. Por otro lado, la Unidad de Limos y Arcillas Amarillas y Grises tiene una distribución más extensa y se encuentra prácticamente en toda la área de estudio. Las relaciones geométricas entre estas unidades son las siguientes:

a) La Unidad de Areniscas Rojas se sitúa estratigráficamente a más profundidad que las demás unidades y tiene una extensión reducida (fig. 7). El techo de esta unidad es una superficie de erosión que se encuentra fosilizada por la Unidad de Brechas y Arcillas Rojas o por la Unidad de Areniscas Ocre y Blancas. Localmente, a techo de esta unidad se han observado paleosuelos carbonáticos en forma de rizocreaciones que tapizan las fracturas. La Unidad de Brechas y Arcillas Rojas también tiene una distribución muy reducida y se sitúa por debajo de la Unidad de Areniscas Ocre y Blancas de forma concordante. La Unidad de Brechas y Arcillas Rojas disminuye en potencia hacia el sur-oeste a favor de la Unidad de Areniscas Rojas y hacia al nordeste desaparece debido a una falla (fig. 6). Por lo que respecta a la Unidad de Areniscas Ocre y Blancas, esta tiene una distribución areal mayor que las unidades anteriores (Fig. 7) y se hace más potente hacia el este (Montjuïc) y hacia mar, aunque desaparece de forma abrupta debido a la acción de la falla del Morrot. El fuerte aumento de potencia hacia el nordeste hace pensar en la presencia de diversas fallas normales que vunden progresivamente la Unidad de Brechas y Arcillas Rojas creando un surco ocupado por la Unidad de Areniscas Ocre y Blancas.

b) La Unidad de Brechas y Arcillas Ocre y la Unidad de Areniscas y Limos Marrones se localizan en un área muy reducida al norte-oeste de la zona de estudio (fig. 7). La Unidad de Brechas y Arcillas Ocre rellena una geometría de paleovalle, tapizando una superficie erosiva por encima del zócalo paleozoico (fig 6) y desaparece

hacia el sur mediante una falla. Hacia techo es tapizada concordantemente por la Unidad de Areniscas y Limos Marrones. Esta última, desaparece hacia el norte y aumenta de potencia hacia el sur, desapareciendo bruscamente mediante una falla.

c) La relación de la Unidad de Limos y Arcillas Amarillas y Grises con las unidades infrayacentes en muchos casos es mediante fallas (figs. 6 y 7). Esta unidad se encuentra en casi toda el área de estudio rellenando fosas tectónicas. Sin embargo, en algunas zonas la Unidad de Limos y Arcillas Amarillas y Grises esta tapizando a las unidades anteriormente descritas. Concretamente al norte de la zona de estudio se encuentra directamente encima de la Unidad de Brechas y Arcillas Ocre, y hacia el sur fosiliza la Unidad de Areniscas Ocre y Blancas.

