

FENOMENOS DE CONVERGENCIA GENETICA EN SUELOS DE TERRAZAS FLUVIALES: VALLE DEL RÍO TAJO, MADRID-TOLEDO, ESPAÑA

E. Roquero¹, J.L. Goy² y C. Zazo³

¹ Dpto de Edafología, E.T.S.I. Agrónomos, Universidad Politécnica, 28040 Madrid

² Dpto de Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca, 37008 Salamanca

³ Dpto de Geología, Museo Nacional de Ciencias Naturales, José Abascal 2, 28006 Madrid

Resumen: Las relaciones entre los suelos desarrollados en las terrazas fluviales del Tajo, en el sector comprendido entre las confluencias del río Jarama y del Arroyo Guatén (provincias de Madrid y Toledo), muestran una cierta complejidad. Se han establecido 11 prototipos de perfiles edáficos representativos de las propiedades genéticas de un total de 47 perfiles estudiados en niveles de terraza del Tajo de distintas edades. El estudio detallado de la distribución de estos muestra un cierto paralelismo en cuanto a los procesos formadores que han tenido lugar. Ciertas tendencias, como los procesos de lavado, traslocación de carbonatos, argiluvación y rubefacción, se mantienen y repiten en toda la secuencia generando unos mismos resultados, aunque con una gradación en intensidad o desarrollo de las propiedades genéticas en función de la edad. Este fenómeno por el que se generan perfiles o suelos con similares características lo denominamos «convergencia genética» y limita marcadamente la variabilidad final de los perfiles resultantes, que reflejan secuencias de procesos edafogenéticos semejantes. Su origen lo atribuimos a una mayor estabilidad o inestabilidad geomorfológica de las superficies, y en consecuencia a la recuperación de propiedades que ha sido posible tras la intervención de los fenómenos edafogenéticos anormales de erosión y superposición subsecuentes. La convergencia se manifiesta en la existencia mayoritaria de determinados subórdenes: el Xeralf (grupos rhodoxeralf, palexeralf) con los subgrupos de suelos rhódico y petrocálcico (Soil Taxonomy, USDA 1992) y los Xerochrept calcixeróllicos o petrocálcicos en los casos en los que intervienen activamente en la evolución de los suelos los procesos de erosión. Cuando dominan los procesos de superposición vuelve a manifestarse la convergencia, puesto que la evolución edáfica de los nuevos materiales tiende a la génesis del Rhodoxeralf o en su defecto del Palexeralf petrocálcicos. Como es evidente en estos casos, el Xerochrept calcixeróllico e incluso el petrocálcico son un paso más de la evolución hacia la tendencia final de génesis de los Xeralf. La aplicación del concepto de convergencia genética puede generalizarse a otras cuencas terciarias con litologías similares, donde la karstificación o la neotectónica afecta a la morfología de los sedimentos fluviales.

Palabras clave: suelos, terrazas, factores y procesos formadores, convergencia genética

Abstract: An analysis of the complex relationships between soils and geomorphology in Pleistocene fluvial terraces (central sector of the the Tajo river basin) has been carried out. 47 soil profiles developed on the fluvial terraces have been summarized in eleven prototypes which have been established on the basis of the morphology and horizon sequence, and being representative of the genetic conditions in this area. Taking into account the complexity of soil forming processes, it is interesting to point out that some of them (carbonate leaching, clay illuviation, rubification..) follow general trends. These trends are the responsible that same results be generated, independently of the supposed variation in the soil forming factors, although with a gradation in the development of soil properties with the age. This phenomena that we have called «genetic soil convergence» restricts markedly the final variability of soil profiles, which reflects similar sequences of pedogenetic processes. The main cause of this convergence is the geomorphological stability of the terrace surfaces, and consequently the soil profile evolution is conditioned by the abnormal pedogenetic processes like erosion and superposition. As a result, Xeralfs (rhodic, petrocalcic) predominate in cases of geomorphic stability, and correspond to the best and more evolved profiles where erosion has a minimal intervention. In contrast, Xerochrept (calcixerollic, petrocalcic) are linked to a dominant erosion process representing the simplest convergence phenomena. When superposition processes dominate the pedological evolution degree of the new materials determines once again the convergence to the Xeralfs in most favourable cases, or Xerochrepts when maximal evolution degree is not reached because of the more recent age of the superposed parent material. The application of soil genetic convergence concept in the cartography of soils in fluvial areas can be generalized to other Tertiary basins with similar lithologies, where karstification or neotectonic processes affect the morphology of fluvial sediments.

Key words: soils, terraces, soil forming processes, soil genetic convergence

Roquero, E., Goy, J.L., y Zazo, C. (1999): Fenómenos de convergencia genética en suelos de terrazas fluviales: valle del río Tajo, Madrid-Toledo, España. *Rev. Soc. Geol. España*, 12 (3-4): 329-338

Los suelos desarrollados sobre terrazas fluviales han sido objeto de numerosos estudios, enfocados tanto desde el punto de vista de la caracterización de sus propiedades y clasificación con fines agronómicos, como desde una perspectiva geomorfológica más precisa, en la que se plantean los aspectos referidos a la cronología ligados a otros factores como la litología o a los procesos formadores. Así, destacan en la Cuenca del Duero los trabajos de Torrent (1976), Pérez González (1979) y Alonso *et al.* (1992); en la Cuenca del Guadalquivir los trabajos de Díaz del Olmo *et al.* (1989); en la Cuenca del Ebro, Alberto Giménez *et al.* (1984), Sancho y Meléndez (1992), y en la Cuenca del Tajo: Medina (1977), Pérez González *et al.* (1991) y Roquero *et al.* (1993, 1997). Todos los trabajos aportan información muy valiosa en lo referente a la actuación y resultado de los procesos formadores como las profundidades de lavado y acumulación de carbonatos, presencia de cementaciones calizas, intensidad de la argiluviación y rubefacción, etc, localizando a partir de qué nivel se manifiestan por primera vez en la secuencia de terrazas respectiva los horizontes genéticos característicos de los procesos edafogenéticos. Sin embargo, no existen interpretaciones de síntesis en la génesis y evolución de los perfiles del suelo en el contexto global de las secuencias de terrazas, aspecto que abordamos en este trabajo.

La zona de estudio se localiza en el sector central de la Cuenca del río Tajo, que corresponde al área centro

meridional de la denominada Cuenca Terciaria de Madrid. El valle del Tajo se encaja principalmente en los materiales neógenos miocenos del relleno de la cuenca constituidos por materiales detríticos y químicos de origen lacustre. Los materiales cuaternarios se apoyan sobre los anteriores, y están representados fundamentalmente por las terrazas fluviales del río Tajo y formaciones asociadas (Fig.1).

Si tenemos en cuenta la complejidad que representa la variación de los factores formadores considerados tradicionalmente (Jenny, 1941) a lo largo de todo el Cuaternario puede parecer paradójica la escasa variabilidad de los suelos desarrollados en las terrazas de este sector del valle del Tajo. Sin embargo, los perfiles de suelos que observamos en la actualidad son el resultado de la superposición de un complejo sistema de procesos que enmascaran en ocasiones parcial o totalmente las actuaciones individuales de los procesos edafogenéticos anteriores. En la zona estudiada el factor geomorfológico parece tener especial relevancia, teniendo en cuenta que consideramos que este factor no puede ser desligado del factor geológico (mineralógico y textural) tradicional ni del contexto temporal.

