

LOS FACTORES DETERMINANTES EN LA SECUENCIA EDÁFICA DE LA EVOLUCIÓN MORFODINÁMICA DEL TRAMO MEDIO DEL GUADALQUIVIR (JAEN)

M.P. Carral¹, A. Martín-Serrano², J.I. Santisteban², A. Guerra¹ y R. Jiménez Ballesta¹

¹ Dpto. Química Agrícola, Geología y Geoquímica. Universidad Autónoma. 28049 Madrid.

² Instituto Tecnológico Geominero de España. Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid.

Resumen: El sistema de terrazas del río Guadalquivir, en su primera aproximación al borde de la Meseta, ocupa un segmento de planta rectangular alargada según una de sus principales directrices estructurales. Se identifican tres grupos principales de niveles encajados a ambos lados del actual cauce. La agrupación más moderna se ubica en el centro del valle. Las terrazas septentrionales están constituidas por cuatro escalones fundamentales. La asociación meridional está formada por los replanos más altos y peor conservados cuyo nivel superior está situado a 130 m sobre el cauce. En ningún caso existen referencias cronológicas fiables. La secuencia edáfica desarrollada sobre estas terrazas se ha determinado mediante el estudio de 10 perfiles de suelos, que muestran una evolución progresiva en su desarrollo por la distinta naturaleza de los procesos edáficos. Los fenómenos de decarbonatación-carbonatación secundaria, argilización y rubefacción son función de su posición topográfica y están relacionados con la evolución morfodinámica del valle. Su comparación con las secuencias de otros ríos del entorno mediterráneo ibérico indica una fuerte dependencia del área fuente y del tiempo.

Palabras clave: Edafocronología, suelos rojos, terrazas fluviales, río Guadalquivir.

Abstract: The terrace system of the Guadalquivir River, in its first approach to the border of the Southern Spanish Meseta, occupies a rectangular area which is lengthened along one of the main structural axes of this border. Three principal groups of incised levels are identified at both sides of the valley. The youngest group is located at the centre of the valley. Northern terraces display four main steps, whereas the southern ones have the higher and worst preserved plains whose uppermost level is located 130 m above the river. None of these groups have reliable chronological references. The edaphic sequence has been determined using ten soil profiles developed on these terraces. The soil profiles display a progressive evolution in their development related to the different nature of their edaphic processes. The decarbonation, secondary carbonation, argilization and reddening are linked to its topographical position and to the morphodynamic evolution of the valley. When compared with the sequences of other Mediterranean rivers of Spain they show a strong dependence on source area and time.

Key words: Edaphochronology, red soils, fluvial terraces, Guadalquivir river.

Corral, M.P., Martín-Serrano, A., Santisteban, J.I., Guerra, A. y Jiménez Ballesta, R. (1998): Los factores determinantes en la secuencia edáfica de la evolución morfodinámica del tramo medio del Guadalquivir (Jaen). *Rev. Soc. Geol. España*, 11(1-2): 111-126

El río Guadalquivir discurre la mayor parte de su recorrido, unos 650 km, en la Depresión Bética neógena, conformando una de las principales cuencas hidrográficas de la Península Ibérica (Fig.1). La continentalización de esta cubeta triangular alargada (estrecho-golfo marino neógeno) entre el Macizo Ibérico y la Cordillera Bética ha dado lugar en época reciente al desarrollo progresivo de una red fluvial evolucionando de este a oeste. El resultado actual es un importante sistema de terrazas escalonadas que ocupan distintos segmentos del valle, reconociéndose hasta 17 niveles en unos 200 m de encajamiento (Díaz del Olmo *et al.*, 1989).

El gran desarrollo de las terrazas fluviales en cuanto a número de niveles, extensión superficial, espesor del sedimento y carácter litoestratigráfico, presupone imaginar un pasado fluvial más importante que el actual. La posición asimétrica de las terrazas en el valle implica un acercamiento progresivo del río, desde su posición inicial más meridional, al macizo antiguo que alcanza en las terrazas medias, y después, un nuevo retroceso hacia el sur (Goy *et al.*, 1994). La naturaleza de los aportes está influenciada por las dos áreas-fuente que enmarcan el valle: siliciclástica, los de procedencia septentrional, y carbonatada, los de procedencia meridional.

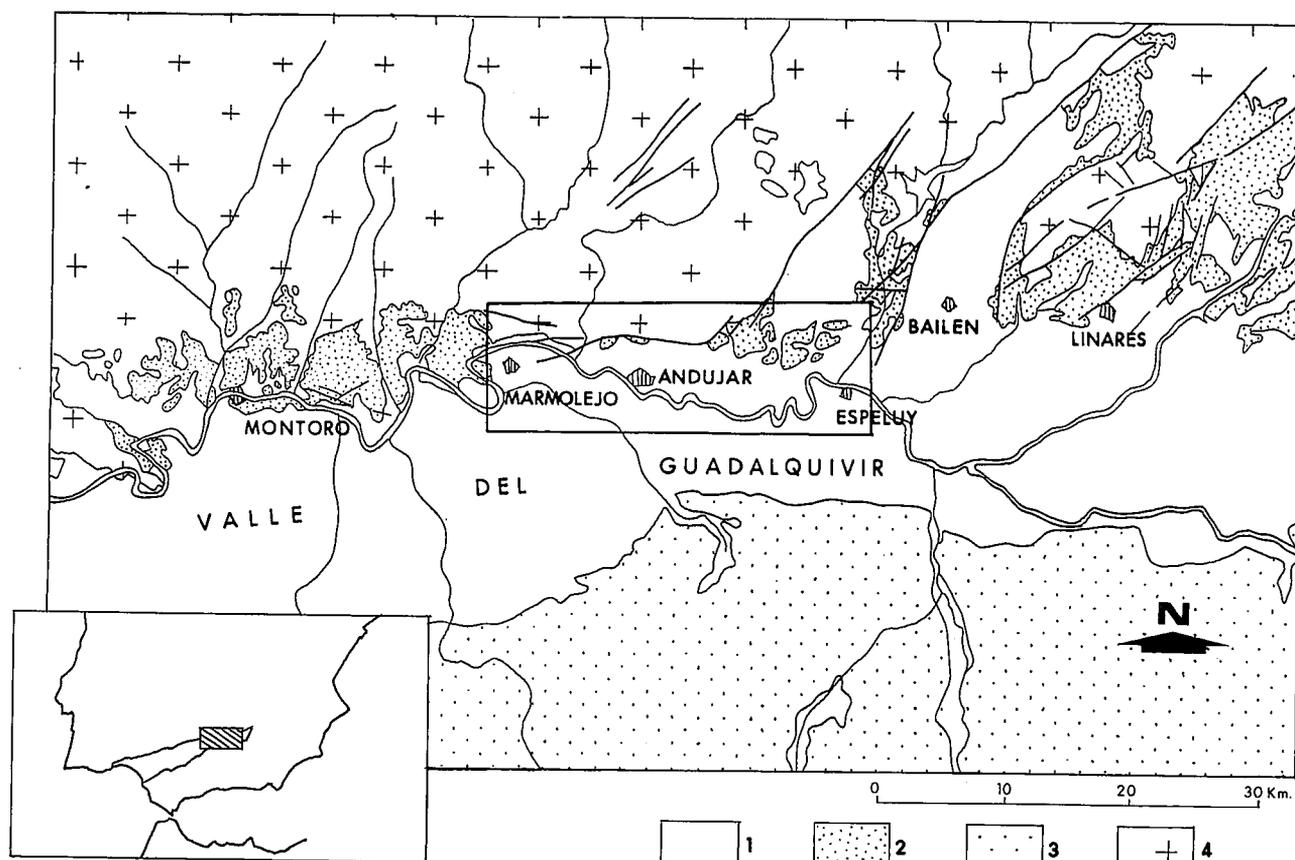


Figura 1.- Situación y contexto geológico regional. Leyenda: 1, Cenozoico; 2, Mesozoico de la periferia del Macizo Hespérico; 3, Terrenos subbéticos; 4, Macizo Hespérico.

Aunque no existen dataciones cronológicas absolutas, se dispone de referencias suficientes para fijar el desarrollo de este sistema fluvial como pliocuaternario. El punto de partida debe ser el último relleno marino de la cuenca que está constituido por margas y calcarenitas atribuidas al Tortoniense superior-Plioceno (Santisteban y Martín-Serrano, 1991). Los datos más modernos se registran a partir de las terrazas medias (+30 m): yacimientos paleontológicos (Aguirre *et al.*, 1973 y Clemente *et al.*, 1977) y arqueológicos (Díaz del Olmo *et al.*, 1989).

Como repetidamente se ha puesto de manifiesto en distintos lugares de la cuenca mediterránea (Torrent *et al.*, 1980; Güzel y Wilson, 1981; Arduino *et al.*, 1984, 1986; Gallardo *et al.*, 1987), existe una diferenciación edáfica ligada a la evolución del valle. Esta cronosecuencia de suelos someramente conocida en el bajo Guadalquivir (Díaz del Olmo *et al.*, 1989; Baena *et al.*, 1991) es la que se pretende caracterizar en este trabajo, intentando determinar también qué factores han incidido más en su formación.

Material y Métodos

La realización de una cartografía geológica convencional en la Hoja Topográfica a escala 1:50.000 núm. 904 (Andujar), puso de manifiesto el desarrollo de un importante sistema de terrazas en el valle del

Guadalquivir y, paralelamente, la existencia de una magnífica secuencia de suelos asociada a ella que era preciso interrelacionar con la evolución del valle.

Para el conocimiento geológico y geomorfológico de esta franja del Guadalquivir se realizó la correspondiente cartografía geológica, análisis fisiográfico e interpretación geomorfológica mediante fotointerpretación y reconocimiento de campo. Se utilizó la escala 1:50.000 para el dibujo de la cartografía en un mapa y también de tres cortes transversales representativos. La separación y definición de cada una de las terrazas reconocidas llevó aparejada su descripción y caracterización litoestratigráfica y sedimentológica, punto de partida indispensable en los estudios edáficos posteriores.

