

LAS ACUMULACIONES TOBÁCEAS DEL PUENTE SAN PEDRO (SISTEMA IBÉRICO): MODELO EVOLUTIVO

M^a José González Amuchastegui

Universidad del País Vasco

RESUMEN

Los edificios tobáceos del Puente San Pedro en la cuenca del Tajo (Guadalajara) constituyen uno de los mejores ejemplos de este tipo de depósitos en la Península. Se plantea su análisis desde la óptica del geosistema, lo que ha permitido establecer un conjunto de conclusiones sobre el comportamiento kárstico de la zona y la definición de una evolución paleoambiental. Esta consta de tres grandes periodos de construcción tobácea, dos de ellas correspondientes al Pleistoceno y otra al Holoceno, con intercalación de fases de incisión y el desarrollo de formaciones de naturaleza netamente contrastada.

Palabras clave: acumulaciones tobáceas, geosistema, evolución paleoambiental, Cuaternario, karstificación, Sistema Ibérico, cuenca del Tajo.

ABSTRACT

Tufa build-ups of San Pedro Bridge in river Tajo basin (Guadalajara) are one of the most representative example in their genus along Iberian Peninsula. A geosystemic approach is employed in order to establish karstic behaviour and definition of a paleoenvironmental evolution. In addition, we have defined three important periods of tufa construction, two of them in Pleistocene, and the other, in Holocene. In the past, having different environments build-ups have been incised and crioclastic formations have been deposited.

Key words: tufa build-ups, geosystem, paleoenvironmental evolution, Quaternary, karstification, Iberian Range, Tajo basin.

Fecha de Recepción: 15 de octubre de 1998.

* Departamento de Geografía, Prehistoria y Arqueología. Facultad de Filología y Geografía e Historia. Universidad del País Vasco. Francisco Tomás y Valiente. s/n. 01006 VITORIA (España). E-mail: jgpgoaamm@uc.ehu.es

INTRODUCCIÓN

La zona aquí analizada se sitúa en el interior de la rama castellana del Sistema Ibérico, en la cuenca alta del río Tajo. Se asocia al drenaje del acuífero formado por la muela cretácica de Villanueva de Alcorón, y mesas neógenas de Zaorejas (Fig. 1), localizado en el área del Alto Tajo; supera los 1.400 m de altitud y está limitado al W por un eje tectónico de dirección NW-SE en el que afloran los materiales impermeables del Albiense. El acuífero está constituido por las calizas, margas y dolomías del Cretácico superior, con espesores superiores a los 400 m, que se apoyan sobre las arenas de Utrillas albienses en cuyo contacto se sitúan las principales surgencias que drenan hacia el río (Fte. del Campillo, Fte. de La Parra, Fte. de Las Tobas etc.), a cuyo pie se forman en muchos casos enormes edificios tobáceos.

Sobre la parte N de este conjunto se asienta una subunidad constituida por las calizas neógenas de Zaorejas (Fig. 1), cuya extensión es de unos 24,5 km², frente a los 442 km² de la muela de Villanueva, y un espesor próximo a los 100 m. Se apoya sobre arcillas y conglomerados en cuyo contacto es frecuente la presencia de surgencias; el conjunto a su vez reposa estratigráficamente sobre los materiales del Cretácico superior, por lo que hidráulicamente están conectados entre sí, aunque esta conexión difiere de unos parajes a otros.

Este conjunto de la muela de Villanueva de Alcorón y mesa neógena de Zaorejas, constituye la unidad kárstica más importante de esta zona de la rama castellana, con abundantes manifestaciones endokársticas y algunas de las morfologías kársticas más importantes de la región como es el poljé de Villanueva de Alcorón (GONZÁLEZ AMUCHASTEGUI, 1993).

OBJETIVO Y METODOLOGÍA

El objetivo del trabajo es analizar las acumulaciones tobáceas del Puente San Pedro, su estratigrafía y organización interna de cara a establecer un modelo evolutivo desde la óptica del geosistema (VAUDOUR, 1984) y dentro del marco morfogenético regional. Para ello se parte de un minucioso trabajo de campo, del análisis cartográfico y del estudio sedimentológico e hidroquímico de las surgencias, todo ello inscrito en un estudio de características territoriales y conceptuales más amplias (GONZÁLEZ AMUCHASTEGUI, 1993, GONZÁLEZ AMUCHASTEGUI y GONZÁLEZ MARTÍN, 1997).