En este trabajo se define el concepto de «convergencia genética de los suelos», analizando la complejidad de las relaciones existentes entre los suelos desarrollados en las terrazas fluviales del Pleistoceno, su génesis y el papel de la geomorfología como causa de convergencia genética. Es evidente que durante el Cuaternario

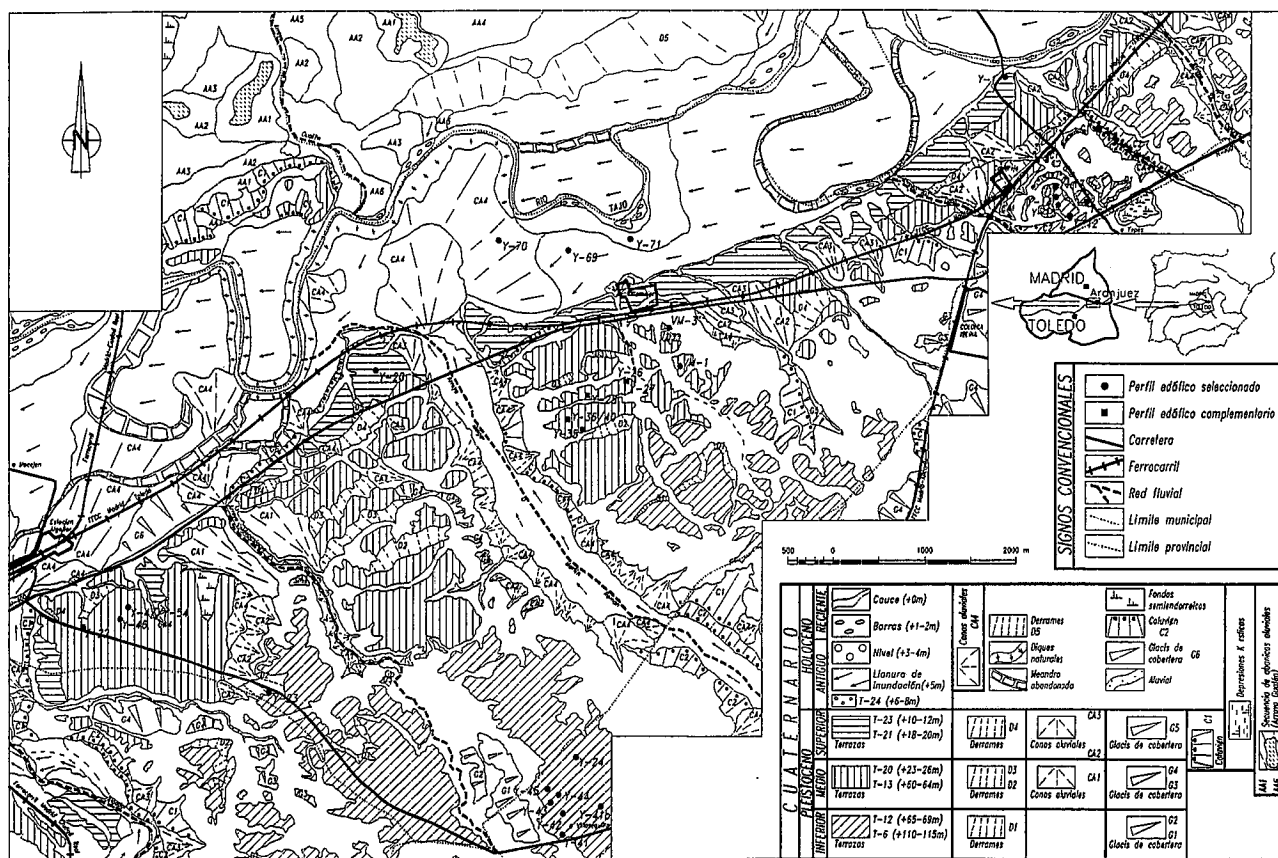


Figura 1.- Situación geográfica del área de estudio y mapa geomorfológico con la posición de los perfiles edáficos estudiados.

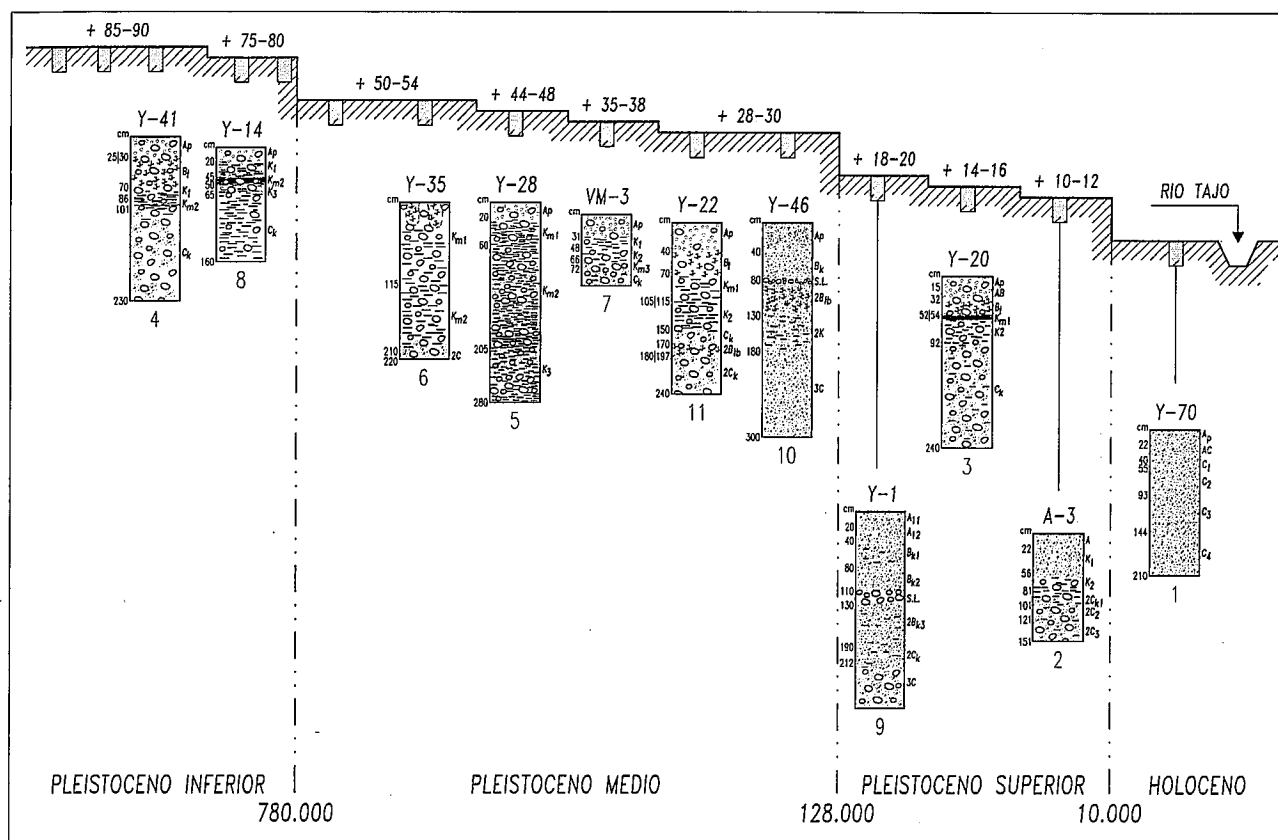


Figura 2.- Secuencia simplificada de los niveles de terraza, localización y morfología de los perfiles representativos de los 11 prototipos morfológicos definidos (el número situado debajo de cada perfil corresponde al número de prototipo).

los factores formadores, o se han mantenido, o han variado cíclicamente, como el clima y la vegetación que depende tan estrechamente del mismo, por lo que, si las causas (factores formadores) se asemejan los efectos (formación del suelo, generación de los horizontes...) tienden a ser los mismos.