La selección de los suelos característicos de cada terraza o grupo de terrazas estuvo limitado por la disponibilidad de afloramientos, especialmente en las terrazas más bajas. Se eligieron 10 perfiles representativos de los tres grandes grupos de terrazas separados. Los perfiles 1 y 2, al SO de Andujar (Cortijo del Marqués de la Merced), se sitúan sobre la terraza más alta a unos 110 m sobre el río Guadalquivir. En el perfil 8, también sobre la terraza más alta en Espeluy (+130 m), se ha podido observar con claridad el carácter multiseccional de los desarrollos edáficos en las terrazas antiguas. Los perfiles 3 y 3b, 5, 4 y 6 y 9 corresponden respectivamente a los niveles 4(+65 m), 5(+36 m),

6(+28 m) y 7(+30 m) de las terrazas medias, todos en la margen septentrional del río. Las terrazas bajas solo están representadas por el perfil 7 en la terraza 8(+20) junto a Villanueva de la Reina. El levantamiento de los perfiles y la toma de muestras se realizó según normas FAO (1991).

Los estudios analíticos se hicieron siguiendo la metodología USDA (1972). Fueron los siguientes: análisis mecánico según método del Densímetro de Boyoucos; determinación de carbonatos totales mediante calcímetro de Bernard, determinación del contenido en materia orgánica según el método de Walkey-Black, determinación de pH en una suspensión 1:2,5, en agua y conductividad eléctrica en una suspensión 1:5, y difracción de rayos X para la identificación de minerales de la arcilla.

Contexto geológico y geomorfológico

El río Guadalquivir, procedente de las zonas externas de la Cordillera Bética, atraviesa la depresión neógena en su extremo oriental y tiene su primer contacto con el macizo antiguo entre Espeluy y Marmolejo (Jaén), razón por la que la influencia siliciclástica de los aportes del mismo sólo se manifiesta claramente en las terrazas bajas. Este segmento del valle, totalmente aterrizado, tiene una planta rectangular alargada de unos 30 km según la dirección N100. Esta es una directriz estructural que define tramos del borde del macizo y también límites entre litofacies neógenas, por lo que es de suponer una clara influencia tectónico-litológica en su origen (Fig. 1).

Orográficamente constituye una franja deprimida de 200-250 m de cota, con un borde septentrional de rocas paleozoicas, recortado y montañoso, que alcanza cotas superiores a los 600 m y otro meridional alomado y margoso con altitud próxima a los 300 m.

La compleja evolución fluvial ha dado lugar a un completo y desarrollado sistema de terrazas colgadas y solapadas con carácter multiseccional. Se ha identificado un total de 10 niveles reunidos en tres grupos fundamentales (Figs. 2 y 3). Las *terrazas altas* aparecen en retazos mal conservados, aislados o bien conectados con las terrazas medias. Coronan las lomas margosas de la ribera meridional con cotas que oscilan entre +80-130 m. Las *terrazas medias* quedan situadas en una franja alargada y continua de unos 3 km de ancho en la margen septentrional, junto al borde del macizo antiguo; constituyen cuatro niveles escalonados y solapados con cotas relativas comprendidas entre +25-65 m. Las *terrazas bajas* forman un estrecho corredor de 2 a 3 km de anchura que acompaña al curso actual del río en el eje del valle. Comprende la llanura de inundación y dos niveles (+20 y +12 m) excavados sobre las margas neógenas que tienen su continuidad interrumpida por el trazado encajado y meandriforme del canal del río.

Los sedimentos de las terrazas altas y medias presentan muchos rasgos comunes y pocas diferencias. Tienen color rojizo o anaranjado y espesor irregular y

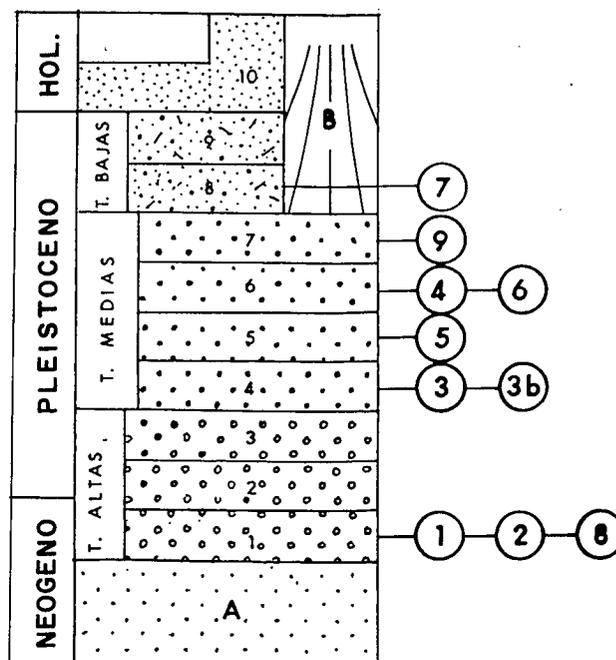
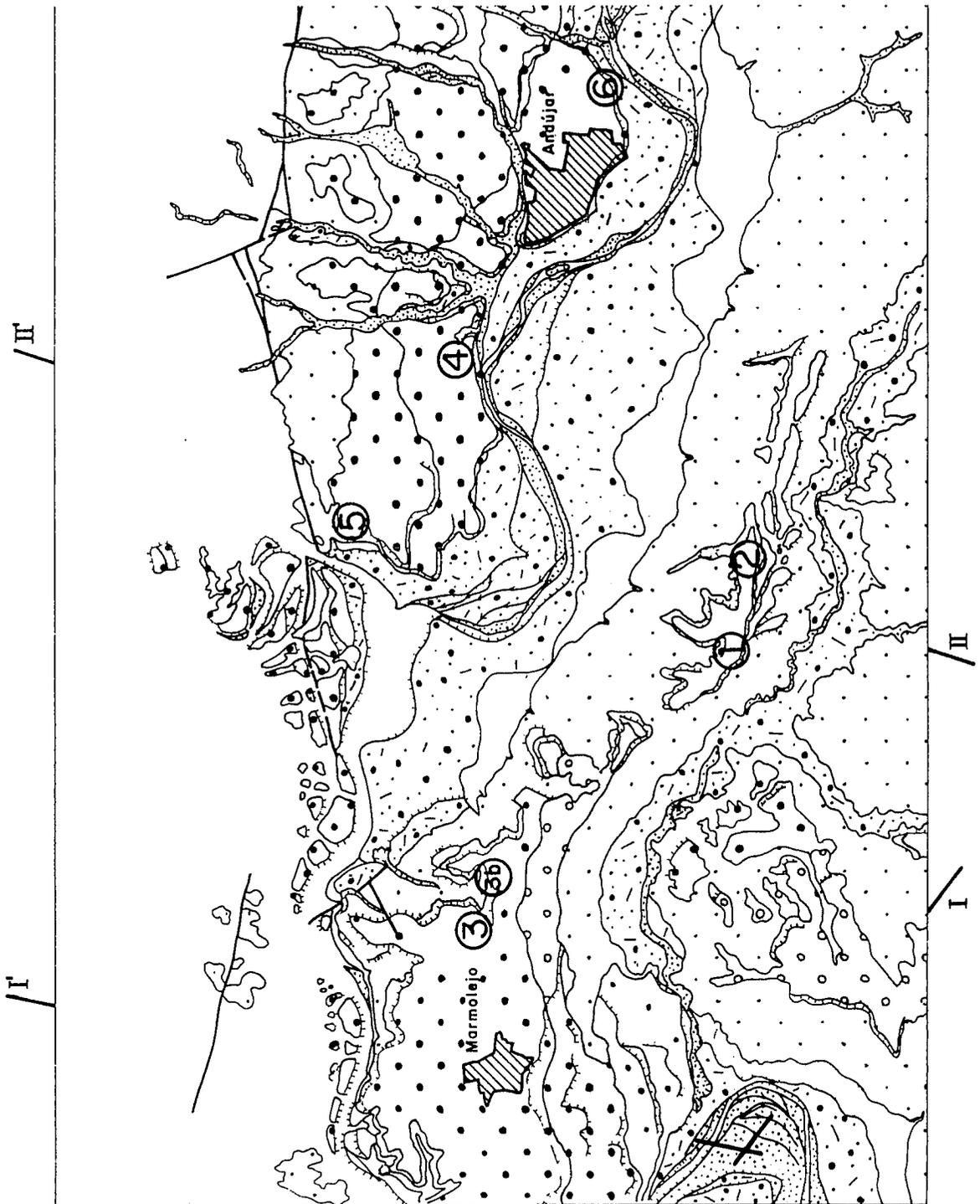


Figura 2.- Situación cronoestratigráfica de las terrazas con indicación de la posición de los perfiles edáficos levantados (números en círculo). Leyenda: A) Cenozoico; 1 a 10, terrazas; B) conos aluviales.

considerable, sobre todo en los más antiguos, cercano a los 30 m. Son conglomerados clastosoportados polimícticos, rodados y bien calibrados a los que acompañan arenas y fangos. Se distribuyen en cuerpos tabulares canalizados y multiseccional, con granoselección positiva y estratificación cruzada planar y en surco. En todas ellas son muy frecuentes los fenómenos de encostramiento carbonatado y karstificación.

A grandes rasgos, la tendencia evolutiva de las terrazas, desde las más antiguas a las más modernas, se manifiesta por la progresiva desaparición de las costras de carbonatos, la ligera disminución de los espesores del depósito y aumento del carácter siliciclástico en los conglomerados. En el grupo de terrazas más bajas se desarrollan litofacies con conglomerados con abundante matriz arenosa, principalmente siliciclásticos y una proporción abundante de arenas y fangos culminantes y escaso o nulo desarrollo de costras carbonatadas. Constituyen secuencias complejas y multiepisódicas, según un modelo en el que predominan depósitos de acreción lateral, tal como sucede en la actualidad (Santos *et al.*, 1991).