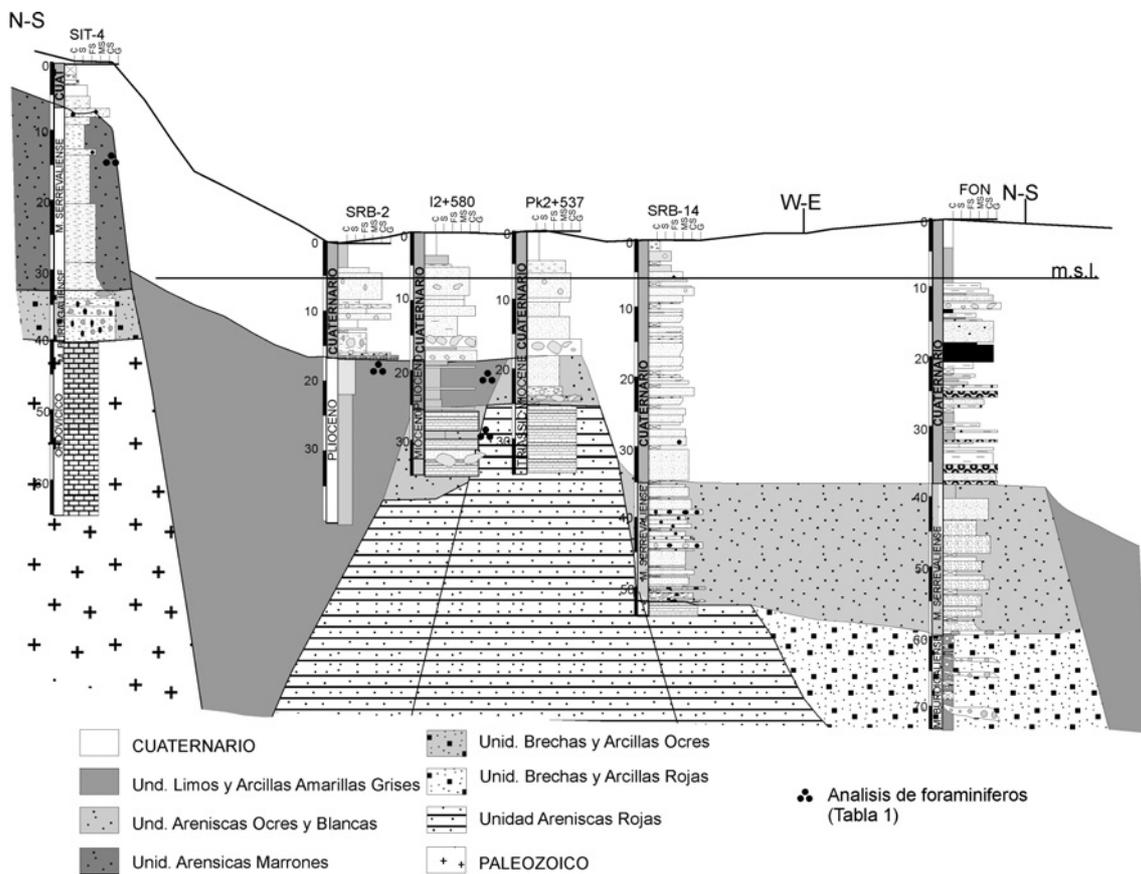


Figura 6: Esquema de la distribución y correlación de las distintas unidades de subsuelo de la depresión de Barcelona utilizando algunos sondeos representativos. Además, se muestra la localización de las muestras datadas mediante foraminíferos.

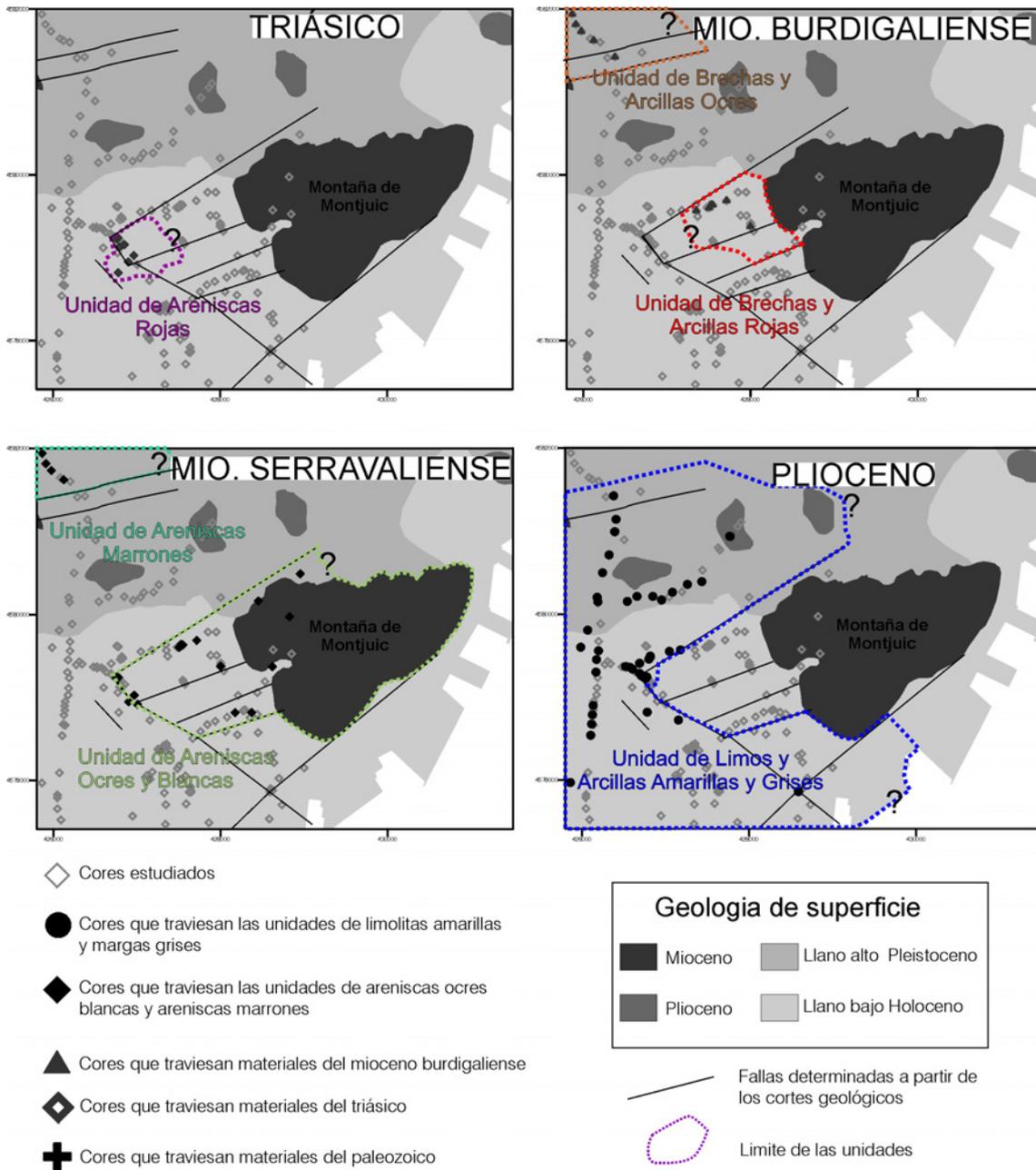


Figura 7: Localización de las unidades descritas en los sondeos y su distribución. La interpretación cronoestratigráfica de las unidades se discute en el apartado de Discusión.