La aplicación del concepto de convergencia genética de los suelos en formaciones fluviales cuaternarias abre probablemente un campo importante en el estudio de paleosuelos desarrollados en series sedimentarias antiguas precuaternarias, siempre que exista una base estratigráfica y cronológica detallada que permita extrapolar (correlacionar) las secuencias de procesos, aunque con la dificultad que implica la ausencia o deficiencia de información en alguno de los factores formadores como las sucesivas vegetaciones.

Materiales y métodos

Se ha realizado una cartografía geomorfológica detallada de un sector de las terrazas fluviales del valle del Tajo (Fig. 1). La cronología relativa de estas terrazas se estableció a partir de criterios de fauna de vertebrados, industria lítica (Silva, 1988; Silva *et al.*, 1988; Roquero *et al.*, 1990; Rus *et al.*, 1993), relaciones geométricas y cartográficas y por correlación con otras áreas de la Cuenca del Tajo.

Se estudiaron y describieron en el campo 47 perfiles desarrollados en distintos niveles de terraza. La des-

cripción morfológica de los perfiles en el campo y la designación de horizontes del suelo se realizó según la normativa FAO (1977), y para los horizontes cálcicos se siguió la nomenclatura de Gile *et al.* (1965). El color en muestra seca y húmeda se determinó según Munsell Soil Color Charts (1990). La clasificación de los perfiles del suelo se realizó según la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1992).

Se seleccionaron las variantes morfológicas más representativas de los 47 perfiles estudiados para su muestreo. De las muestras tomadas de cada uno de los horizontes se realizaron las siguientes determinaciones de acuerdo con USDA (1972): textura o granulometría, materia orgánica, CaCO_3 equivalente, reacción (pH al agua), conductividad eléctrica y capacidad de intercambio catiónico (NaOAc a pH 8,2; Bower *et al.*, 1952). El estudio mineralógico se ha realizado por Difracción de Rayos X con un difractor Philips Pw 1130 (Roquero *et al.*, 1997). Se han estudiado las muestras mediante el método del polvo total; las arcillas se han analizado mediante agregados orientados (tratamiento con etilenglicol, calentado a 550°C durante 1 hora).

Resultados: caracterización general de los suelos de las terrazas

La presencia de horizontes argílicos y de cementaciones calizas, aunque con evidentes diferencias en cuanto a desarrollo (espesor) claramente rela-

Número de prototipo	Secuencia de Horizontes	Perfiles representativos	Perfil prototipo
1	A-C	Y-69, Y-70, Y-71	Y-70
2	A-K-Ck	A-3, Y-13	A-3
3	A-Bt-Km-Ck/A-Bt-K-Ck	Y-18, Y-19, Y-20	Y-20
4	A-Bt-K1-Km2-Ck	Y-15, Y-24, Y-25, Y-41	Y-41
5	A-Km1-K2-Ck	Y-44, Y-28, Y-38, Y-47, 54	Y-28
6	A-Km-Ck	Y-26, Y-27, Y-30, Y-31, Y-32, Y-33, Y-34, Y-35, Y-36, Y-37, Y-39, Y-40, Y-42, Y-43, Y-45	Y-35
7	A-K1-Km2-Ck	VM-3, Y-17	VM-3
8	A-K1-Km2-K3-Ck	VM-1, Y-12, Y-14	Y-14
9	A-Bk-2Bk-2Ck-3C	Y-1	Y-1
10	A-Bk-2Btb-2K-3C	Y-46, Y-48, Y-53, Y-50, Y-49, Y-51, Y-52	Y-46
11	A-Bt-Km1-K2-2Btb-2Ck	Y-22, Y-41b	Y-22

Tabla I.- Número de prototipo con su secuencia de horizontes correspondiente, perfiles representativos y ejemplo (perfil seleccionado) de cada prototipo.

cionadas con la edad, constituye uno de los rasgos comunes en los suelos desarrollados sobre las terrazas, además de otros aspectos como la alta proporción de elementos gruesos, heredada del material original.

La figura 2 representa la secuencia simplificada de los distintos niveles de terraza y la posición y morfología de una selección de perfiles que corresponden a los casos más frecuentes de los perfiles estudiados. Tal y como se observa en dicha figura, hemos englobado los 47 perfiles estudiados en un total de 11 prototipos, en gradación creciente de desarrollo y complejidad (el número del prototipo está representado en caracteres arábigos situado debajo de cada perfil). En la Tabla I figuran los prototipos mencionados, las secuencias de horizontes que los caracterizan, y los perfiles que corresponden a cada prototipo. El prototipo 1 corresponde a los suelos aluviales típicos de la llanura de inundación, con muy escasa o nula evolución edáfica; el prototipo 2 corresponde a los perfiles algo más evolucionados con acumulación caliza no cementada.

Los prototipos 3 y 4 corresponden a los perfiles mejor conservados con desarrollo de horizontes argílicos y cálcicos o petrocálcicos; los prototipos 5 a 8, corresponden a los perfiles truncados, donde el horizonte cálcico o petrocálcico aparece próximo a la superficie. Por último, los prototipos 9, 10 y 11 corresponden a perfiles policíclicos, lo que se refleja en su secuencia de horizontes por la presencia de horizontes enterrados.

En las texturas de estos suelos y como consecuencia de la herencia del material original la fracción arena, y especialmente la gruesa, aparece en porcentajes elevados, por lo que son frecuentes las clases franco arenosas. Como es evidente en los horizontes argílicos, debido al enriquecimiento en arcilla iluvial, las clases texturales dominantes son ya francoarcillosas o arcillosas. El carbonato cálcico equivalente, presenta grandes variaciones, desde valores en torno al 10% en los suelos actuales, asociados al alto contenido del material original (heredado por tanto de los materiales carbonatados de la cuenca), hasta 70-80% en los hori-