La referencia morfocronológica más cercana hay que buscarla en la culminación de las identaciones continentales (*delta braided* o *fan delta*) en la plataforma carbonatada del Neógeno terminal de este sector de la Depresión del Guadalquivir, atribuido al Tortoniense superior-Messiniense y Plioceno (Santisteban y Martín-Serrano, 1991). Sin embargo, la correlación es difícil, como consecuencia de la desconexión morfológica entre ese piedemonte (563 m) y las terrazas fluviales más antiguas (314 m). En el valle, el apoyo cronológico se tiene en los yacimientos neolíticos de Los Villares en la terraza +10 m y en datos de inundaciones históricas



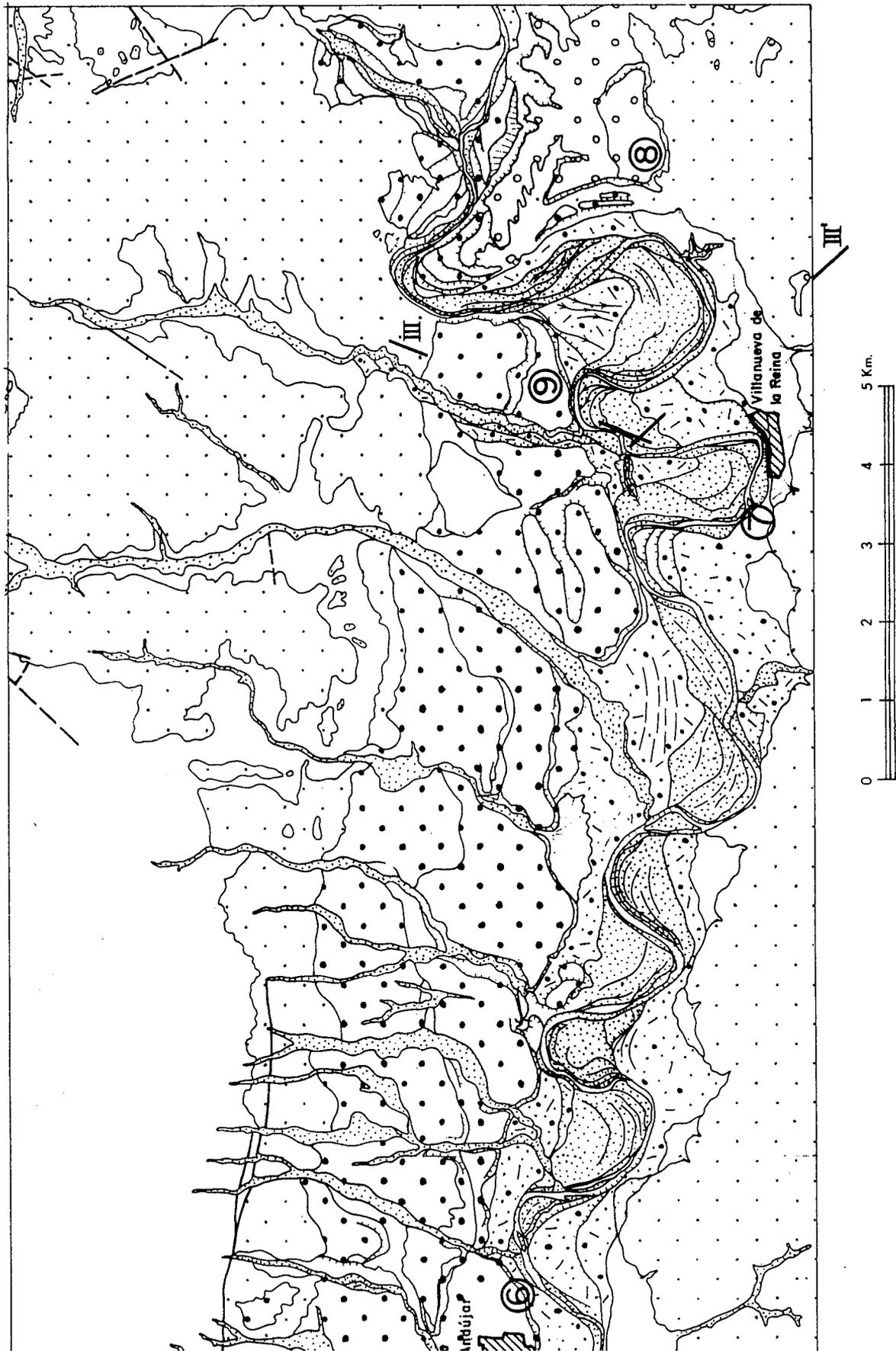


Figura 3.- Mapa geomorfológico con situación de perfiles edáficos (números en círculos) y cortes (I-I', II-II' y III-III'). Ver Leyenda en fig. 4.

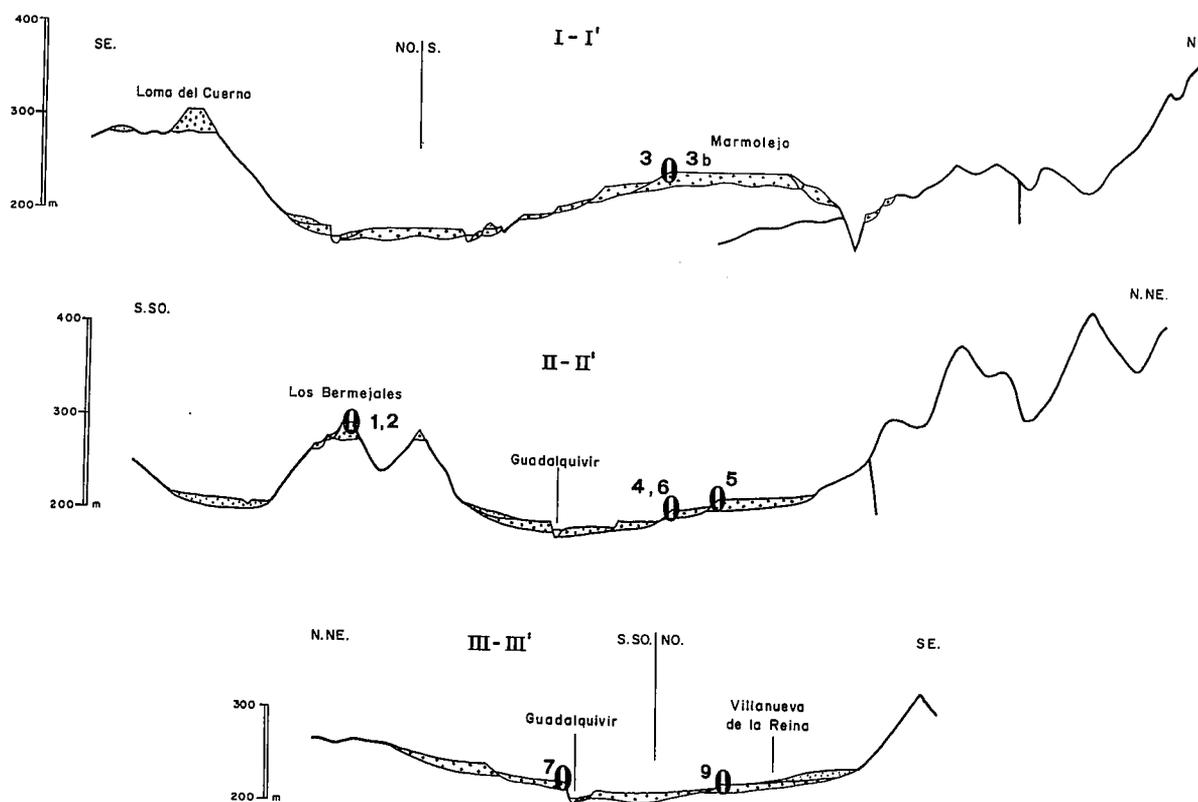


Figura 4.- Cortes geomorfológicos (ver situación en figura 5) y posición de los suelos estudiados.

sobre el nivel más bajo (+20 m) donde se ha obtenido una cronología, probablemente no significativa según los propios autores, por TL de $70,54 \pm 7,76$ Ka en un horizonte arenoso del muro (H. Rendell, A. Pérez González y T. Calderón, com. personal).

Los suelos: descripción, caracterización y procesos

El estudio edáfico, que cuenta en la zona con el antecedente de Gil *et al.*, (1987), se ha realizado en 10 perfiles representativos desarrollados sobre la sucesión de terrazas que aparece en este segmento del valle medio del Guadalquivir (Figs. 2, 3 y 4). Su clima actual es seco subhúmedo mesotérmico III (Thorntwaite, en Cerezuela, 1977). El índice de aridez pone de manifiesto un gran falta de agua en verano, y el de humedad indica un exceso moderado en invierno que aumenta progresivamente con la altitud. El régimen de temperatura es TERMICO y el de humedad XERICO (USDA, 1975). La vegetación natural corresponde al piso bioclimático termomediterráneo en los dominios SECO y HUMEDO (Rivas Martínez, 1981).

Terrazas altas (perfiles 1, 2 y 8).

Los suelos desarrollados sobre estas terrazas presentan perfiles tipo Ap, ABt, Btk. Se clasifican como *Rhodoxeralf típico* (USDA)/*Luvisol cálcico* (FAO, 1991). (Figs. 5 y 6, Tablas I y II).

La textura de los horizontes Bt de los perfiles es arcillosa o arcillo-limosa, y es función de la naturaleza litológica de la terraza, pues éstas están constituidas por depósitos multiseuenciales en las que son abundantes las litofacies limosas derivadas del sustrato margoso del valle. No obstante, la variación textural responde también a razones edáficas, pues se observa la disminución de arena con respecto al limo-arcilla en profundidad, definiendo claramente unos horizontes argílicos independientemente de la naturaleza litoestratigráfica original del sedimento. La materia orgánica llega hasta un 2% en los horizontes superficiales, decreciendo considerablemente en los subsuperficiales. Los carbonatos aumentan en profundidad hasta proporciones considerables (66% en el perfil 1), lo que sugiere un lavado de los mismos en los horizontes más superficiales. Además de esta descarbonatación, la presencia de carbonataciones irregulares y nódulos en los horizontes argílicos (perfiles 1 y 2) implica a su vez un proceso de recarbonatación secundaria por paleohidromorfía (Fig. 6B).