Discusión

Interpretación de la litoestratigrafía de la depresión de Barcelona

La depresión de Barcelona constituye un área tectónicamente individualizada por las fallas de Tibidabo y de Barcelona. La falla de Barcelona probablemente ya era activa durante la compresión Oligocena (Gaspar-Escribano et al. 2004, Parcerisa et al.

2007), entre el Oligoceno Superior y el Aquitaniense, se produce una transición hacia un régimen extensivo, la actividad de las fallas se invierte y empieza el relleno sedimentario de la depresión de Barcelona (Roca et al. 1999, Cabrera et al. 2004). Los afloramientos más antiguos del relleno de la depresión de Barcelona corresponden a los depósitos Chatienses de Montgat (Parcerisa et al. 2007), correspondientes aún a la fase compresiva y los depósitos Serravalienses de Montjuïc (Gómez-Gras et al. 2001, Cabrera et al., 2004) depositados ya en un régimen extensivo. La información relativa a la evolución de las distintas unidades que rellenan la depresión de Barcelona en el subsuelo es relativamente escasa (Ventayol et al., 2002). En los sondeos descritos en este estudio se han caracterizado distintas unidades que forman el relleno sedimentario de la depresión de Barcelona por debajo del Cuaternario y por encima del zócalo Paleozoico (figs. 8 y 9).

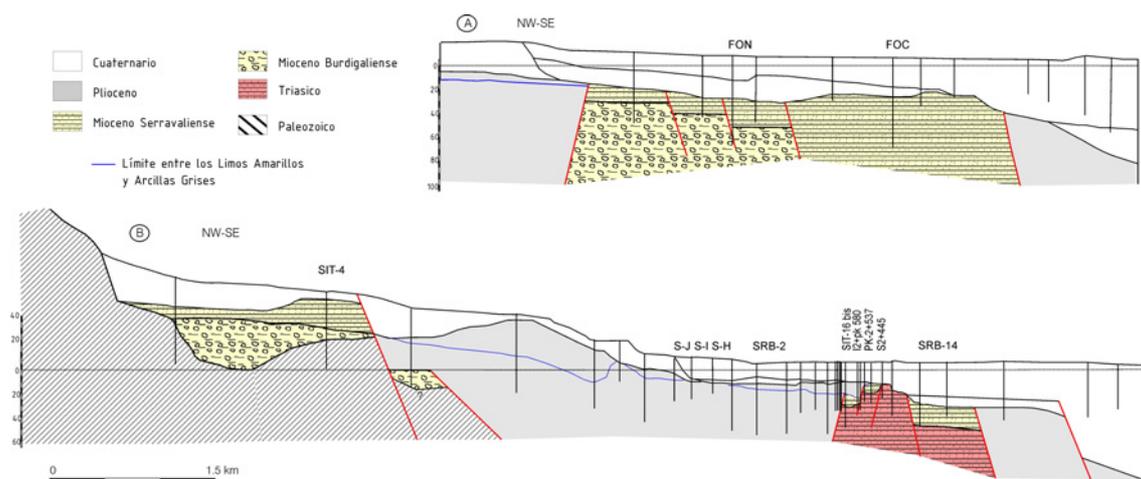


Figura 8: Cortes geológicos mostrando la disposición de las distintas unidades del subsuelo precuaternario de la depresión de Barcelona. La localización de los cortes se muestra en la figura 1.

En primer lugar, la Unidad de Areniscas Rojas en realidad no forma parte del relleno de la Depresión de Barcelona. Petrologicamente (fig. 3a y b), se ha observado una fuerte compactación química en los contactos entre los granos de cuarzo, esto indica que estas areniscas han sido enterradas varios centenares de metros en algún momento de su historia geológica. Este hecho, conjuntamente con las características estratigráficas y petrológicas (Gómez-Gras, 1993) permiten interpretar que esta unidad es el *Buntsandstein*. Por lo tanto, la Unidad de Areniscas Rojas también forma parte del

zócalo de la depresión de Barcelona. Este hecho no es extraño puesto que hay varios afloramientos triásicos en los alrededores de la Depresión de Barcelona (Garraf y Badalona) pero esta es la primera vez que se identifica el zócalo triásico en la zona de estudio. En muchos informes geotécnicos la Unidad de Areniscas Rojas ha sido interpretada como Mioceno debido a su fuerte cementación y a su similitud con el Mioceno de la montaña de Montjuïc. El Mioceno de la montaña de Montjuïc se distingue de esta unidad por su composición petrológica (litarenitas) y por la ausencia de compactación química (Parcerisa, 2002).