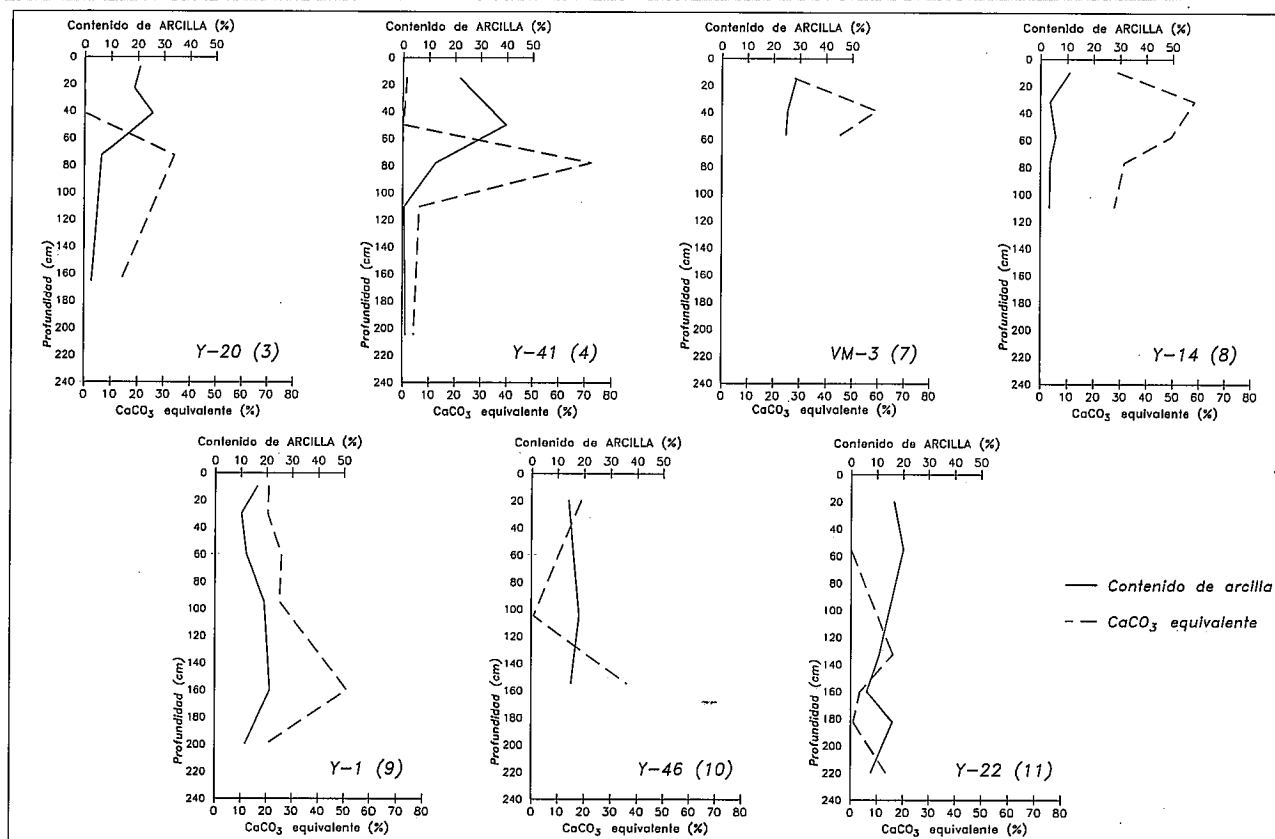


Figura 3.- Distribución de los contenidos de arcilla y CaCO_3 equivalente con la profundidad de los perfiles representativos de los prototipos principales (la numeración arábica corresponde al número de prototipo).

zotes cálcicos o petrocálcicos, debido a los efectos de la acumulación caliza (Roquero *et al.*, 1997).

La distribución de los contenidos de arcilla y carbonato cálcico equivalente según la profundidad de los prototipos más significativos están representados en la figura 3. Se han obviado los prototipos 1, 2, porque sus posiciones en las unidades más recientes implican unos tiempos de formación insuficientes para cualquier proceso genético significativo, y los tipos 5 y 6 por corresponder a fases de erosión extrema conservando sólo el horizonte petrocálcico preexistente a muy poca profundidad de la superficie del suelo.

Los prototipos 3 y 4 muestran claramente un incremento del contenido de arcilla correspondiente al espesor del horizonte argílico, aunque con una diferencia en el valor numérico debida a la diferencia de edad de ambos perfiles (Roquero *et al.*, 1997). Destacan también los máximos del contenido de arcilla a mayor profundidad para los prototipos 10 y 11 que reflejan la presencia de horizontes argílicos enterrados.

El comportamiento de la distribución en profundidad del CaCO_3 de los prototipos 3 y 4 muestra un claro paralelismo con la distribución anterior, existiendo un espesor superior descalcificado y un máximo del contenido de carbonato (situado siempre por debajo del espesor correspondiente al horizonte argílico), cuya profundidad empieza a 52 cm en el prototipo 3, y a partir de 70 cm en el prototipo 4 (Figs. 2, 3).

Para el resto de los prototipos existe una variabilidad más marcada, referida tanto al comportamiento de la distribución del CaCO_3 como a la profundidad a la que se inicia la acumulación caliza. En los perfiles de los prototipos 5 y 6, la profundidad de la acumulación se inicia a partir de los 20 cm (Fig. 2). En los prototipos 7 y 8 la acumulación de carbonato cálcico presenta un máximo más cercano a la superficie, comprendido entre 20 y 40 cm (Figs. 2, 3).

Los prototipos 9 y 10 presentan un contenido moderado en los horizontes más superficiales, y a una profundidad en torno a 130 cm se inicia el máximo de la acumulación caliza. La principal diferencia entre ambos radica en que en el tipo 9 el incremento es más gradual, mientras que en el 10 se produce tras un espesor descalcificado correspondiente al horizonte argílico enterrado que hemos mencionado anteriormente (Figs. 2, 3).

Finalmente, el prototipo 11 es el que presenta una mayor complejidad, apareciendo el paralelismo entre el comportamiento del carbonato y la arcilla, tal y como hemos descrito para los prototipos 3 y 4, con la diferencia de que en este caso se repite la misma tendencia en profundidad.

Discusión: Génesis de los Suelos

Intervención de los factores formadores

Desde el punto de vista del clima, en la actualidad

existe una gran homogeneidad climática en toda el área de estudio, que corresponde a un tipo semiárido mesotérmico (Thorntwaite, 1948). En cuanto al paleoclima durante el Cuaternario, los contrastes térmicos y pluviométricos estacionales, tal como hoy día los conocemos, han sido un rasgo común. De acuerdo con los trabajos que aportan datos climáticos basados en las faunas de vertebrados, el clima durante el Cuaternario ha sido de tipo estacional con carácter cálido seco durante el Pleistoceno inferior (Sesé y Ruiz Bustos, 1992). Los datos para el Pleistoceno medio indican un clima similar al actual (Sanchiz y Sanz, 1980; Sanz y Sanchiz, 1980; Sesé y Ruiz Bustos, 1992) de tipo templado aunque algo más húmedo (Soto Rodríguez, 1980; López Martínez, 1980). Los datos disponibles para el Pleistoceno superior indican un clima con mayor contraste estacional que el actual, de tipo frío y seco. Finalmente, a partir de los 10.000 años, en que se inicia el Holoceno, hasta la actualidad, el clima se caracteriza por ser en general templado seco aunque no tanto como durante la última glaciación.

La modelización de análogos climáticos en función de los espectros polínicos realizada por Martín *et al.* (1995) en las terrazas de +30 m (Pinedo, Pleistoceno medio) y +7-9 m (Valdelobos, Pleistoceno superior avanzado) en la margen derecha del río Tajo aguas arriba de Toledo, reflejan unos valores de paleotemperatura entre 11-18°C, existiendo una diferencia algo mayor en los valores de paleoprecipitación (240-350 y 240-400 mm respectivamente), que reflejarían un clima de tipo mediterráneo cálido, de condiciones más húmedas en el lapso correspondiente al nivel del Pleistoceno Superior avanzado. Estos valores son comparables a los actuales, no sólo con los de la estación meteorológica de Toledo (precipitación media anual de 382 mm y temperatura media anual de 15°C; Elías Castillo y Ruiz Beltrán, 1977, 1981), sino también con un área más amplia que abarca nuestro estudio (observatorios de Aranjuez, Mocejón de la Sagra, con precipitaciones medias anuales de 427 mm y 412 mm, y temperaturas medias anuales de 13,7 °C y 14°C, respectivamente. De acuerdo con estos autores, los cambios de humedad son algo más marcados que los de temperatura, aunque se mantienen siempre las condiciones de tipo mediterráneo.