En general, las variaciones analíticas que experimentan las propiedades edáficas al alcanzar el horizonte inferior 2Ckm, son consecuencia del cambio de litología en el depósito original. Tan solo el pH, marcadamente básico y nunca inferior a 8, y la conductividad eléctrica presentan poca variación a lo largo de todo el perfil.

Todos estos suelos se presentan muy erosionados, de modo que incluso el horizonte Bt ha

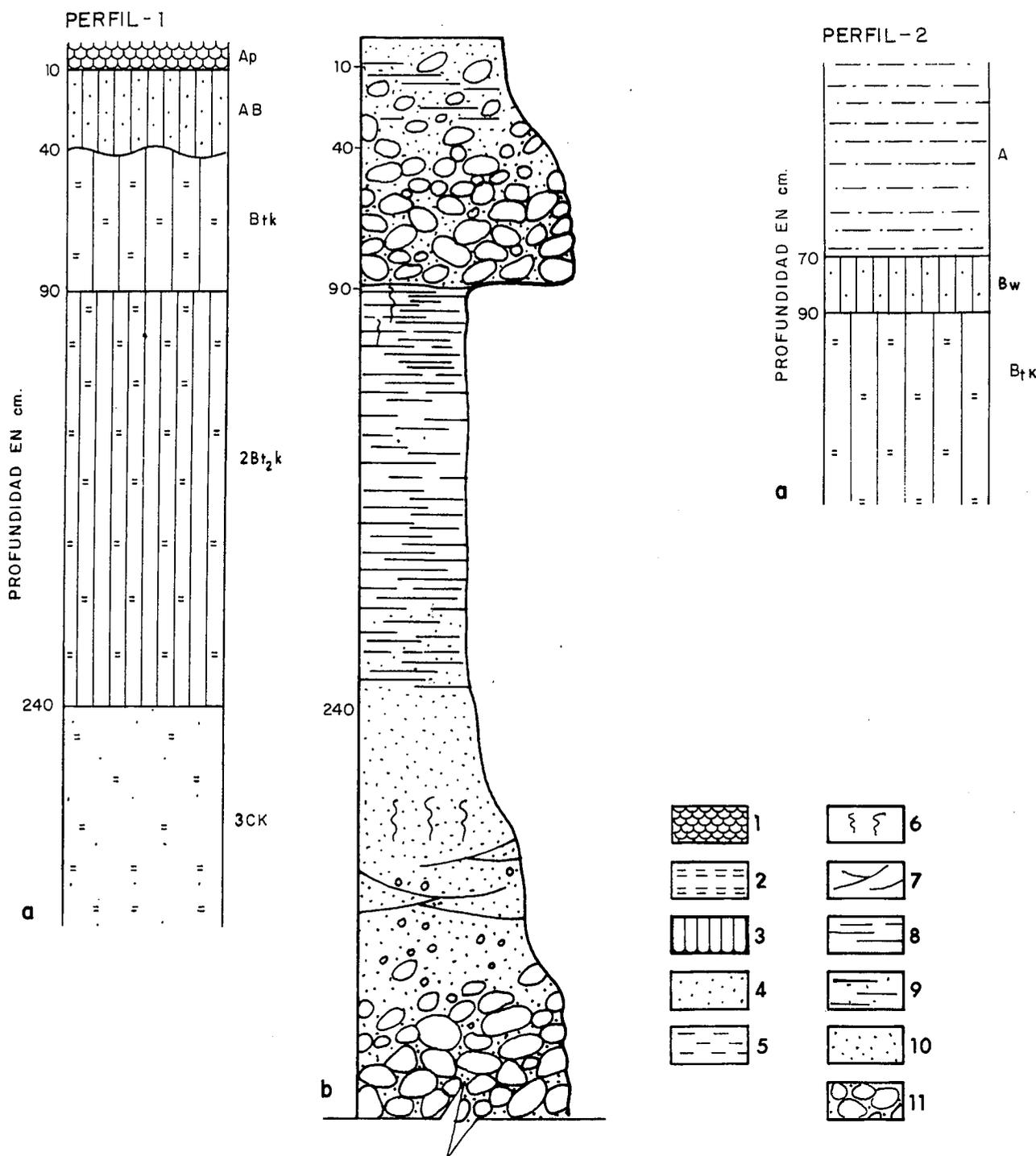


Figura 5.- Suelos de las terrazas altas. Los dos perfiles se encuentran sobre el mismo nivel de terraza distanciados unos 2 km. La diferencia entre ambos estriba en el desarrollo de los horizontes superficiales, bastante mayor en el perfil 2. Al perfil 1 se le adjunta su columna estratigráfica. Leyenda: a) Perfiles edáficos: 1, Horizonte A con materia orgánica; 2, Acumulación de carbonato cálcico; 3, Horizonte Bt con estructura prismática; 4, Horizonte arenoso; 5, Acumulación de arcilla; b) Columna estratigráfica: 6, Bioturbación; 7, Estratificación cruzada; 8, Arcilla; 9, Limos; 10, Arenas; 11, Conglomerados.

desaparecido parcialmente. En algunos casos es una circunstancia reiteradamente puesta de manifiesto por la frecuencia de horizontes edáficos intrasedimentarios. De igual forma, el actual horizonte Ap corresponde a la parte superior del horizonte Bt antropizado por labores agrícolas e incorporación de la materia orgánica. Los procesos y signos de interrupción del proceso edáfico son constantes durante la formación de la terraza. El

perfil 8 constata este hecho, que sirve para ilustrar la importancia del factor tiempo en esta sucesión morfoedáfica-sedimentaria. Se trata de un paleosuelo interestratificado en el depósito de la terraza superior que sólo conserva restos de un horizonte Bt de escaso espesor sobre un horizonte petrocálcico. Dicho paleosuelo aparece fosilizado por 7 m de sedimentos, conteniendo rasgos edáficos poco definidos pero reite-

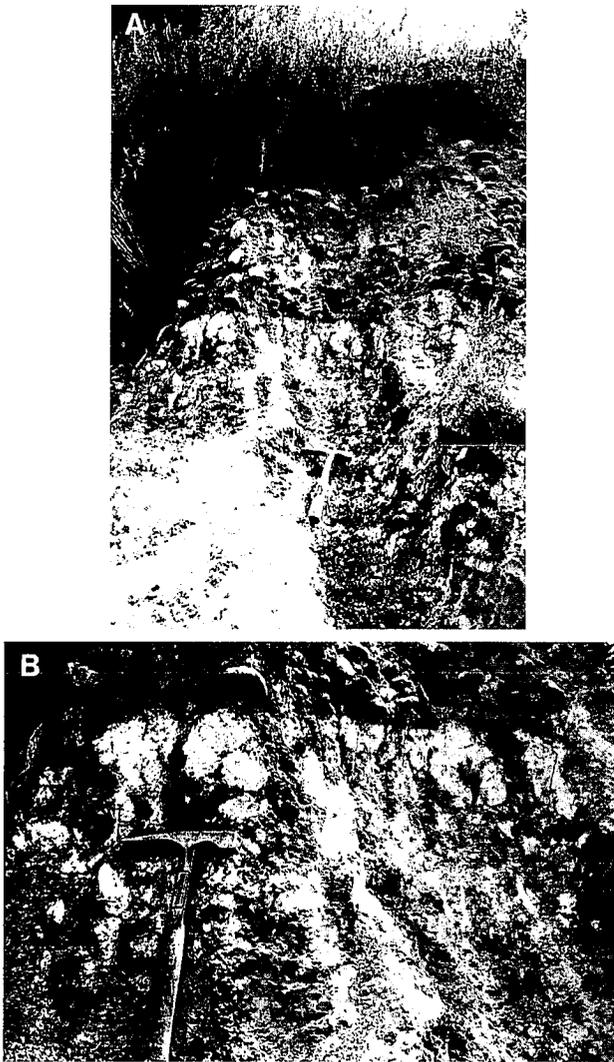


Figura 6.- Suelo de la terraza alta (perfil 1) junto al cortijo del Marqués de la Merced (longitud del martillo: 28 cm). Fotografía A: Horizontes superiores del perfil, Ap, AB, Bt,k y 2Bt,k. La discontinuidad estratigráfica entre dos secuencias sedimentarias de la terraza determina el cambio tan brusco de los dos últimos horizontes. Fotografía B: Detalle de carbonatación secundaria con carácter nodular en el perfil anterior.

rados. Se trata de la constatación del carácter multisequencial de cada una de las terrazas y de que las condiciones ambientales intrasedimentarias eran idénticas a las que se supone incidieron en la formación de los suelos que se desarrollaron sobre su superficie.

El depósito original de las terrazas, aunque tiene naturaleza polimíctica, es abundante en elementos de carácter carbonatado. Ante tal situación de partida, el desarrollo de potentes horizontes argílicos conlleva un importante proceso inicial de descarbonatación del suelo con intenso lavado y consecuente desarrollo posterior de horizontes petrocálcicos de gran espesor. Por otra parte, la existencia de pequeñas concentraciones irregulares de carbonatos diseminados por todo el perfil, coexistiendo con argilanes de iluviación, supone un fenómeno de recarbonatación posterior. De forma sintética, la sucesión de procesos edáficos sería la siguiente:

descarbonatación \Rightarrow argilización \Rightarrow rubefacción \Rightarrow carbonatación secundaria \Rightarrow redistribución de los carbonatos \Rightarrow erosión+antropización

Terrazas medias (perfiles 3-3b, 4, 5, 6 y 9).

Los suelos más antiguos, que corresponden a los perfiles 3 y 3b, presentan rasgos afines a los descritos sobre las terrazas altas. Su perfil tipo es A, Bt, Btk, Ck, *Haploxeralf rhódico* (USDA)/*Luvisol crómico* (FAO) (Fig. 7 y Tablas I y II). En el perfil 3 se pueden observar restos de un antiguo suelo rojo (2,5 YR 4/6) con iluviación de arcilla y con un desarrollo de horizontes 2 Bt, 2 Btk, 3 Ck, aunque sobre él existe otro suelo tipo A, Bt (10 YR 3/3) relacionado con un derrame posterior a la terraza.