LAS PRINCIPALES FORMAS KÁRSTICAS

El poljé de Villanueva de Alcorón (Fig. 1) es quizá el elemento morfológico kárstico de mayor interés del área, dada su extensión, su ubicación sobre la superficie de la paramera y su originalidad. Se encaja sobre la alta superficie de erosión (1.300 m. en esta zona) que arrasa las dolomías y calizas dolomíticas senonenses de este sector. Presenta un claro origen estructural asociado a la presencia de dos fallas que con una dirección WNW-ESE, configuran una pequeña depresión tectónica en cuyo interior se desarrolla este poljé.

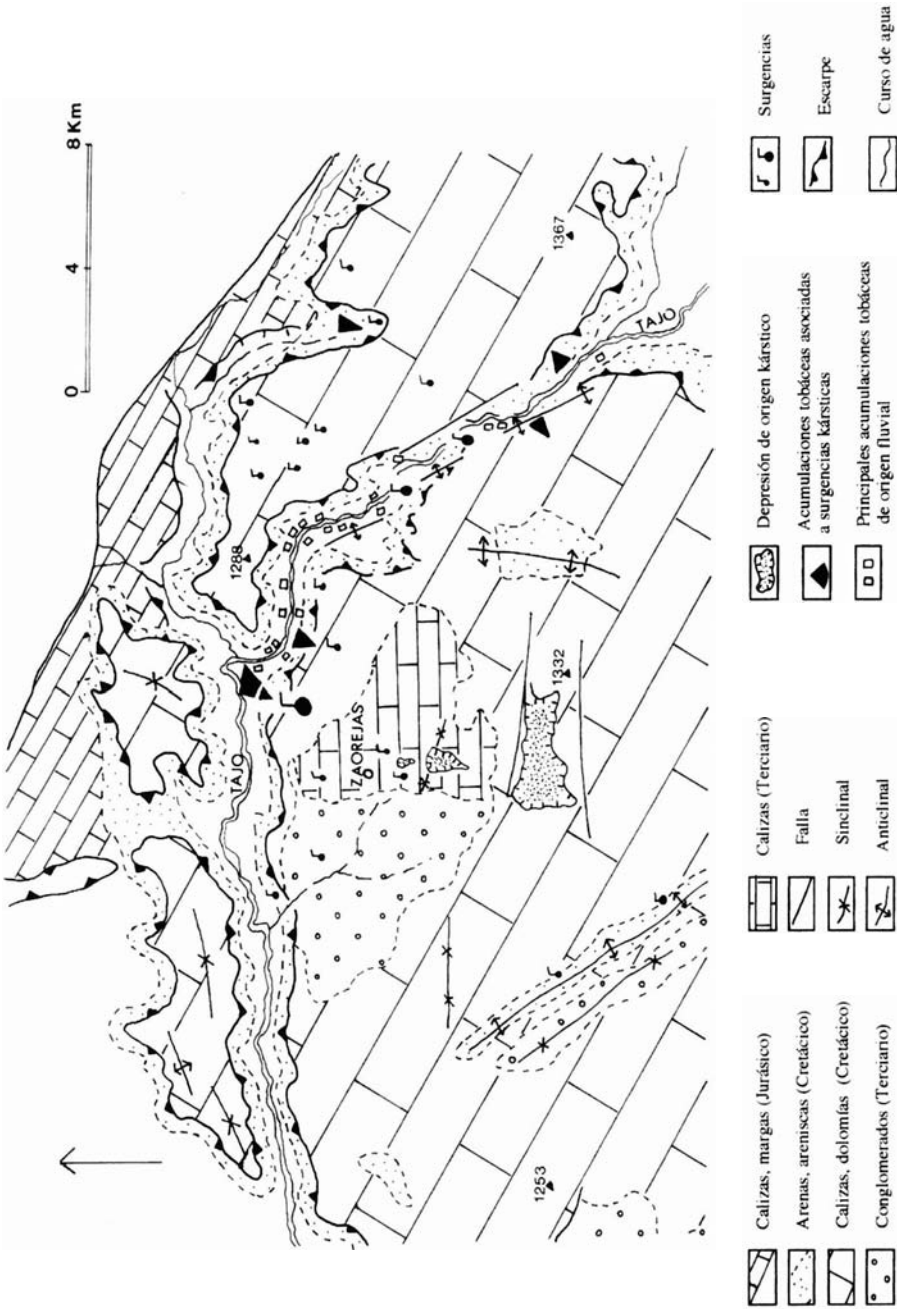


FIGURA 1. Esquema geomorfológico de la zona analizada.