La vegetación natural, si existiera, correspondería a la asociación Quercetum rotundifoliae sigmentum (*Quercus rotundifolia*, *Bupleuro rigidi*) (Rivas Martínez, 1987). En la actualidad, esta vegetación potencial ha sido eliminada y sustituida en su totalidad por cultivos. Los únicos datos palinológicos disponibles del trabajo citado anteriormente (Martín *et al.*, 1995) muestran una presencia de *Juniperus*, gran desarrollo de *Olea* y sustitución por *Quercus* de tipo perennifolio para el nivel del Pleistoceno medio, y un dominio de *Juniperus*, *Quercus* de tipo perennifolio, sustituido a techo por *Olea*, en el nivel del Pleistoceno superior alto, pero manteniéndose siempre la tendencia al bosque mediterráneo.

Asumiendo la definición propia de la Geomorfología como el estudio de la génesis de formas y depósitos en su contexto temporal, consideramos que el factor geomorfológico engloba en sí los factores topografía, material original y tiempo del esquema tradicional planteado por Jenny (1941). En este sentido el concepto de terraza fluvial implica la morfología de la unidad, el depósito y la edad relativa.

Morfológicamente las terrazas aparecen como superficies planas de mínima pendiente, generando una secuencia escalonada apoyada en el sustrato mioceno. El Mioceno está representado por materiales detríticos o por materiales carbonatados o yesíferos. Cuando estos últimos están afectados por procesos de karstificación, la deformación afecta a la superficie de la terraza que adquiere una morfología ondulada adaptándose al relieve subyacente.

El depósito de las terrazas que constituye el material original sobre el que se desarrollan los suelos puede estar formado por dos tipos de facies: unas con altos contenidos en elementos gruesos cuando dominan las facies de barras de gravas y cantos, o de relleno de canal y otras correspondientes a facies de inundación en donde dominan los limos y arcillas.

Por último, el factor tiempo se puede plantear a partir de la edad relativa de la terraza sobre la que se desarrolla el suelo. Las edades relativas del sistema de terrazas se establecieron a partir de datos de fauna de vertebrados e industria lítica, criterios geomorfológicos y cartográficos y de campo de nuestra zona y áreas próximas (Silva, 1988; Silva *et al.*, 1988, Roquero *et al.*, 1990; Rus *et al.*, 1993) y son las siguientes: Pleistoceno inferior (T₁-110 m - T₁₃- 60 m), Pleistoceno medio (T₁₄-58 m - T₂₀ 23 m), Pleistoceno superior (T₂₁-20 m- T₂₃- 10 m) y Holoceno (T₂₄ 6-8 m y llanura de inundación) (Fig. 2).

Sin embargo, es necesario tener en cuenta una serie de aspectos en cuanto al factor tiempo: en principio se podría considerar que cuanto más antigua sea la unidad geomorfológica y/o la formación superficial sobre la que se desarrolla el suelo, éste habrá alcanzado un mayor grado de evolución. Sin embargo, la relación «edad de la unidad geomorfológica-edad del suelo» no es tan directa, puesto que se debe tener en cuenta que la evolución del suelo no tiene por qué ser continua, es decir, puede ser interrumpida por distintos procesos. Entre estos procesos la erosión y la superposición de depósitos son los fundamentales, y su efecto se manifiesta bien en los suelos truncados total o parcialmente, o bien en los suelos enterrados, respectivamente.

En unidades que hayan estado sometidas a periodos de mayor estabilidad, la relación con el suelo sobre ella desarrollado sí es más directa; en estos casos, de hecho, la cronología relativa establecida para la unidad puede predatar al suelo.

Por lo tanto, una terraza, aunque tenga mayor edad que otra, puede contener suelos menos evolucionados; éste sería el caso en que un nuevo aporte recubriera la forma-

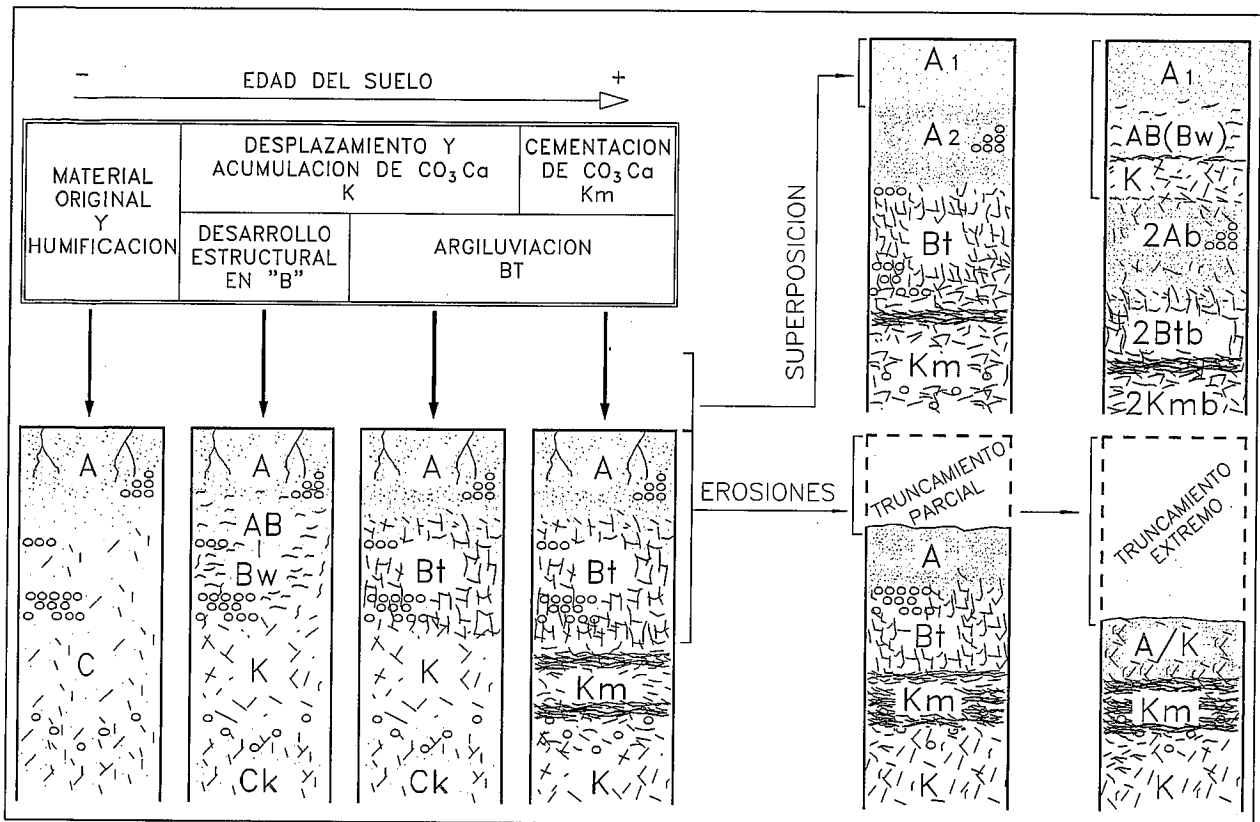


Figura 4.- Síntesis de procesos formadores y tendencias de evolución posterior de los perfiles.

ción superficial anterior sobre la que se había desarrollado el suelo que, en algunos casos se conserva totalmente. Cuando el suelo desaparece por efecto de la erosión, sólo si existen restos característicos de su perfil, es posible reconocer el grado de evolución que pudo alcanzar.