Los suelos de los niveles intermedios de estas terrazas medias, están representados por los perfiles 4, 5 y 6. El primero presenta un perfil tipo Ap, Btk, BC, C, *Rhodoxeralf vértico* (USDA)/*Luvisol vértico* (FAO), con dos encostramientos carbonatados bien diferenciados que limitan los horizontes BC y C. El horizonte superior está truncado. Los horizontes Btk y BC son profundos con textura franca y grietas atravesando el horizonte Btk por donde penetra arcilla que recubre los clastos. Este suelo tiene un ligero carácter vértico y un 27% de carbonato en el horizonte Btk. La conductividad eléctrica y pH (básico) tienen poca variabilidad a lo largo de todo el perfil.

Los perfiles 5 y 6 presentan un perfil tipo Ap, Bt, Bk, *Haploxeralf cálcico* (USDA)/*Luvisol cálcico* (FAO), con el horizonte superior antropizado. Los horizontes argílicos son menos profundos (70 cm) que los de las terrazas más antiguas. La textura es arcillosa en los horizontes argílicos y franco-arcillosa en los horizontes Bk. Presentan pH básico y sin variación, conductividad eléctrica que aumenta considerablemente en los horizontes Bk, descarbonatación en los horizontes superiores y valores muy altos (73% en el perfil 6) de carbonatación en los Bk.

El perfil 9, localizado en la terraza más moderna de este grupo intermedio, presenta una sucesión Ap, Bt, Bk, C, *Rhodoxeralf cálcico* (USDA)/*Luvisol cálcico* (FAO). Tiene características analíticas parecidas a las de los perfiles 5 y 6 y horizontes inferiores muy desarrollados como consecuencia de varias superposiciones edáficas (Fig. 7).

Los procesos edáficos que afectan a estas terrazas medias son una repetición de los procesos que afectaron a las más altas, y excepto en algún caso, siempre más atenuados. Podría ser por la suavización de las condiciones climáticas o más bien por la propia limitación del proceso edáfico en razón de su modernidad; también, como se expondrá más adelante, por el carácter más o menos multisequencial del sedimento de la terraza.

Los suelos siguen estando afectados por procesos erosivos que conllevan la destrucción parcial de los horizontes superiores. La aparición de rasgos vérticos en algún suelo coincide con la presencia de minerales esmectíticos, quizás generados durante el proceso de

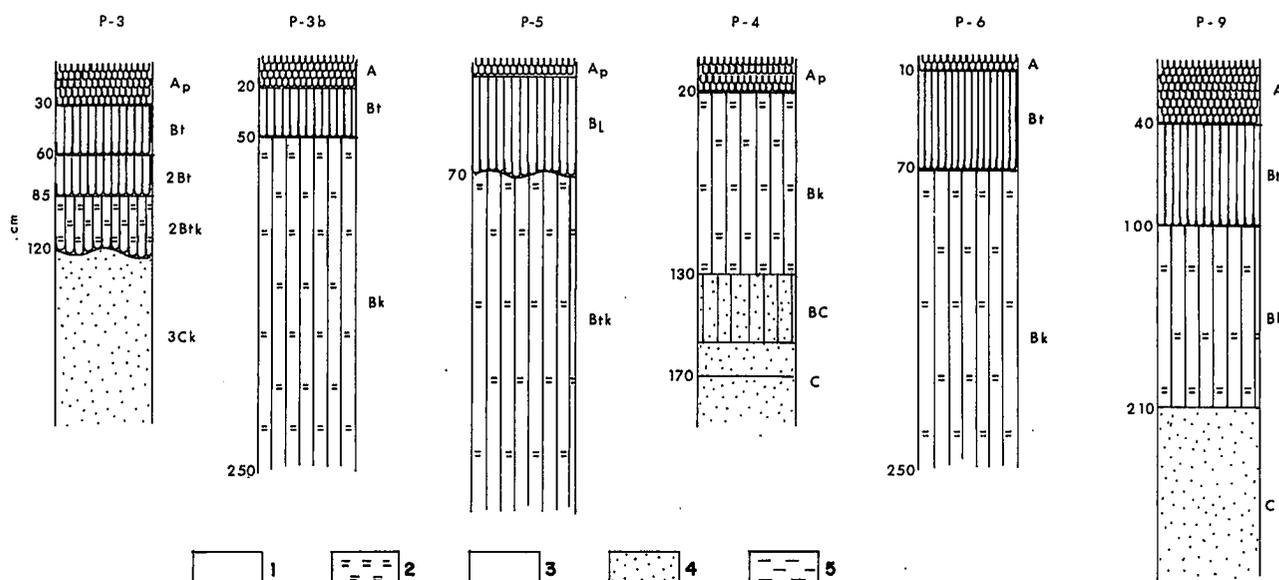


Figura 7.- Suelos de las terrazas medias (profundidad de los horizontes del suelo en cm). Leyenda: 1, Horizonte A con materia orgánica; 2, Acumulación de carbonato cálcico; 3, Horizonte Bt con estructura prismática; 4, Horizonte arenoso; 5, Acumulación de arcilla.

argilización. Sin embargo, la existencia de este carácter vértico, atribuible en principio a circunstancias morfológicas locales, es posible que tenga otro tipo de significación. Sólo hay que recordar la naturaleza del sustrato terciario abundante en arcilla esmectítica y el importante encajamiento de estos niveles de terrazas en él; es decir, este tipo de arcilla sería heredada e incorporada por erosión de ese sustrato.

La sucesión de procesos edáficos sería la siguiente:

descarbonatación ⇒ argilización ⇒ rubefacción
⇒ carbonatación secundaria ⇒ antropización+erosión

Terrazas bajas (perfil 7).

Son suelos mucho menos evolucionados (Fig. 8 y Tablas I y II), *Xerochrept calcixeróllico* (USDA)-*Cambisol cálcico* (FAO). Normalmente sólo se conserva un horizonte de color ocre (2,5 Y 5/2) muy degradado y poco desarrollado que se ha interpretado como cámbico. No se observan horizontes argílicos, pero sí se detecta redistribución de carbonatos. La evolución de estos suelos es escasa, teniendo lugar únicamente los siguientes procesos:

descarbonatación parcial ⇒ formación del horizonte cámbico ⇒ redistribución de carbonatos ⇒ antropización

Discusión

El tramo del valle del Guadalquivir estudiado presenta una gran asimetría, pues la mayor parte de sus terrazas están situadas en la ribera septentrional. Sin embargo, esa localización, junto al zócalo silíceo de la Meseta, apenas tiene influencia en el contexto morfosedimentario del valle. Todos los depósitos de las terrazas, apoyadas sobre un sustrato terciario margoso y poco permeable, tienen una procedencia bética *s.l.*,

tratándose de materiales originalmente muy carbonatados. Esta composición de las terrazas presupone desde el punto de vista edáfico, un proceso de *descarbonatación* inicial y general en todos los niveles. Este fenómeno conlleva posteriormente, a partir de un cierto nivel, la *argilización* y *rubefacción* de los horizontes subsuperficiales de los suelos y la acumulación de carbonatos en la parte más profunda del perfil. Excepto en las terrazas más modernas, se forman horizontes petrocálcicos muy desarrollados, que suelen alcanzar el muro del depósito de la terraza; este proceso está sin duda favorecido por la naturaleza impermeable del sustrato margoso. La carbonatación se produce por alteración mineral, y en mayor grado, por disolución de los elementos calizos del sedimento.

El desarrollo de las carbonataciones o petrocálcicos (intensidad-contenido y potencia), es función del espesor del depósito, pero éste último está a su vez determinado por la superposición de secuencias sedimentario-edáficas, que son especialmente importantes en las terrazas más altas. El resultado, a primera vista homogéneo, solo lo es en apariencia, pues la realidad es múltiple y consecuencia de la reiteración del fenómeno durante la formación de la terraza. Pero, además, los horizontes petrocálcicos más importantes se encuentran también en los niveles más antiguos. Siempre existe relación directa entre la *edad-abundancia de superposiciones* de procesos edáficos y la importancia de las carbonataciones, es decir que existe correlación entre la importancia de los horizontes petrocálcicos y el carácter multiseccional del sedimento de la terraza. Esta circunstancia explicaría las anomalías en la tendencia general de la catena de suelos hacia una progresiva disminución de los horizontes carbonatados.

La relación anterior es también válida para los suelos con horizontes argílicos, a pesar de que su erosionabilidad los hace desaparecer allí donde son fre-

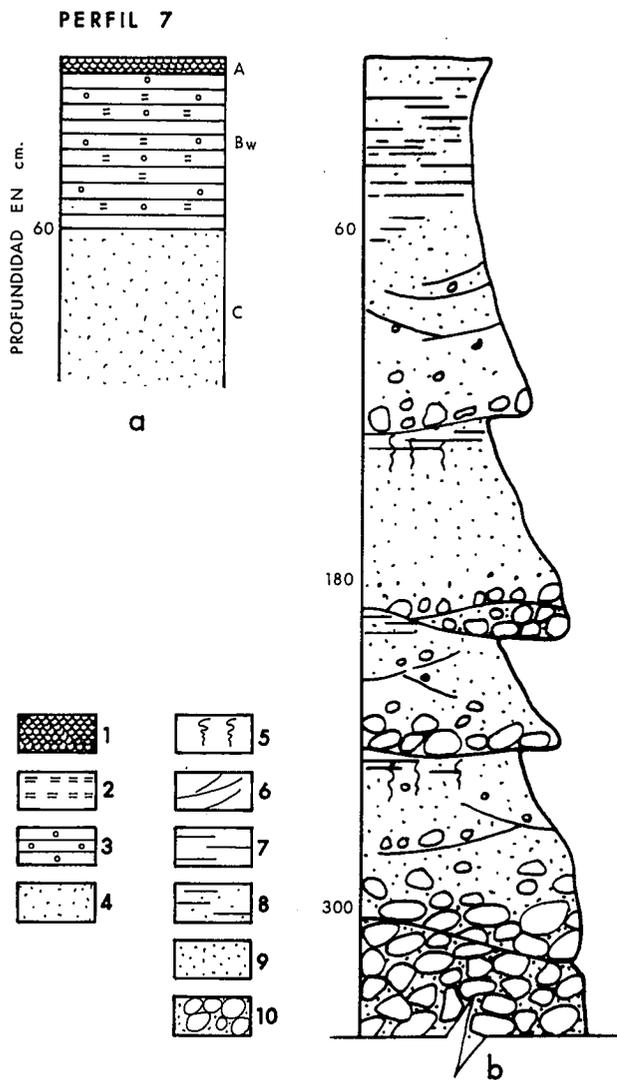


Figura 8.- Suelo y columna estratigráfica correspondiente en una terraza baja (profundidad de los horizontes del suelo en cm), Leyenda: a) Perfil edáfico: 1, Horizonte A con materia orgánica; 2, Acumulación de carbonato cálcico; 3, Horizonte Bw; 4, Horizonte arenoso; b) Columna estratigráfica: 5, Bioturbación; 6, Estratificación cruzada; 7, Arcilla; 8, Limos; 9, Arenas; 10, Conglomerados.

cuentas esas superposiciones. En cualquier caso, es obvio que su desarrollo es paralelo en este tipo de suelos al de los horizontes petrocálcicos.