Su fondo es plano y presenta una longitud máxima de 2.250 m y una anchura que oscila entre los 500 y los 1.250 m; la superficie ocupada aproximadamente es de 55 Has. Su fondo se sitúa a 1.270 m de altitud, tratándose por tanto de una depresión poco acentuada con bordes sinuosos, poco marcados en algunos puntos que se alargan dibujando un pequeño valle muy suave que prolonga la depresión hacia el este, de modo que a pesar de su clasificación como poljé en el Atlas del Karst (AYALA y otros, 1986), presenta un elevado grado de indefinición.

En relación con la génesis del poljé puede establecerse la enorme importancia que la corrosión subaluvial (GAMS, 1978) tiene en la evolución y formación de los aplanamientos del fondo del poljé: el agua al penetrar en la cubierta edáfica se carga de dióxido de carbono haciéndose más agresiva para las capas calizas subyacentes, produciendo la disolución en el contacto entre la cubierta y las calizas y el consiguiente aplanamiento de éstas que quedan cubiertas por un residuo arcilloso descalcificado. Este proceso avanza lateralmente produciendo el ensanchamiento de la depresión por retroceso de sus márgenes.

El fondo del poljé aparece recubierto por arcillas rojas (10YR 4/6) de descalcificación con una relación granulométrica de un 26% de arenas y un 74% de limos y arcillas. Por otro lado, en el análisis sedimentológico se ha detectado la presencia de oolitos ferruginosos que denuncian la existencia en el pasado de un medio reductor como consecuencia de los procesos de encharcamiento acaecidos en el poljé. En definitiva, el relleno de esta morfología no es más que el residuo insoluble que queda tras la corrosión de la caliza con una nula presencia de carbonato cálcico; su pH (5,54) también señala la existencia de un medio ácido en el que son muy abundantes los restos de materia orgánica.

En la actualidad el poljé continúa configurando una depresión cerrada sin que haya existido una captura por parte de la red fluvial aunque la cabecera del arroyo de Valdelloso se encuentra muy próxima a su margen NW, de modo que su cauce podrá llegar algún día a morder esta morfología por erosión remontante. El poljé es una forma apenas funcional (salvo los procesos de corrosión lateral aludidos) que no es inundable dada la «lejanía altimétrica» que separa su fondo con respecto a la posición de los profundos niveles de base kársticos que han emigrado correlativamente al encajamiento de la red fluvial.

Aparecen otros ejemplos de formas exokársticas desarrolladas sobre las calizas mioceanas que componen la mesa neógena de Zaorejas. Se trata de dos depresiones cerradas localizadas sobre la misma superficie de erosión antes mencionada situada en tomo a los 1.300 m de altitud; también aparecen otras depresiones de contornos imprecisos y apenas definidos. Los mejores testigos se encuentran muy próximos, a uno y otro lado de la carretera que une Zaorejas con Villanueva de Alcorón y sus pequeñas dimensiones hace que se planteen problemas a la hora de su inclusión en una u otra categoría kárstica. En ambas se advierte un claro control estructural, sus dimensiones son pequeñas (<15 has), bordes escarpados y fondo plano cubierto por arcillas rojas (7.5YR 5/8) de descalcificación (0,7% de carbonato cálcico), con un 20% de arenas y un 80% de limos y arcillas. Tiene una proporción altísima de materia orgánica y presencia, al igual que en el caso del poljé de Villanueva de Alcorón, de oolitos ferruginosos, aunque en menor cantidad que denuncian unas condiciones genéticas muy semejantes a las del ejemplo anterior. Actualmente, ambas depresiones se encuentran capturadas por el arroyo Fuente Lengua, tratándose por tanto de nuevo, de formas no funcionales.

Finalmente, hay que señalar la existencia de otras pequeñas vallonadas y depresiones apenas definidas que aparecen a lo largo de esta alta planicie sobre estas mismas calizas miocenas con una dirección preferente NNW-SSE siguiendo paralelamente orientaciones estructurales. Son pequeñísimas y amorfas hondonadas con morfología de valle en algunos puntos y sobre los que aparecen pequeños encharcamientos tras épocas de intensas lluvias, pero que rápidamente son desecadas; también aparecen pequeñas depresiones que parecen dolinas incipientes cuya coalescencia da lugar a formas parecidas a uvalas. Sus fondos, sobre todo los de los pequeños vallejos, se encuentran rellenos por arcillas rojas y constituyen junto a las depresiones antes descritas, las únicas zonas cultivadas de esta alta planicie.