Secuencia de los procesos formadores

De acuerdo con las variaciones de los factores formadores expuestos anteriormente, la secuencia de los procesos formadores de los suelos en las terrazas en el área de estudio sería:

Humificación: pudo ser importante en tiempos pasados del Pleistoceno y del Holoceno, teniendo en cuenta que la vegetación natural no habría alcanzado el estado de degradación actual. Su presencia facilitaría las posibilidades de lavado del carbonato al generar componentes ácidos. Se trataría de un bosque claro con un estrato de vegetación arbórea bajo el cual por lo menos existe una vegetación sufruticosa y herbácea, siendo el aporte e incorporación de materia orgánica al suelo mayor en estas últimas. En la actualidad el efecto de la vegetación es difícilmente evaluable en los perfiles de suelo que observamos, debido a que el uso agrícola ha eliminado la influencia que pudiera tener la vegetación natural.

Lavado y acumulación y cementación del carbonato cálcico: en las condiciones climáticas actuales el lavado de los carbonatos genera una acumulación a profundidades comprendidas entre 25 cm y 50-60 cm para los ciclos climáticos plurianuales más húmedos

(Roquero, 1994). Las acumulaciones a mayores profundidades deben ser interpretadas como un efecto paleoclimático o debidas a la reiteración del proceso. La cementación aparece en los suelos más antiguos y puede interpretarse como el resultado de repeticiones sucesivas del proceso de disolución y reprecipitación, determinando una acumulación y cristalización del carbonato cálcico a partir de los horizontes cálcicos preexistentes, provocando el endurecimiento y la cementación (horizonte petrocálcico).

Por otro lado la granulometría del sustrato mioceno puede condicionar la actuación de los procesos de lavado si el depósito de la formación de la terraza tiene escasa potencia. Los dos tipos principales de sustrato que aparecen están formados bien por margas o por materiales arenosos. En este último caso, y cuando el espesor del depósito de la terraza es pequeño, el sustrato detrítico aparece afectado por una calcificación de origen edáfico, probablemente relacionada con la evolución de los perfiles originales una vez erosionados (prototipos truncados), más que con la génesis del perfil original. No descartamos la asociación a los procesos de acumulación de lavado estrictamente edáficos una cierta intervención de la capilaridad cuando existen texturas adecuadas para estos ascensos.

La procedencia fundamental del carbonato está asociada tanto a su presencia en el material original (valores del CaCO_3 equivalente hasta un 20% en los materiales sin edafizar J. Roquero, 1994) como al aporte procedente del entorno de los relieves miocenos

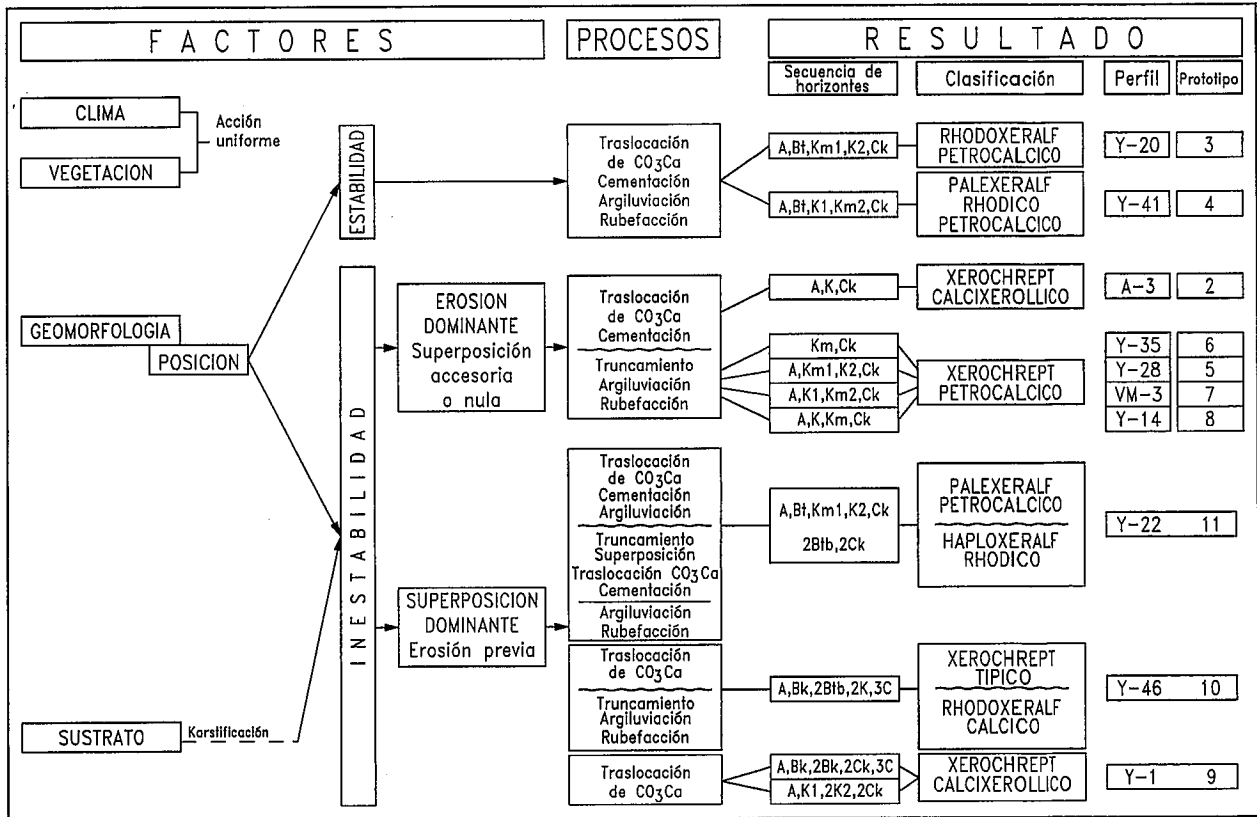


Figura 5.- Convergencia genética: modelo factor-proceso-perfil resultante.

carbonatados de este sector de la cuenca.

La argiluvación tiene lugar tras el lavado reiterado de la parte superior del perfil del suelo (horizontes eluviales) que elimina la caliza en primer lugar, disminuye los contenidos de calcio y magnesio de cambio, (sustituyéndose parcialmente por el hidrógeno) y provocando la dispersión potencial de la arcilla, que en las condiciones de clima estacional contrastado, permite su traslocación a causa de la rápida infiltración de la lluvia a la zona iluvial del perfil, generando el horizonte argílico.

Rubefacción: la liberación de los óxidos de hierro, tras la decalcificación y su deshidratación irreversible bastante intensa, da lugar a la coloración roja típica de los suelos con perfiles más desarrollados, ya que los óxidos de hierro descienden incorporados a la arcilla en el proceso de iluvación.

Todos estos procesos son los responsables de la existencia del Rhodoxeralf petrocálcico como suelo clímax (Roquero *et al.*, 1993).