La Unidad de Brechas y Arcillas Rojas se encuentra en contacto erosivo por encima del zócalo *Buntsandstein*. Petrológicamente, las brechas de esta unidad están formadas por fragmentos de rocas metamórficas y por granos de cuarzo. Algunos de los granos de cuarzo contienen cementos sintaxiales indicando que proceden de la erosión del triásico adyacente (Fig. 3c). Así, los sedimentos de esta unidad se interpretan como pequeños abanicos aluviales que rellenaban paleovalles y erosionaban los paleorelieves más cercanos.

La Unidad de Brechas y Arcillas Ocreas presenta fuertes similitudes con la Unidad de Brechas y Arcillas Rojas. Ambas unidades rellenan paleovalles, aunque en el caso de la Unidad de Brechas y Arcillas Ocreas el zócalo está constituido por rocas carbonáticas del Devónico. Además, las brechas de la Unidad de Brechas y Arcillas Ocreas están formadas por fragmentos de rocas metamórficas y carbonáticas del Paleozoico subyacente. Esta unidad, al igual que la anterior, se considera depositada en un ambiente continental aluvial. Por lo que respecta a la edad de estas dos unidades no se ha podido encontrar ningún elemento de datación, lo único que se puede afirmar es que las dos unidades están tapizadas por sedimentos datados mediante foraminíferos como de edad Langhiense-Serravalliense. Esto, conjuntamente con las similitudes sedimentológicas observadas permite afirmar que ambas unidades son contemporáneas y de edad preserravalliense. Por similitud con el relleno de la depresión del Vallés-Penedés (Cabrera, 1979) se propone una edad burdigaliense para estas dos unidades, aunque en un futuro sería interesante intentar realizar una datación mediante micromamíferos.

Las Unidades de Areniscas Ocre y Blancas y de Areniscas y Limos Marrones han sido datadas como Langhiense-Serravalliense mediante foraminíferos (fig. 5 y Tabla 1). Ambas unidades son contemporáneas, se formaron en un ambiente marino deltaico y se pueden correlacionar con el Serravalliense de la montaña de Montjuïc (Gómez-Gras et al., 2001, Parcerisa, 2002) (figs. 7, 8 y 9). A parte de la datación, numerosos indicios refuerzan la correlación entre estas unidades y el Serravalliense de Montjuïc:

- 1- Petrológicamente las Unidades de Areniscas Ocre y Blancas y de Areniscas y Limos Marrones están formadas por litarenitas y arcosas, esta composición concuerda con la composición petrológica de las areniscas de Montjuïc.
- 2- La Unidad de Areniscas Ocre y Blancas contiene numerosos granos de feldespato potásico y de cuarzo con cementos sintaxiales (Fig. 3d). Este tipo de cementación también ha sido observada en las areniscas de Montjuïc (Parcerisa et al. 2001).
- 3- En esta misma unidad el análisis de Rayos X ha mostrado la presencia puntual de alunita y un enriquecimiento en caolinita en los minerales de la arcilla (fig. 4). Ambos minerales, conjuntamente con los cementos sintaxiales de feldespato potásico, son diagnósticos del Serravalliense de Montjuïc y forman parte de una fuerte alteración diagenética que afecta a estos sedimentos (Parcerisa et al. 2001). La caolinita y la alunita son los minerales responsables de la aparición de matrices de color blanco en algunas capas areniscosas de esta unidad.

Cabe destacar que los materiales del Serravalliense están fuertemente cementados en algunos sondeos y en los afloramientos de la montaña de Montjuïc, pero en otros sondeos las areniscas no están cementadas. Debido a este hecho, en los informes geotécnicos, los sedimentos del Serravalliense no consolidados son confundidos frecuentemente con sedimentos deltaicos del Cuaternario. La identificación correcta del Serravalliense en el subsuelo de Barcelona debe hacerse mediante estudios paleontológicos, petrológicos o geoquímicos. La presencia de plagioclasa en la Unidad de Areniscas Ocre y Blancas permite correlacionarla con la Unidad del Castell del Serravalliense de Montjuïc (Gómez-Gras et al. 2001).

La Unidad de Limos y Arcillas grises y amarillos ha sido interpretada clásicamente como el Plioceno de la depresión de Barcelona (Magné, 1978). Las dataciones realizadas

mediante foraminíferos en los sondeos estudiados (Tabla 1) concuerdan con una edad pliocena. Clásicamente se han diferenciado dos unidades en el Plioceno, una unidad superior de color amarillo la cual tiene una potencia muy irregular que nunca supera los 10 m en los sondeos estudiados y una unidad gris mucho más potente en la parte inferior. El Plioceno amarillo superior se interpreta como un paleosuelo formado por alteración de las arcillas grises durante un periodo de exhumación previo a la sedimentación cuaternaria.

Finalmente, el cuaternario se dispone encima de todas estas unidades de manera que solo quedan unos pocos afloramientos aislados de sedimentos precuaternarios. Concretamente, el Serravaliense de la montaña de Montjuïc y algunos afloramientos aislados de Plioceno (fig. 1).