Las formas endokársticas encuentran en esta muela el máximo desarrollo de toda la zona, siendo numerosísimas las simas, algunas de gran desarrollo (Manuel Mozo, Bocaquemada, Orna...) y las cuevas (Escareruela, Peñarrubia).

EL FUNCIONAMIENTO ACTUAL DEL KARST A PARTIR DEL ESTUDIO DE LAS SURGENCIAS

Con el fin de efectuar una aproximación al conocimiento del comportamiento actual del sistema kárstico, a su grado de organización y tipo de red subterránea, se han efectuado una serie de análisis de las surgencias que drenan la muela de Villanueva (GONZÁLEZ AMUCHASTEGUI M.J., GARCÍA GIMÉNEZ, R. y GONZÁLEZ MARTÍN, J.A., 1995) y más concretamente de uno de los manantiales más importantes de nuestra zona de estudio, la fuente del Campillo, a cuyo pie se sitúa uno de los mejores ejemplos de edificios tobáceos de la Península: el sistema del Puente San Pedro.

Entre septiembre de 1990 y septiembre de 1991, en el arroyo Campillo o de la Cañada, se han efectuado sistemáticamente tomas en dos puntos distintos, uno en la surgencia misma y otro en la cascada que se produce en su desembocadura en el río Tajo. Al comparar los resultados de los análisis de las muestras de ambos puntos, podemos establecer en primer lugar, la lentitud de los flujos kársticos partiendo de los valores constantes de las temperaturas—oscilaciones máximas de 3°C en el conjunto de las observaciones, entre un máximo de 14°C y un mínimo de 11°C— y de su elevada conductividad, adquirida tras un prolongado contacto con los roquedos, así como por la eficacia de los procesos de disolución. Por otro lado, llama la atención la disminución del valor de la conductividad conforme se avanza aguas abajo hacia la cascada (Cuadro I); una vez descartada la entrada de aguas procedentes de otros manantiales, este hecho se explica como la consecuencia de la precipitación de carbonatos que se produce a lo largo del cauce de este arroyo y en la enorme cascada tobácea.

La naturaleza caliza y dolomítica de los roquedos determina el carácter básico de este agua, con valores que les definen entre medianamente básicas y moderadamente básicas, aspecto importante dada su influencia en numerosos procesos químicos y biológicos, así como por controlar la solubilidad de distintos elementos.

El aumento general del valor del pH conforme las aguas circulan hacia el Tajo, obedece a la pérdida del CO₂ de las aguas debido a varias causas:

- Compensación de la pCO₂ entre el flujo de agua y la atmósfera.

- Consumo del CO₂ disuelto en el agua por la vegetación acuática.
- Posible aumento de la temperatura del agua, sobre todo en primavera, verano y otoño, lo que provoca una pérdida de CO₂.

CUADRO I

Variaciones de la conductividad y del pH de las aguas entre las inmediaciones de la surgencia hasta la cascada en su desembocadura en el Tajo.

	A° Campillo Puente		A" Campillo Cascada	
FECHA	CONDUCTIVIDAD	pH	CONDUCTIVIDAD	pH
SEPT-90	890 μmhos/cm	7,74	880 μmhos/cm	8,31
OCT-90	1.960 μmhos/cm	7,91	1.820 μmhos/cm	8,09
DIC-90	380 pmhoslcm	7,39	330 pmhoslcm	8.16
MAR-91	235 μmhos/cm	8.29	227 μmhos/cm	8,16
JUL-91	460 pmhoslcm	7.79	363 pmhoslcm	7,50
SEP-91	625 μmhos/cm	7,75	542 μmhos/cm	7,81

De nuevo la naturaleza de las litologías dominantes, determina el carácter bicarbonatado de estas aguas en su caracterización aniónica. En cuanto a los cationes, se da una mayor variabilidad en tanto que participan todos los cationes, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ y K⁺ en la composición de las muestras.

El estudio de la evolución de los valores de la conductividad a lo largo del año, con relación a las precipitaciones diarias, ha permitido establecer una serie de conclusiones sobre el comportamiento kárstico actual, de modo que, y a pesar de lo que cabría esperar dado el ámbito mediterráneo en el que nos encontramos, se produce un aumento de la conductividad y de la mineralización de las aguas tras periodos de precipitaciones intensas. Así, puede hablarse de un control por parte de las precipitaciones y más concretamente de su intensidad, al provocar un efecto «pistón» en las aguas subterráneas y la expulsión de aguas de prolongada estancia y discurrir lento por el freático, lo que determina su elevado grado de mineralización.