La figura 4 sintetiza la sucesión de los procesos formadores en los perfiles iniciales y la evolución posterior a que están sometidos. Los perfiles mejor desarrollados están constituidos por una secuencia de horizontes de tipo A-Bt-Km-K-Ck-C o de tipo A-Bt-K-Km-Ck-C y corresponden a lo que en la actualidad interpretamos como los perfiles de suelo originales preservados en su totalidad. Sin embargo, tal y como hemos expuesto anteriormente, esta secuencia no es frecuente, y cuando se mantiene, suele ser observable el

truncamiento parcial del horizonte superficial. El truncamiento extremo del perfil conduce a la presencia de otros perfiles en los que el horizonte petrocálcico aparece muy cerca de la superficie por debajo de un horizonte A de mínimo espesor. Por tanto, la secuencia de tipo A-Km-C corresponde a perfiles cuyos horizontes A y B originales han sido erosionados.

El caso contrario muestra una gran complejidad y está representado por perfiles policíclicos y poligénicos, en los que se producen recubrimientos que a su vez experimentan sus respectivos ciclos edáficos. Las secuencias de horizontes son muy variables, reflejando desde una evolución moderada (A-Bw-K-2Ab-2Btb-2Kmb) a intensa (A-Bt-Km-K-Ck-2Btb-2Kb), y con una complejidad máxima cuando los efectos de la evolución edáfica de los nuevos aportes se superponen a los ciclos anteriores (generándose secuencias similares a las anteriores pero en las que los horizontes argílicos son de tipo Btk, presentando una calcificación apreciable).

Modelo factor-proceso-perfil resultante: fenómenos de convergencia

Teniendo en cuenta la complejidad de los procesos formadores de los suelos, es interesante hacer destacar que algunas tendencias (procesos de lavado, traslocaciones) son generales lo que provoca que, independientemente de la supuesta variación de los factores formadores, se generen los mismos resultados.

Este fenómeno, que denominamos convergencia genética limita marcadamente la variabilidad final de los perfiles resultantes, que reflejan secuencias de procesos edafogenéticos semejantes. En la figura 5 se representa en tres columnas los factores y procesos formadores, la secuencia de horizontes, y finalmente la clasificación USDA Soil Taxonomy (1992) y los perfiles tipo donde se manifiestan estos fenómenos de convergencia.

Ante la actividad genérica del clima (considerando las variaciones propias del Cuaternario expuestas anteriormente) y de la vegetación, que podemos considerar función del anterior a efectos genéticos, la causa principal de estos fenómenos de convergencia genética la atribuimos a la estabilidad geomorfológica de las superficies de las terrazas.

La estabilidad consecuente de los suelos está condicionada por la posición de los perfiles dentro de la unidad de la terraza, que controla la mayor o menor susceptibilidad a la erosión o el aporte de nuevos depósitos. A su vez, esta susceptibilidad está controlada por la morfología de la superficie de la terraza, que cuando está afectada por procesos como la karstificación de un sustrato soluble infrayacente adopta una configuración ondulada, con un mesorrelieve caracterizado por depresiones suaves.

El predominio de estabilidad muestra los perfiles más evolucionados y mejor preservados en la actualidad que corresponde al «suelo clímax» (Roquero *et al.*, 1993). Clasificando los suelos en la categoría de subgrupo, se aprecia la tendencia a que el Rhodoxeralf Petrocálcico es el prototipo más desarrollado, y en el que los fenómenos de erosión han intervenido en menor grado, si bien existen grados intermedios en que la convergencia no ha sido completa apareciendo Palexeralf Rhódico (Petrocálcico si establecemos un intergrado tentativo). En este grupo se engloban los prototipos 3 y 4. A pesar de que ambos tipos aparecen en los suelos de terrazas de distintas edades, existe una cierta tendencia a que los más antiguos y mejor preservados correspondan al prototipo 4, cuya principal diferencia con el 3 radica en la profundidad a la que aparece la cementación y en su espesor.

Cuando domina la inestabilidad se producen dos casos diferentes, que dependen de la recuperación de propiedades que ha sido posible tras la intervención de los fenómenos edafogenéticos anormales de erosión o superposición:

1) El fenómeno de convergencia más simple corresponde a una erosión dominante, que deja el horizonte petrocálcico como único testigo del perfil original, aflorando en superficie (tipos 5 y 6), o por debajo de un horizonte cálcico (tipos 7 y 8) dando lugar a los Xerochrepts Petrocálcicos (la presencia de un horizonte diagnóstico petrocálcico cuyo límite superior esté a menos de 150 cm de profundidad determina que se clasifiquen en el mismo subgrupo). La procedencia de estos tipos es consecuencia de un truncamiento más o menos intenso de los prototipos 3 y 4, (cuya principal

diferencia radica en la profundidad a la que aparece el horizonte petrocálcico).

Así mismo la evolución posterior de los horizontes cálcicos de los prototipos 7 y 8 puede acabar generando los tipos 5 y 6, puesto que un horizonte cálcico (que no ha sido destruido en el intervalo genético anterior) pasa a ser un petrocálcico por disoluciones y reprecipitaciones sucesivas. La existencia de un horizonte endurecido supone siempre un factor notable de estabilidad geomorfológica, al poder hacer frente a nuevos procesos de erosión, contribuyendo a colaborar en los fenómenos de convergencia: la geomorfología, que ha sido un factor formador del suelo, viene ahora condicionada por la existencia del horizonte petrocálcico, con lo que el efecto se ha convertido en causa.

2) Cuando domina la superposición de aportes, con una erosión previa leve, se da la complejidad máxima, generándose perfiles policíclicos. Las diferencias fundamentales en estos tipos se deben a la evolución edáfica del material más reciente: en los casos más favorables aunque menos frecuentes (prototipo 11), tienden a la formación del perfil «clímax» (Rhodoxeralf o Palexeralf petrocálcico); en los casos más frecuentes, la juventud del recubrimiento sólo permite el desarrollo de un Xerochrept típico (prototipo 10). Cuando el espesor del recubrimiento es grande, y en el nuevo material original los contenidos de carbonato cálcico son elevados, la tendencia que aparece es a la génesis de los Xerochrept calcixeróllicos (prototipo 9) cuya evolución posterior generaría petrocálcicos.

En este grupo se engloban los prototipos 9, 10 y 11. El primero procedería del recubrimiento del prototipo 2, el 10 por recubrimiento del prototipo 3 o 4, y el 11 por evolución edáfica más intensa del recubrimiento del tipo 10.

Por tanto, el fenómeno que denominamos convergencia genética se manifiesta en la existencia mayoritaria no sólo de un suborden (Xeralf: grupos Rhodoxeralf, Palexeralf; Soil Taxonomy, USDA) predominante de suelos, sino que en el nivel de clasificación del subgrupo aparecen las mismas tendencias (rhódico, petrocálcico..) y asociados a éstos aparecen los Xerochrept (calcixeróllicos, petrocálcicos). La convergencia genética se manifiesta independientemente de la edad de las terrazas y de los suelos, superponiéndose al efecto del factor tiempo.

Los fenómenos de convergencia genética en suelos desarrollados sobre terrazas fluviales en sustratos yesíferos o margo yesíferos se pueden generalizar para amplios sectores de las cuencas terciarias españolas (Cuencas del Duero, Tajo, Ebro), donde los procesos de disolución/halocinesis y de tectónica reciente afectan a la morfología de los sedimentos fluviales.