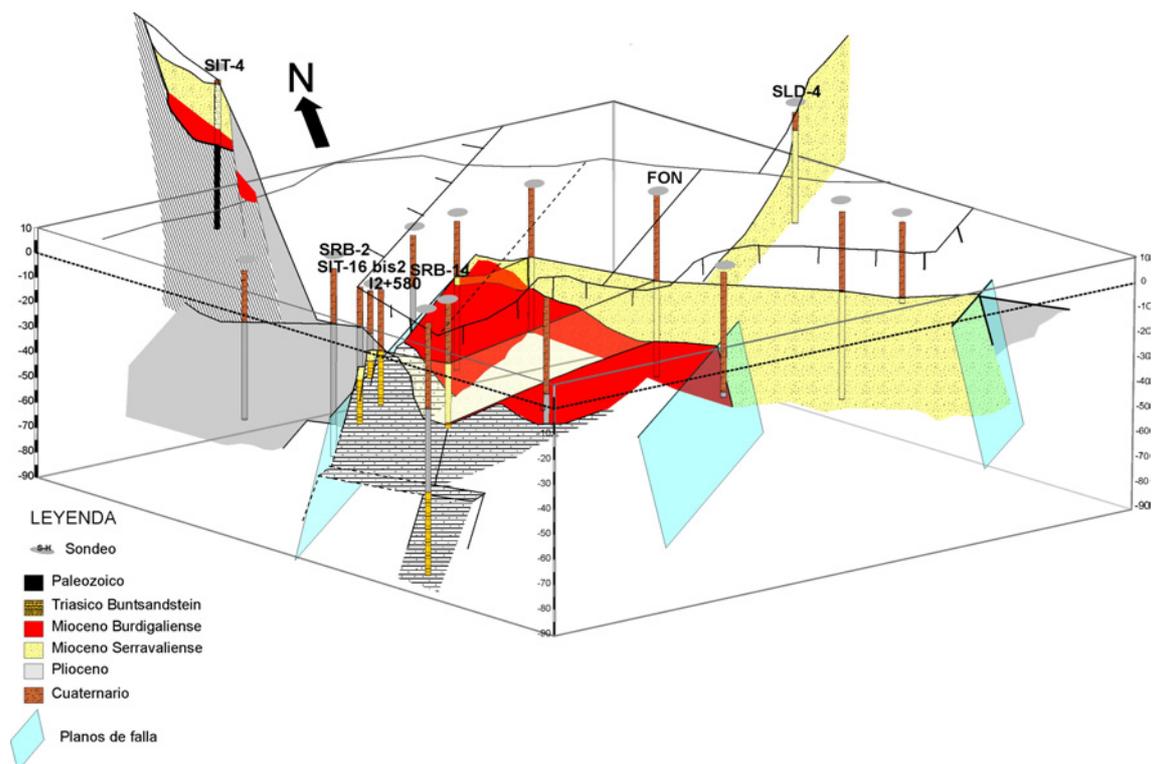


Figura 9: Modelo geológico tridimensional del subsuelo de la depresión de Barcelona.

Evolución paleogeográfica y tectónica de la Depresión de Barcelona

El estudio detallado de diversos sondeos realizados en la depresión de Barcelona ha permitido identificar distintas unidades que rellenan esta depresión entre el zócalo Paleozoico-Triásico y el Cuaternario. Concretamente de más antiguas a más modernas: (1) una Unidad de Brechas y Arcillas de edad preserravalliense (Burdigaliense?) depositada en un ambiente continental aluvial; (2) una Unidad de Areniscas de edad serravalliense correlacionable con los materiales de la misma edad que afloran en la montaña de Montjuïc y sedimentada en un ambiente marino deltaico y (3) una Unidad de Arcillas y Limos reconocida clásicamente como de edad pliocena. Las relaciones geométricas entre las distintas unidades descritas y sus características sedimentológicas complementan y completan la historia geológica de la depresión de Barcelona conocida hasta el momento (Roca et al. 1999, Cabrera et al. 2004).

Los primeros depósitos conocidos en la depresión de Barcelona son los materiales del Oligoceno Superior de Montgat (Parcerisa et al. 2007), estos se formaron aún en contexto compresivo y, probablemente, constituían el borde occidental de la cuenca *piggy-back* de Barcelona actualmente hundida a 6000 m de profundidad por la acción de la falla de Barcelona (Roca et al. 1999, Gaspar-Escribano et al. 2004, Cabrera et al. 2004). Posteriormente, los sedimentos más antiguos datados en la depresión de Barcelona son los materiales serravallienses de la montaña de Montjuïc (Gomez-Gras et al. 2001).

En este trabajo se describe por primera vez una Unidad de Arcillas y Brechas infrayacente a los sedimentos serravallienses. En este sentido, la Unidad de Arcillas y Brechas Burdigaliense (?) es el primer testimonio del relleno extensivo de la depresión de Barcelona. Durante esta etapa el área de la depresión de Barcelona estaba formada por pequeños relieves donde afloraba el zócalo Paleozoico y Triásico (figs. 8 y 9), estos relieves eran erosionados y los paleovalles adyacentes eran rellenados por pequeños abanicos aluviales. La acción de estos abanicos aluviales suavizó la topografía de la depresión de Barcelona.