Los procesos de argilización y rubefacción sobre los sedimentos que constituyen las terrazas del río Guadalquivir implican, además de una previa descarbonatación, una cierta alteración, descalcificación e importante eluviación de arcilla. La muy tenue manifestación de estos últimos procesos de argilización y rubefacción en las terrazas más jóvenes ha sido interpretada en la Meseta española como sintomática de aridificación climática (Herail, 1979; Gallardo *et al.*, 1987).

Ocurre que todos los procesos, estos últimos y los anteriores, están muy bien señalados en el ejemplo que se ha estudiado en este trabajo, en las terrazas medias y altas sobre *Rhodoxeralf cálcico* (USDA)/*Luvisol cálcico* (FAO). *Haploxeralf cálcico* (USDA)/*Luvisol*

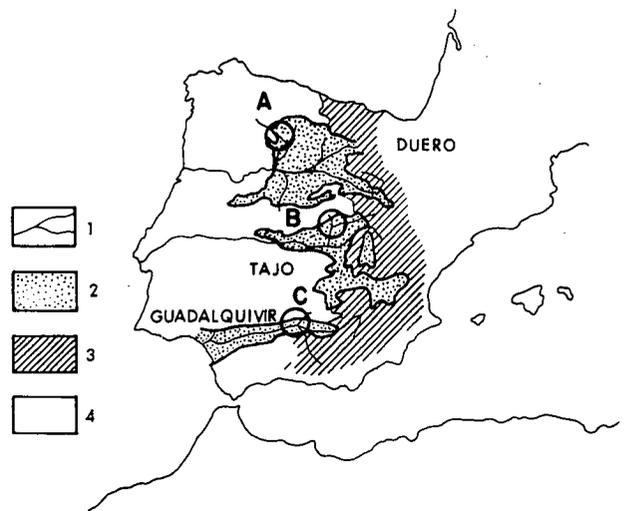


Figura 9.- Situación de las secuencias edáficas estudiadas por Herail (1979) (A), Vaudour (1979), Gallardo *et al.* (1987) (B) y en este artículo (C). Leyenda: 1, Red fluvial; 2, Cuencas terciarias; 3, Area fuente carbonatada; 4, Area fuente silíceo.

chrómico (FAO). *Haploxeralf cálcico* (USDA)/*Luvisol cálcico* (FAO). *Rhodoxeralf vértico* (USDA)/*Luvisol vértico* (FAO). *Rhodoxeralf cálcico* (USDA)/*Luvisol cálcico* (FAO). Por el contrario, en las terrazas más modernas, sólo aparecen suelos poco evolucionados, entisoles e inceptisoles (*Xerofluvent típico*, *Xerochrept calcixeróllico*), lo que podría imputarse a la propia juventud de los sedimentos y del suelo desarrollado, pero también a una xerofitización progresiva del clima.

Como elemento comparativo, Vaudour (1979) atribuye al régimen de lluvias la aparición de dos grandes grupos de suelos rojos en la cuenca del Tajo, también reconocidos en otras regiones mediterráneas. Sitúa en el dominio semiárido, por debajo de 800 m, suelos saturados o poco saturados con horizontes petrocálcicos y por encima de los 800 m, hasta los 1400 m, suelos rojos más ácidos, más lavados y más desaturados. Pero este mismo autor afirma que la influencia no es sólo geográfica, sino que es el clima en periodos recientes el que determina las variaciones edáficas que aparecen en las secuencias; en esa misma línea se sitúan Gallardo *et al.* (1987), quienes desarrollan esa idea en un trabajo más concreto, también en la misma región. Para un marco general de tipo mediterráneo, suponen una progresiva aridificación que parte de una situación inicial más cálida y húmeda que la actual; la secuencia, suelo rojo muy evolucionado (palexeralf)- suelo fersiaítico (*rhodoxeralf-haploxeralf*) es su argumentación. Sin embargo, en nuestra opinión, esta tesis necesita una importante precisión: el área fuente de los depósitos de terrazas experimentó una importante modificación durante el transcurso del tiempo, ya que de ser única y silíceo durante la construcción de las altas plataformas de piedemonte, evoluciona a múltiple o polimíctica (silíceo-carbonatada) en las

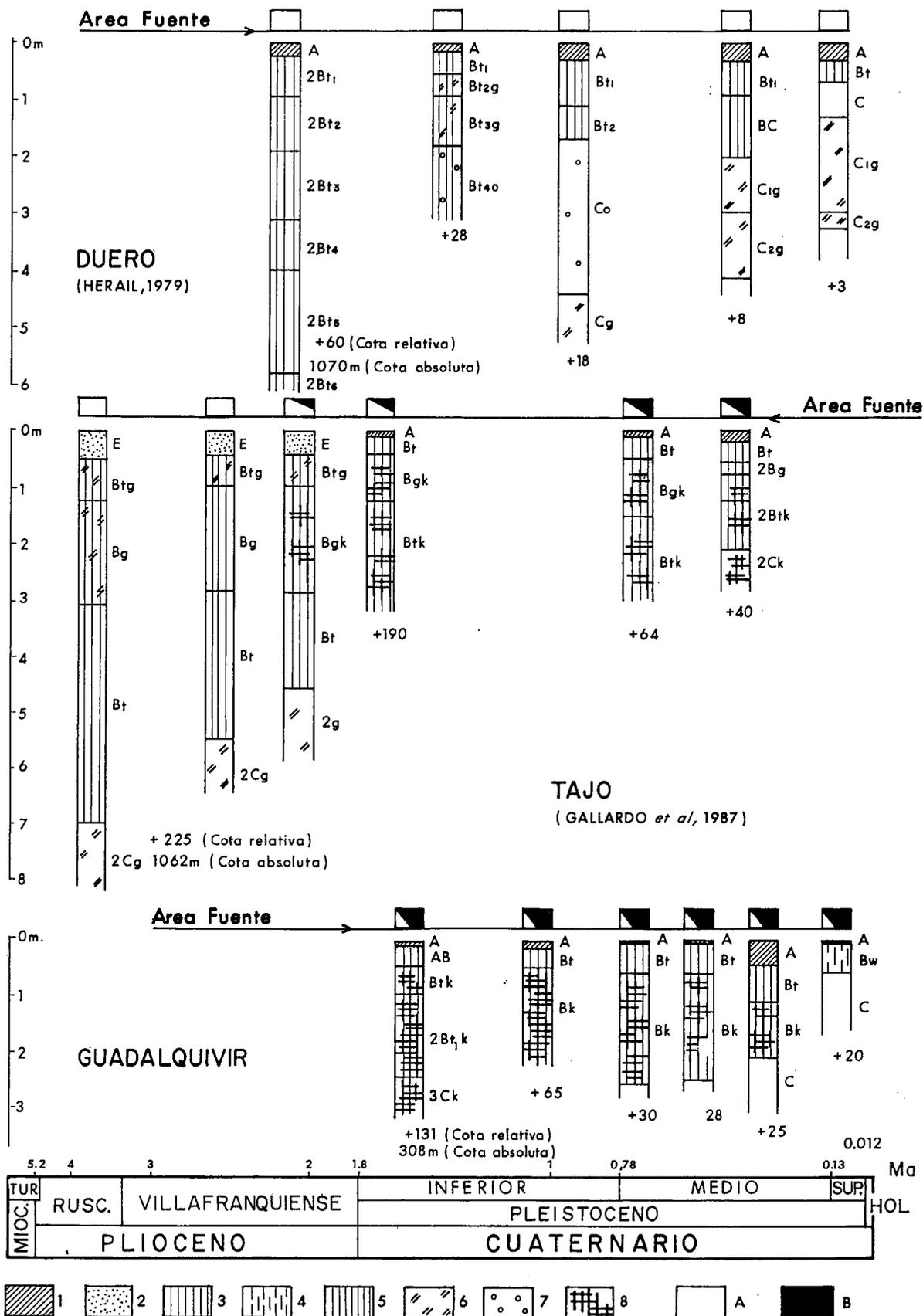


Figura 10.- Gráfico comparativo de las tres secuencias edáficas emplazadas. Leyenda: Perfiles edáficos: 1, horizonte A; 2, horizonte E; 3, horizonte B; 4, horizonte C; 5, horizonte argílico; 6, hidromorfías; 7, acumulaciones de Fe; 8, carbonato. Area fuente: A, silíceas; B, carbonatada (la importancia de una u otra area fuente se expresa gráficamente en el cuadro que encabeza cada perfil).