Bibliografía

Alberto Giménez, F., Gutiérrez Elorza, M., Ibáñez Marcellán, M.J., Machín Gayarre, J., Peña Monne, J.L., Pocoví Juan, A. y

- Rodríguez Vidal, J. (1984): *El Cuaternario de la depresión del Ebro en la región aragonesa. Cartografía y Síntesis de los conocimientos existentes*. Univ. de Zaragoza. Estación Experimental Aula Dei.
- Alonso, P., Rodríguez, R. y Dorronsoro, C. (1992): Relaciones entre las propiedades y edad de los suelos de las terrazas fluviales de San Pedro del Valle. *Actas del III Congreso Geológico de España*, Salamanca, tomo 2: 27-31.
- Bower, C.A., Reitemeier, R.F. y Fireman, M. (1952): Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. *Soil Ss.* 73: 251-261.
- 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. *AEQUA Monografías* 1: 33-42.
- FAO (1977): *Guía para la descripción de perfiles de suelo*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, 70 p.
- Elías Castillo, F. y Ruiz Beltrán, L. (1977): *Agroclimatología de España*. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias. Ministerio de Agricultura, Madrid, 270 p.
- Elías Castillo, F. y Ruiz Beltrán, L. (1981): *Estudio agroclimático de la región de Castilla-La Mancha*. Ed. Junta de Comunidades Castilla-La Mancha, 247 p.
- Gile, L.H., Peterson, F.F. y Grossman, R.B. (1965): The K horizon: a master soil horizon of carbonate accumulation. *Soil Sci*, 99: 74-82.
- Jenny, H. (1941): *Factors of soil formation*. Mc Graw-Hill Book Co. Inc. N. York.
- López Martínez, N. (1980): Los micromamíferos (Rodentia, Insectivora, Lagomorpha y Chiroptera) del Sitio de Ocupación Achelense de Aridos 1 (Arganda, Madrid). En: *Ocupaciones Achelenses en el Valle del Jarama* (M. Santonja, N. López Martínez, A. Pérez González, Eds.), Public. de la Excma. Diputación de Madrid. Arqueología y Paleocología 1: 161-202.
- Martín, T., Ruiz, B. y Pérez González, A. (1995): Reconstrucción paleoclimática y paleoambiental durante el Pleistoceno Medio en el Valle del río Tajo: primeros datos polínicos. En: *Reconstrucción de paleoambientes y cambios climáticos durante el Cuaternario* (T. Aleixandre y A. Pérez González, Eds), Monografías del Centro de Ciencias Medioambientales, 3: 347-361. C.S.I.C., Madrid.
- Medina, M.A. (1977): *Evolución de los suelos en el Valle del Henares*. Tesis Doctoral, Univ. Complutense, Madrid.
- Pérez González, A. (1979): El Cuaternario de la región central de la Cuenca del Duero y sus principales rasgos geomorfológicos. *Temas Geológico Mineros*, Parte II: 717-740, Serv. de Publicaciones del Ministerio de Industria y Energía.
- Pérez González, A., Gallardo, J. y Silva, P.G. (1991, en prensa): *Cartografía geológica y geomorfológica y memoria de la Hoja 16-25 Talavera de la Reina*. Mapa geológico de España. E: 1/50000 (2ª Serie). I.G.M.E.
- Rivas Martínez, S. (1987): *Mapa de Series de vegetación de España*. E: 1:400.000. Mapas 13 (Madrid), 18 (Ciudad Real). ICONA. Madrid.
- Roquero, E. (1994): *Relación suelos-geomorfología en el sector centro-meridional de la Cuenca de Madrid*. Tesis Doctoral, Universidad Complutense, Madrid, 550 p. (inédita).
- Roquero, E., Goy, J.L. y Zazo, C. (1990): Relación Geomorfología-suelos en los depósitos cuaternarios de la submeseta meridional, Sector Aranjuez-Añoover de Tajo (España). *Actas I Reunión Nacional de Geomorfología*, Teruel, Vol. 2: 721-732.
- Roquero, E., Goy, J.L. y Zazo, C. (1993): Rhodoxeralfs and related soils on Middle Tajo River Basin Pleistocene Terraces (Central Spain). *2nd International Meeting on Red Mediterranean Soils*. Adana, Turquía, Short Papers, 100.
- Roquero, E., Goy, J.L. y Zazo, C. (1997): Nuevos índices cronológicos de evolución de los suelos en terrazas fluviales. *Estudios Geol.* 53 (1-2): 3-15.
- Rus, I., Roquero, E., Mazo, A. y Enamorado, J. (1993): Terrazas del Pleistoceno Medio en la Cuenca del Tajo y fauna e industria asociada. *Abstracts 3ª Reunión del Cuaternario Ibérico*, Coimbra, Portugal, 86.
- Sanchiz, F.B. y Sanz, J.L. (1980): Los anfibios del Pleistoceno Medio de Aridos 1 (Arganda, Madrid). En: *Ocupaciones Achelenses en el Valle del Jarama* (M. Santonja, N. López Martínez, A. Pérez González, Eds), Public. de la Excma. Diputación de Madrid. Arqueología y Paleocología 1: 105-126.
- Sancho, C. y Meléndez, A. (1992): Génesis y significado ambiental de los caliches pleistocenos de la Región del Cinca. (Depresión del Ebro). *Rev. Soc. Geol. España*, 5: 81-93.
- Sanz, J.L. y Sanchiz, F.B. (1980): Nota preliminar sobre los Squamata (Reptilia) del Pleistoceno Medio de Aridos 1 (Arganda, Madrid). En: *Ocupaciones Achelenses en el Valle del Jarama* (M. Santonja, N. López Martínez, A. Pérez González, Eds.), Public. de la Excma. Diputación de Madrid. Arqueología y Paleocología 1: 127-138.
- Sesé, C. y Ruiz-Bustos, A. (1992): Nuevas faunas de micromamíferos del Pleistoceno del Norte de la Provincia de Madrid (España). *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (Sec. Geol.)*, 87 (1-4): 115-139.
- Silva, P.G. (1988): *El Cuaternario del sector centro-meridional de la Cuenca de Madrid: aspectos geomorfológicos y neotectónicos*. Tesis de Licenciatura, Univ. Complutense, Madrid, 143 p.
- Silva, P.G., Goy, J.L. y Zazo, C. (1988): Neotectónica del Sector Centro-Meridional de la Cuenca de Madrid. *Estudios Geol.*, 44: 415-417.
- Soil Survey Staff (1992): *Keys to Soil Taxonomy*, 5th edition. SMMS technical monograph No 19. Blacksburg, Virginia. Pocahontas Press, Inc. 556 pp.
- Soto Rodríguez, E. (1980): Artiodáctilos y Proboscídeos de los yacimientos de áridos de Arganda (Madrid). En: *Ocupaciones Achelenses en el Valle del Jarama* (M. Santonja, N. López Martínez, A. Pérez González, Eds.), Public. de la Excma. Diputación de Madrid. Arqueología y Paleocología 1: 207-229.
- Thornthwaite, C.W. (1948): An approach towards a rational classification of climate. *Geogr. Rev.*, 38: 55-94.
- Torrent, J. (1976): Soil development in a sequence of river terraces in Northern Spain. *Catena*, 3: 137-151.
- U.S.D.A. (1972): *Soil Survey laboratory methods and procedures of collecting soil samples*. Soil investigations Rep. No 1, Washington.

Manuscrito recibido el 31 de Julio de 1998

Aceptado el manuscrito revisado el 20 de Mayo de 1999