Durante el Serravalliense la depresión de Barcelona se relleno por materiales marinos deltaicos, este cambio se pudo deber a una transgresión marina, aunque, en parte, también hay un control tectónico. El brusco cambio de potencia que los

sedimentos serravallienses experimentan hacia el NE (Montjuïc) indica que, probablemente, la acción de una o varias fallas normales creó un surco en la depresión de Barcelona que fue rellenado por sedimentos deltaicos (figs. 8 y 9). La Unidad del Morrot se restringe exclusivamente al área de la montaña de Montjuïc, por encima de esta, la Unidad del Castell acabó de rellenar el surco y se extendió por la depresión de Barcelona fosilizando el zócalo Paleozoico y Triásico y los sedimentos Burdigalienses (?).

En el Plioceno todo el conjunto de materiales se ve afectado por una tectónica extensiva la cual provoca la aparición de diversos surcos, entre ellos el que separa la montaña de Montjuïc del macizo de Collserola (figs. 8 y 9). Estos surcos son rellenados por las Arcillas y Limos marinos del Plioceno los cuales vuelven a suavizar la topografía del área. Posteriormente hay una regresión marina y los materiales pliocenos quedan exhumados formándose un perfil de alteración superficial que comporta la oxidación de los Limos y Arcillas, los cuales adquieren un color amarillo. Finalmente todo el conjunto es fosilizado por los materiales cuaternarios del Delta del Llobregat.

Por otro lado, el estudio de los sondeos también demuestra que las silicificaciones que afectan a los materiales serravallienses se encuentran restringidas a las fallas pliocenas. Lejos de las fallas los materiales serravallienses no están cementados y se confunden con los sedimentos cuaternarios. Esta asociación entre las fallas pliocenas y las silicificaciones no había podido ser descrita hasta el momento debido a la escasez de afloramientos de Serravaliense y será objeto de futuros estudios para comprender los procesos diagenéticos que condujeron a la silicificación de estos materiales.

Conclusiones

El estudio de diversos sondeos de la depresión de Barcelona ha permitido completar su historia geológica, aportando nuevos datos hasta el momento desconocidos.

En primer lugar se ha encontrado un zócalo triásico y una Unidad de Brechas y Arcillas Burdigaliense (?) desconocidos hasta el momento.

La Unidad de Brechas y Arcillas Burdigalienses (?) constituye el relleno extensivo más antiguo de la depresión de Barcelona y se formó en un ambiente continental aluvial.

Fosilizando el zócalo Paleozoico y Triásico y la Unidad de Brechas y Arcillas Burdigalienses (?) se ha descrito en el subsuelo de la depresión de Barcelona una Unidad de Areniscas correlacionable con los materiales serravallienses de la montaña de Montjuïc. Estos materiales han sido datados mediante foraminíferos planctónicos y se han establecido criterios diagnósticos para distinguirlos de los materiales del Cuaternario (presencia de cementos sintaxiales en los granos de feldespato y de cuarzo, presencia de alunita y enriquecimiento en caolinita en los minerales de la arcilla).

Finalmente, también se ha caracterizado el Plioceno y se ha descrito la existencia de un perfil de paleoalteración en su techo debido a un periodo de exhumación previo a la fosilización de todo el conjunto por los materiales del Cuaternario

Agradecimientos

Este estudio ha sido financiado por GISA dentro del ámbito de las obras realizadas para la construcción de la línea 9 de metro de la ciudad de Barcelona. Los autores agradecen también la ayuda de los técnicos de Geotec 262 y RSE. Parcerisa ha realizado la investigación en el marco del proyecto CGL2004-05816-C02-02 financiado por la Dirección General de Enseñanza Superior e Investigación Científica de España y Grup Consolidat de Recerca "Geologia Sedimentària" 2001/SGR/00075 and 2001/SGR/00077 de la Generalitat de Catalunya.

Bibliografía

Almera, J., 1891. Mapa geológico-topográfico de la provincia de Barcelona. Región I o de contornos de la capital. Escala 1:40.000. 1ª, Barcelona.

Almera, J., 1894. Descripción de los terrenos pliocénicos de la cuenca del Bajo Llobregat y llano de Barcelona. Mapa Geol. Prov. Barcelona. 351p.

Alonso, F., Peón, A., Villanueva, O., Rosell, J., Trilla, J. i Obrador, A., 1977. Mapa y memoria explicativa de la Hoja nº 421 (Barcelona) del Mapa geológico Nacional a escala 1:50.000, IGME.

Bayó, A., E. Batista, E. Custodio (1976). Intrusión marina en los acuíferos del litoral catalán. II Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica. Barcelona, 1976. Instituto Geográfico y Catastral. Madrid. Pp. 2103-2129.

Bayó, A, E. Batista, E. Custodio (1977). Sea water encroachment in Catalonia coastal aquifers. General Assembly IAH. Birmingham 1977. Vol. XIII.I pp. F.1-14.

Blow, W.H. 1969. Late Middle Eocene to Recent planktonic foraminiferal biostratigraphy. In P.