Perfil	Horizonte	Profundidad (cm)	Color (seco)	Textura	Estructura	Consistencia (mojado/seco)	Límite	Observaciones
1	Ap	0-10	2.5 YR 4/4	franca	granular media	ligera adherente ligera dura	gradual ondulado	
	AB	10-40	2.5 YR 4/6	franca	granular media	ligeramente adherente ligeramente dura en seco	gradual ondulado	
	Bk,k	40-90	10 R 3/6 matriz 10 YR 7/8 carnos	franco-limoso	granular medio	ligeramente adherente ligeramente dura en seco	gradual irregular	Pedregosidad 90%. Cusnes delgados y continuos
	2B ₁ k	90-240	10 R 3/6 matriz 2.5 Y 4/2 moteado	franco-limoso	granular/subangular	ligeramente adherente ligeramente duro	brusco y plano	Cusnes continuos
	3C _{lim}	>240	5 YR 6/6	franco-limoso	subangular fina	ligeramente adherente ligeramente duro en seco	gradual ondulado	Pedregosidad en el límite con AB
2	A	0-70	2.5 YR 4/6 matriz 7.5 YR 5/6 metal	franco arcillo limoso	granular media	ligeramente adherente extremadamente duro en seco	gradual ondulado	El resto de los horizontes igual que perfil 1, pero más desmenuzados
	Bw	70-90	2.5 YR 4/6	franco arcillosa	granular media	adherente duro en seco	gradual ondulado	
8	2B _k	0-25	5 YR 4/6	arcillosa	subangular gruesa	muy adherente muy dura	gradual ondulado	Hay Mn muy abundante. Cusnes abigarrados
	A	0-30	10 YR 3/3	franco-arcilloso	subangular	ligeramente adherente extremadamente duro	gradual ondulado	
	Bt	30-60	10 YR 4/4	franco-arcilloso	prismática media	ligeramente adherente extremadamente duro	irregular y plano	Cusnes espesos y continuos
	2 B _k	60-85	10 YR 4/4	franco-arcilloso	prismática media	ligeramente adherente extremadamente duro	difuso ondulado	Pedregosidad 80%. Cusnes espesos y continuos
	3 C _k	85-120	5 YR 3/6	arcillo-limoso	subangular media	adherente extremadamente duro	gradual ondulado	Nódulos de carbonato
3B	A	0-20	7.5 YR 4/6	arenoso	bloques subangulares tendientes a granular	no adherente poco consistente	brusco y plano	
	Bt	20-50	2.5 YR 4/6	arcilloso	prismática media	adherente, duro en seco	gradual ondulado	Cusnes moderadamente espesos y continuos
	Bk	50-200	2.5 YR 4/6	limo-arcilloso	granular fino	ligeramente adherente ligeramente duro en seco	gradual ondulado	Destructura de los cusnes en favor de los carbonatos. Carbonato pulverulento
	Bt	3-70	2.5 YR 3/6	arcillosa	columnar, media	muy adherente, muy dura en seco	gradual ondulado	Cusnes moderadamente espesos y continuos
	Bk	70-270	2.5 YR 3/4	franco-arcillosa	columnar media	adherente, dura en seco		Nódulos de carbonato ocupando el 50%.
4	Ap	0-25						
	B ₁ k	25-130	2.5 YR 6/4 matriz 5 YR 4.5/6 arcilla	franco-arcillosa	prismática mediana	ligeramente adherente muy duro	gradual ondulado	Cusnes espesos y continuos. Silken sides, grietas en seco.
	BC	130-170	2.5 Y 5/4	franca	masiva	brusco y plano	brusco y plano	
	C	>170			típica de terrazas			Dos escorramientos que delimitan una limosita y un conglomerado típico de terrazas
6	A	0-10	7.5 YR 4/4	arenosa-limosa	granular gruesa	no adherente suelto	interrumpido	
	Bt	10-70	5 YR 4/6	arcillosa	micica	muy adherente muy duro	difuso	Cusnes débiles y continuos
	Bk	70-250	5 YR 5/6	franco-arcillosa	masiva	ligeramente adherente ligeramente duro		No cusnes. Moteado de carbonatos en un 15%
9	Ap	0-40	10 YR 6/4	franco-limosa	granular mediana	ligeramente adherente ligeramente duro	brusco y plano	Cusnes espesos. Eflorescencias salinas
	Bt	40-102	2.5 YR 3/6	franco-arcillosa	subangular mediana	adherente, duro		Gras bioturbada
	Bk	102-210	10 YR 7/2	franco-arcillosa	granular fina	adherente extr. duro		Por debajo están los conglomerados de la base de la secuencia
	C	210-310	10 YR 7/3	franco-arenosa	laminar	no adherente		
7	Bw	0-60	2.5 Y 5/2	franco-arcillosa	subangular mediana	ligeramente duro muy adherente extremadamente duro		Los carbonatos se acumulan preferentemente en la fracción arcilla

Tabla I.- Propiedades morfológicas de los perfiles

Perfil	HORIZONTE	Profundidad (cm)	pH H ₂ O	CONDUCTIVIDAD ELECTRICA	MATERIA ORGANICA %	CARBONATOS %	ARENA %	LIMO %	ARCILLA %	MINERALOGIA ARCILLA
1	Ap	0-10	8,2	0,2	1,9	11	49,1	37,7	13,1	ILLITA Smectita Caolinita
	AB	10-40	8,2	0,2	1	17,1	47,3	39,4	13,3	
	B _t k	40-90	8,6	0,2	1	36	25,7	55,5	18,8	
	2 B _t k	90-240	8,4	0,2	-	22	8,1	73	19	
	2 C _{km}	>240	8,8	0,15	-	66	12,8	71,5	15,7	
2	A	0-70	7,4	0,1	2,2	27	17,7	47,4	34,9	ILLITA Smectita, Caolinita
	B _w	70-90	8	0,2	1,2	27	28,9	42,6	28,5	
8	2B _t	13-38	8,2	0,3	-	37,5	16	34,6	49,4	ILLITA, Smectita, Caolinita
3	A	0-30	8,3	0,1	0,8	3,7	36,9	36,7	26,4	ILLITA, Smectita
	2B _t	30-60	8,7	0,1	0,7	3,7	33,8	31,4	34,8	
	2 B _{tk}	85-120	8,5	0,2	-	45	16	41,8	42,2	
	3 C _k	>120	8,5	0,2	-	20,25	37,8	24,9	37,3	
	B _t	3-70	8,4	0,2	-	18,7	24,1	29,7	46,2	
5	B _k	70-270	8,3	0,2	-	40,5	27,3	36,2	36,5	ILLITA, Caolinita
	B _{tk}	25-130	8,7	0,2	-	27,7	34,6	45,7	19,7	
4	BC	130-170	8,6	0,2	-	18,7	42,6	43,4	14	SMECTITA, Illita, Caolinita ILLITA, Smectita, Caolinita
	B _t	10-70	8,7	0,1	-	3	30,5	29,4	40,1	
6	B _k	10-70	8,1	0,3	-	73,5	22,5	47,9	29,6	ILLITA
	Ap	0-40	8,5	0,2	2,2	26,2	36,9	52,3	10,8	
9	B _t	40-102	8,2	0,3	-	6,7	27,3	39,4	33,3	ILLITA
	B _k	102-210	8,1	0,2	-	60,7	20,9	45,8	33	
	C	210-310	8,6	0,3	-	54	54,7	34,6	10,7	
7	B _w	0-60	8,4	0,2	-	36	32,8	34,5	32,7	ILLITA

Tabla II.- Propiedades físico-químicas de los perfiles

terrazas medias y bajas. Desde este planteamiento la interpretación de Gallardo *et al.*, (1987) pierde solidez.

La secuencia edáfica estudiada por Herail (1979) en un área exclusivamente silíceo de la Meseta española (también más septentrional y más húmeda) presenta suelos ácidos desaturados y carentes de horizontes carbonatados. La secuencia, formada por suelos fersialíticos débilmente lavados, fersialíticos lavados y ultisoles desrubefactados, desaturados y relativamente desargilizados sobre la terraza más alta, es la manifestación de una alteración creciente con la edad (liberación de Fe, alteración mineralógica y desarrollo de los horizontes Bt).

En ambos casos el punto de partida de esas secuencias es común porque son también comunes el área fuente y el piedemonte sedimentario terciario en que se asientan las altas plataformas siliciclásticas. En el segmento del valle del Guadalquivir estudiado aquí, esas antiguas plataformas siliciclásticas y sus rasgos edáficos asociados, se localizan adosadas al zócalo antiguo (Carral *et al.*, 1993) y a las altas terrazas del río Jándula cuya área de procedencia es totalmente silíceo (Santisteban *et al.*, en prensa).

Desde una perspectiva secuencial, el rasgo que comparten todas estas sucesiones morfosedimentarias y edáficas es la existencia de una alteración que se relaciona con la cota topográfica. Paralelamente, los suelos con horizontes argílicos se encuentran más desarrollados en las terrazas más altas. Por el contrario, la desigual aparición de los horizontes carbonatados en los tres ejemplos, no permite comparaciones secuenciales, pero sí establecer que existe una relación directa muy importante entre esa aparición con el área fuente y, también, en mucho menor grado, con su latitud geográfica. En esta situación general se enmarca la correspondencia entre el desarrollo de los horizontes petrocálcicos y la antigüedad de las terrazas en el Guadalquivir y también, aunque de forma incompleta, debido al carácter mixto y cambiante del área fuente, en la región madrileña estudiada por Vaudour (1979) y Gallardo *et al.* (1987). Lo que es incuestionable es que, en los tres ejemplos citados, el desarrollo de los suelos es paralelo a la antigüedad de la terraza y, que la tendencia secuencial es unidireccional. Esto fue puesto de manifiesto por Guerra (1972) en el estudio de la evolución edáfica del río Henares (Madrid). Las variaciones en función de la edad relativa del suelo se ponen siempre de manifiesto en los estudios cronosecuenciales, aunque con distinta valoración (Alexander, 1974; Birkeland, 1974; Birkeland *et al.*, 1980; Arduino *et al.*, 1984, 1986). En el caso del área de Madrid, donde existe un cambio en esa tendencia (suelos ácidos/suelos saturados), es imputable a la modificación sustancial del área fuente (Figs. 9 y 10).