Bronnimann and H.H. Renz (Eds.). Proceedings of the First International Conference on Planktonic Microfossils (Geneva, 1967). Brill. Leiden: 199-421.

Cabrera, L., 1979. Estudio estratigráfico y sedimentológico de los depósitos continentales basales del Mioceno de la depresión del Vallès-Penedès. Tesi de Llicenciatura, Dpt. d'Estratigrafia i Geologia Històrica, Universitat de Barcelona, 361 p.

Cabrera L., Roca E., Garcés M. & de Porta J. 2004. Estratigrafía y evolución tectosedimentaria oligocena superior-neógena del sector central del margen catalán (Cadena Costero-Catalana). In: Vera J.A. (eds.) Geología de España. Madrid, SGE-IGME, 569-573.

Candela, L., E. Custodio, i Fernández-Rubio (1980). Contaminación por boro en un área del sector occidental del delta del Llobregat (Barcelona, España). Actas del IV Coloquio Internacional sobre las Aguas Subterráneas. Acireale, Sicilia.

Colom, G. y Bauzá, J. 1945. Notas sobre los foraminíferos de las margas Miocénicas de Montjuich. Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural, **XLIII**: 483-498.

Casassas, L. y Riba, O., 1992. Morfología de la rambla Barcelonina. Treballs de la Societat Catalana de Geografia, 33-34(VII): 9-23.

Checa, A., Díaz, J.I., Farrán, M. y Maldonado, A., 1988. Sistemas deltaicos holocenos de los ríos Llobregat, Besós y Foix: modelos evolutivos transgresivos. Acta Geol. Hispánica, 23: 241-255.

Custodio, E., Cacho, F. and Peláez, M., 1976. Problemática de la intrusión marina en los acuíferos del Delta del Llobregat, Segunda Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica, Barcelona. Inst. Geof. y Catastral Madrid, Madrid, pp. 2069- 2101.

Custodio, E., 1981. Sea water encroachment in the Llobregat delta and Besós areas, near Barcelona (Catalonia, Spain), Sea Water Intrusion Meeting: Intruded and Fossil Groundwater of Marine Origin, Rapp. Meddelanden, U. S. G. Undersökning, SverigesGeologiska Underskning, Uppsala, Sweden, pp. 120 - 152.

Custodio, E. y R. Llamas, (1983). Hidrología subterránea. Ed. Omega. 2 Vol. 2359 p.

Doménech, J., E. Batista, A. Bayo, E. Custodio (1983). Some aspects of sea water intrusion in Catalonia (Spain). 8th SWIM. Bari. Instituto di Geologia Applicata e Geotecnica. Bari. 15 pp.

Faura y Sans, M. 1917. Montjuich. Notas geológicas. Publicaciones de la Sociedad Española de Atracción de Forasteros. Barcelona, **28**: 5-55.

Gàmez, D. (2007). Sequence Stratigraphy as a tool for water resources management in alluvial coastal aquifers: application to the Llobregat delta (Barcelona, Spain). Tesis doctoral realizada Ingeniería del Terreny, Cartogràfica i Geofísica. Universidad Politècnica de Catalunya, Barcelona.

Gaspar-Escribano, J.M., García-Castellanos, D., Roca, E., Cloetingh, S., 2004. Cenozoic vertical motions of the Catalan Coastal Ranges (NE Spain): The role of tectonics, isostasy, and surface transport. *Tectonics*, 23, doi:10.1029/2003TC001511.

Gómez-Gras, D. 1993. El Permotriás de la Cordillera Costero Catalana: Facies y Petrología Sedimentaria. Parte I. *Bol. Geol. Min.*, 104-2, 115-161.

Gómez-Gras, d., Parcerisa, D., Calvet, F., Porta, J., Solé de Porta, N. y Civis, J. 2001. Stratigraphy and petrology of the Miocene Montjuïc delta (Barcelona, Spain). *Acta Geológica Hispánica*, **36**: 115-136.

Hemleben, Ch., Spindler, M. and Anderson, O. R. 1988. *Modern Planktonic Foraminifera*. Springer-Verlag. 363 pp.

Kennett, J. P. 1973. Middle and late Cenozoic planktonic foraminiferal biostratigraphy of the southwest Pacific- DSDP Leg 21, in R. E. Burns et al. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, **21**: 575-640.

Llamas, M.R., J. Molist (1967). *Hidrologia de los deltas de los ríos Besós y Llobregat*. Documentos de Investigación Hidrológica, nº 2. Centro de Estudios, Aplicaciones e Investigaciones del Agua. Barcelona.

Llopis, N., 1942a. Los terrenos cuaternarios del llano de Barcelona. *Publicaciones de la Diputación Provincial de Barcelona*, 6: 52.

Llopis, N., 1942b. Tectomorfología del Macizo del Tibidabo y valle inferior del Llobregat. *Estudios Geograficos*, III(7): 321-383.

Llopis, N., 1946. Los movimientos verticales intracuaternarios del NE de España. *Estudios Geologicos*, II: 181-236.

Magné, J. 1978. *Etudes microstratigraphiques sur le Néogène de la Méditerranée Nord-occidentale. Les bassins néogènes catalans*. Editions du Centre National de la Recherche Scientifique. Paris. 260 pp.

Manzano, M., Pelaez, M.D. and Serra, J., 1986-1987. Sedimentos prodeltaicos en el Delta emergido del Llobregat. *Acta Geologica Hispánica*, 21-22: 205-211.

Manzano, M., 1993. Génesis del agua intersticial del acuitardo del delta del Llobregat: origen de los solutos y transporte interactivo con el medio sólido, Ph'D Technical University of Catalonia, Barcelona, 273 pp.

Marques, M.A., 1984. Las formaciones cuaternarias del delta del Llobregat, LXXI. Institut d'Estudis Catalans, Barcelona, 1-280 pp.

Medialdea Vega, J. i Solé Sabaris, Ll., 1973. Mapa Geológico de España. E. 1:50000, nº 420, Hospitalet de Llobregat. IGME, Madrid, Serv. Publ. Ministerio Industria, 55 p., 1 map.

Medialdea, J., Maldonado, A., Alonso, B., Diaz, J.I., Farrán, M., Giró, S., Vazquez, A., Saonz-Amor, E., Martínez, A. and Medialdea, T., 1986. Mapa geológico de la plataforma continental española y zonas adyacentes. E 1:200000. Tarragona. Memoria. Hojas 41 and 442. Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Madrid.

Medialdea, J., Maldonado, A., Diaz, J.I., Escutia, C., Ferran, M., Giro, S., Serra, M., Medialdea, T. and Vazquez, J.T., 1989. Mapa geológico de la plataforma continental española y zonas adyacentes. E 1:200000. Barcelona. Memoria. Hojas 35 and 42. Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Madrid.

Ministerio de Obras Públicas (MOP), 1966. Estudio de los recursos hidráulicos totales de las cuencas de los ríos Besós y Bajo Llobregat. Comisaria de Aguas del Pirineo Oriental y Servicio Geológico de Obras Públicas, 4.

Parcerisa, D., 2002. Petrologia i diagènesi en sediments de l'Oligocè superior i del Miocè inferior i mitjà de la Depressió del Vallès i del Pla de Barcelona. Evolució de l'àrea font i dinàmica dels fluids. Tesis doctoral Universitat Autònoma de Barcelona, Bellaterra.

Parcerisa, D., Thiry, M., Gómez-Gras, D. y Calvet, F. 2001. Proposition d'un modèle de silicification superficielle des grès néogènes de Montjuïc, Barcelone (Espagne): paragenèses minérales, environnements géochimiques et circulation des fluides. *Bull. Soc. Geol. France.*, 172 (6), 751-764.

Parcerisa, D., Gómez-Gras, D., Roca, E., Madurell, J. y Agustí, J. 2007. The Upper Oligocene of Montgat (Catalan Coastal Ranges, Spain): new age constraints to the western Mediterranean Basin opening. *Geologica Acta*, Vol.5, Nº 1, 3-17

Perea, H., 2006. Falles actives i perillositat sísmica al marge nord-occidental del solc de Valencia, Tesis de Doctorado. Universidad de Barcelona, Barcelona.

Roca, J.L. y Casas, A., 1981. Gravimetria en zona urbana. Mapa gravimétrico de la ciudad de Barcelona.

Roca, E., Sans, M., Cabrera, L. i Marzo, M., 1999. Oligocene to Middle Miocene evolution of the central Catalan margin (northwestern Mediterranean). *Tectonophysics*, 315, 209-233.

Serra, J. y A. Verdaguer (1983). La sedimentación holocena en el prodelta del Llobregat. X Congreso Nacional de Sedimentología. Mahón.

Simó, J.A., Gàmez, D., Salvany, J.M., Vázquez-Suñé, E., Carrera, J., Barnolas, A. and Alcalà, F.J., 2005. Arquitectura de facies de los deltas cuaternarios del río Llobregat, Barcelona, España. *Geogaceta*, 38: 171-174.

Solé-Sabaris, L., Virgili, C. and I, Z., 1957. Livret guide d'excursions: Environs de Barcelone et Montserrat. In: INQUA (Editor), V Congress Inter INQUA, Barcelona, pp. 38.

Solé-Sabarís, L., 1963. Ensayo de interpretación del Cuaternario Barcelonés. *Miscel. Barcilonensia*, II: 7-54.

Subirana, J.M. (1983). "Estudi de la contaminació de les aigües subterrànies del Baix Llobregat." Tesis de licenciatura. Universidad de Barcelona. Fac. de Geología. 169 pp. Barcelona. Srinivasan, M. S. And Kennett, J. P. 1981. Neogene planktonic foraminiferal biostratigraphy: Equatorial to Subantartic, South Pacific. *Marine Micropaleontology*, 6: 499-534.

Ventayol, A., Palau, J. and Roca, A., 2002. El Contexto Geotécnico de la Ciudad de Barcelona, Proyectos. E.T.S.I. Minas. U.P.M. Madrid., Barcelona.

V.2 OUTCROPS