El análisis anterior señala al *área fuente/sustrato geológico* como el principal factor diferencial en el tipo de secuencia edáfica desarrollada en cada caso. Por el contrario, *tiempo y morfología* son factores comunes a los tres ejemplos. Todas las secuencias se enmarcan en

el contexto geomorfológico de una evolución fluvial en disección en una cuenca sedimentaria arenoso-lutítica de edad terciaria, cuyo resultado es una franja escalonada de terrazas. La estimación de la duración del proceso es muy difícil de concretar en todos los sitios, pero en cualquier caso estaría en torno a los 5 M.a. (Fig. 10), aunque debe ser netamente superior a los dos ejemplos castellanos, sobre todo en la región madrileña, donde es posible que los niveles más antiguos alcancen el Mioceno Superior (Martín-Serrano, 1989). Por último, la *influencia climática* que en la actualidad es asumible en función de la distinta ubicación geográfica (Fig. 9), es difícil de demostrar desde un punto de vista evolutivo por la fuerte interferencia que tienen a lo largo del tiempo el resto de los factores formadores del suelo.

Excepto en la región de Madrid, cuyos cambios deben interpretarse por la modificación del área fuente, nunca aparecen grandes desviaciones a la tendencia general de los procesos edáficos en las secuencias. En el Guadalquivir, la recarbonatación final que afecta a los suelos de sus terrazas puede ser imputable a un proceso de aridificación. A excepción de este rasgo, no se detectan cambios o alteraciones petrológicas, mineralógicas o sedimentológicas importantes que puedan ser indicativas de algún otro tipo de variaciones geodinámicas directa o indirectamente inducidas por el clima.

Las argumentaciones precedentes confirman que el área fuente y la antigüedad de los procesos edáficos son los factores más determinantes en la tipología de la secuencia edáfica en este segmento del valle medio del río Guadalquivir. La posibilidad de una progresiva xerofitización durante el transcurso de la evolución del valle concede al clima una mayor relevancia en este caso que en los dos ejemplos de secuencias edáficas más septentrionales.

Conclusiones

La evolución del río Guadalquivir en este tramo de su valle ha originado un sistema de 10 niveles de terrazas colgadas y solapadas según tres grupos principales: *Terrazas altas* (+80-130 m) en la ribera meridional, *terrazas medias* (+25-65 m) en el margen septentrional y *terrazas bajas* (+12 y +20 m) en el eje del valle. Esta ubicación geográfica diferenciada de los grupos, si se suma a la propia orientación estructural de este segmento del valle y al carácter multiseccional de los depósitos que implica condiciones subsidentes, muy probablemente haya que atribuirlos a causas geotectónicas.

La evolución en el tiempo de los depósitos de las terrazas se manifiesta por la desaparición de las costras carbonatadas (aunque no de forma progresiva y gradual), la disminución de su espesor y el aumento de su carácter siliciclástico, todos ellos rasgos con una cierta relación con la tendencia de la catena edáfica sobre ellos desarrollada.

Los suelos de las terrazas se caracterizan por el desarrollo de fenómenos de descarbonatación,

carbonatación y argilización, cuyas intensidades están en función de su localización morfológica, es decir son, en mayor o menor grado directamente proporcionales a su antigüedad.

La litología del sedimento de la terraza y también las características del sustrato terciario en que se asienta el valle y las del área fuente del río, parece que tienen una incidencia fundamental en el desarrollo de estos procesos edáficos. El análisis comparativo con otras dos secuencias de suelos en la Meseta refuerza esta idea, pues determina que el área *fuentes/sustrato geológico* es el principal factor diferencial con ellas. *Tiempo y morfología* son comunes a las tres secuencias y la *evolución climática* en una determinada tendencia no parece resultar indispensable en la interpretación de cualquiera de los casos expuestos.

La catena de suelos desarrollada sobre las terrazas del Guadalquivir en este sector de su valle medio (Espeluy-Marmolejo), tiene como factores más determinantes el área fuente/naturaleza del sustrato y la antigüedad.

Este trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto MAGNA del Instituto Tecnológico Geominero de España (Mapa Geológico de España a escala 1:50.000, Hoja nº 904, Andujar). Nuestro agradecimiento a la Dra. Roquero, a un segundo revisor anónimo y al editor principal de la revista Dr. Calvo Sorando por su paciencia y por su contribución a la mejora del manuscrito principal

Bibliografía

- Aguirre, E., Lhenaff, R. y Zazo, C. (1973): Nuevos fósiles de elefantes en Andalucía, *Est. Geológicos*, 29: 295-306.
- Alexander, E.B. (1974): Extractable iron in relation to soil age on terraces along the Truckee River, Nevada. *Soil Sic. Soc. Am. Proc.*, 38: 121-124.
- Arduino, E., Barberis, E., Carraro, F. y Forno, M.G., (1984): Estimating relative ages from iron-oxide/total iron ratios of soils in the western Po Valley, Italy. *Geoderma*, 33: 39-52.
- Arduino, E., Barberis, E., Asmone, A., Zanini, E. y Franchini, M. (1986): Iron oxides and clay minerals within profiles as indicators of soil age in northern Italy. *Geoderma*, 37: 45-55.
- Baena R., Díaz del Olmo, F. y Recio Espejo, J.M. (1991): Valle medio del Guadalquivir: piedemonte y terrazas fluviales en la transversal Cardeña-Villa del Río-Bujalance (Córdoba). *Actas VIII Reunión AEQUA*, Valencia, p. 71.
- Birkeland, P.W., Burke, R.M. y Walker, A.L. (1980): Soils and surfaces rock-weathering features of shering and pre-sherwing glacial deposits, Eastern Nevada. California. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 91: 238-244.
- Carral, M.P., Guerra, A., Martín-Serrano, A., Jiménez, R. y Santisteban, J.I. (1993): Red soils in semiarid conditions in the Guadalquivir river. *2nd International Meeting on «Red -mediterranean soils»*. Adana (Turquía). *Abstracts*, 176-179.
- Cerezuela, F. (1977): Evaporación y microclimas de la vertiente mediterránea del sur de España. *Serv. Cient. Univ. Málaga*. 269 pp.
- Clemente, L., Menanteau, L. y Figueroa, E. (1977): Intento de cronología del segundo nivel de terraza del Guadalquivir en los alrededores de Sevilla, en relación con los restos fósiles de Elephas hallados en su borde. *Actas II Reunión G.E.T.* (1975). Jaca (Huesca). *Trabajos sobre Neógeno-Cuaternario*, 6: 49-55.
- Díaz del Olmo, F., Vallespi, E., Baena Escudero, R. y Recio Espejo, J.M. (1989): Terrazas pleistocenas del Guadalquivir occidental: geomorfología, suelos, paleosuelos y secuencia cultural. En *El Cuaternario en Andalucía occidental*, *AEQUA Monografías*, 1: 33-42.
- FAO (1991): *Mapa mundial de suelos*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma. 142 pp.
- Gallardo, J., Pérez González, A. y Benayas, J. (1987): Paleosuelos de los piedemontes villafranquienses y de las terrazas pleistocenas de la región del valle del Henares-Alto Jarama. *Bol. Geol. Minero*, 98: 27-39.
- Gil, J., Corral, L. y Paneque, G. (1987): Reconocimiento y evaluación de suelos del valle del Guadalquivir: zona Marmolejo-Mengíbar (Jaén), *An. Edafol. y Agrob.* 46: 303-317 y 601-619.
- Guerra, A. (1972): *Los suelos rojos en España. Contribución a su estudio y clasificación*. Publ. Dpto. de Suelos del Instituto de Edafología y Biología Vegetal. C.S.I.C. 253 pp.
- Goy, J.L., Zazo, C. y Rodríguez Vidal, J. (1994): Cordilleras Béticas-Islas Baleares. En *Geomorfología de España*, *Gutierrez Elorza, M. (Cord.)*: Ed. Rueda, Madrid: 123-157
- Güzel, N. y Wilson, M.J. (1981): Clay-mineral studies of a soil chronosequence in southern Turkey. *Geoderma*, 25: 113-129.
- Herail, J. (1979): Les facies d'altération des terrasses alluviales de la moyenne vallée du Duerna (prov. de León): un exemple de l'évolution des nappes alluviales silicenses du nord-ouest de la Vieille Castille. *Acta Geol. Hisp.*, Homenatge a Lluís Solé i Sabaris, 14: 466-473.
- Martín-Serrano, A. (1989): Características, rango, significado y correlación de las Series Ocre del borde Occidental de la Cuenca del Duero. *Studia Geol. Salmanticensis*, 5: 239-252.
- Munsell Soil Co. INC. (1954): *Munsell soil color charts*. Mary Land. USA.
- Rivas Martínez, S. (1981): Les étages bioclimatiques de la végétation de l'Espagne. *Actas III. Cong. Optima. Madrid. An. Jrd. Bot.*, 37 (2): 251-268.
- Santisteban, J.I. y Martín-Serrano, A. (1991): Neogene fan deltas in the northern Guadalquivir basin (Andujar, Jaén, Spain). *Cuadernos Geología Ibérica*, 15: 163-183.
- Santisteban, J.L., Martín-Serrano, A. y Carral, M.P. (en prensa.): Cartografía y Memoria del Cuaternario. En: Mapa Geológico de España a escala 1:50.000. Hoja nº 904 (Andújar). Inst. Tecnol. Geom. España
- Santos, J.A., Jerez, F. y Saint-Aubin, J. (1991): Estudio sedimentológico de un sector del río Guadalquivir en las proximidades de Andújar (Provincia de Jaén). Los depósitos de la terraza +6 m (T₄). *Estudios Geol.*, 47: 43-55.
- USDA, 1975: *Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. Soil Conservation Service U.S. Department of Agric.

- Handbook1, 436. Washington DC.
- USDA, 1972: Soil Survey laboratory methods and procedures of collecting soil samples. *Soil investigations Rep.*, 1 Washington.
- Torrent, J.; Schwertmann, U. y Schulze, D.J. (1980): Iron oxide mineralogy of some soils of two river terrace sequences in Spain. *Geoderma*, 23: 191-208.
- Vaudour, J. (1979): *La région de Madrid. Altérations, sols et paleosols*. Thèse Doctorat d'Etat. Aix. Ed. Ophiris, 390 pp.

Manuscrito recibido el 20 de Mayo de 1997

Aceptado el manuscrito revisado el 10 de Mayo de 1998