En definitiva, la muela de Villanueva se comporta como un acuífero carbonatado de fisuración y grado de karstificación intermedio. En efecto, este conjunto presenta un considerable desarrollo espeleológico, en el que predominan los trazados verticales, sumideros y simas, lo que motiva la existencia de un sistema de infiltración rápido en la zona no saturada, que conecta en profundidad con los niveles de saturación, donde las aguas pasan a un flujo lento que puede asimilarse más o menos al de los difusos. La razón de esta lentitud es siempre difícil de explicar y tan sólo podemos sugerir una posible reducción de la permeabilidad con la profundidad, una escasa presencia de galerías de conducción o por la obturación derivada de la existencia de materiales detríticos.

Esta idea viene sugerida por la regularidad de los manantiales de la muela, la escasísima variación en las temperaturas de sus aguas y los altos valores de la conductividad, que reflejan las características típicas de aguas que llevan un cierto tiempo de residencia.

Los hidrogramas de caudales son bastante continuos salvo ocasionalmente que presentan algunas inflexiones que se corresponden con crecidas, generalmente de cierta duración (<15 días).

LOS EDIFICIOS TOBÁCEOS DEL PUENTE SAN PEDRO

En las proximidades de la confluencia del río Gallo en el Tajo y más concretamente asociado al tramo final del arroyo de la Cañada, en cuya desembocadura misma debe salvar un desnivel próximo a los 60 m, aparece un impresionante y complejo edificio tobáceo, probablemente, uno de los de mayores dimensiones de toda la Península Ibérica. En él se constata la precipitación actual de carbonatos muy ligada a la acción de los musgos y las algas; ésta se reduce actualmente a un pequeño sector, si bien su antigua extensión queda atestiguada por la enorme plataforma que queda colgada unos 60 m. sobre el Tajo.

Se trata por tanto de un precioso ejemplo de valle colgado recorrido por el arroyo de la Cañada, que presenta un cauce permanente con caudales importantes a lo largo de todo el año y responsable de la construcción en épocas pasadas de la gran masa tobácea del Puente San Pedro. Este arroyo está alimentado hídricamente por las aguas procedentes de una amplia paramera terciaria cuyo caudal está acrecentado por las aguas procedentes de una surgencia kárstica denominada Campillo, vinculada a la mesa cretácica de Peñalén Villanueva de Alcorón y situada en el contacto entre las calizas cretácicas y las arenas del Albiense.

Este magnífico conjunto tobáceo fue objeto hace unos años de un estudio con objetivos específicos propios de la estratigrafía cuaternaria, concretamente de cronología absoluta y análisis de isótopos estables —oxígeno 18 y carbono 13 (LÓPEZ VERA y MARTÍNEZ GOYTRE, 1989). En este trabajo se señalaron diversos replanos travertínicos cuya naturaleza escalonada llevó a los autores a establecer una asociación con las terrazas fluviales, considerando la superficie más alta la más antigua (nivel 1) colgada a +130 m. sobre el cauce del río Tajo; el resto de los niveles se sitúa a las siguientes alturas sobre el talweg: nivel 2: +90 m., nivel 3: +50 m. (todos estos niveles, incluyendo el más antiguo están intensamente karstificados). Finalmente, se reconoció un nivel más bajo (nivel 4) situado a tan sólo +3-10 m. Las muestras se tomaron ubicando altimétricamente su cota absoluta y su pertenencia a cada uno de los niveles arriba considerados.

Por nuestra parte, coincidimos con el estudio precedente sólo en el hecho topográfico de advertir cuatro niveles (Fig. 2) conformando un dispositivo no de terrazas, sino de una morfología mucho más compleja; en efecto, este conjunto adopta una organización en gradería compuesta por varios cuerpos tobáceos de techo extraordinariamente tendido y separados por taludes en los que siempre aparecen estructuras de antiguas cascadas de agua estabilizadas (Fig. 2). Cada uno de estos cuerpos presenta capas carbonatadas compuestas preferentemente por facies de musgo, inclinadas o verticalizadas que se vinculaban a preteritas cascadas por la que caían las caudalosas aguas que surgían por el manantial del arroyo Campillo. Estas cascadas se fosilizan unas a otras, registrándose una progresiva progradación lateral hacia el cauce del Tajo que a veces fue superior a 600 m.

El crecimiento y fosilización de las cascadas no fue continuo como lo demuestra la abundante presencia de cicatrices erosivas que se aprecian en la masa tobácea y que con

mucha inclinación cortan capas de antiguos musgos; a la vista del funcionamiento de los saltos actuales, estas cicatrices pueden haberse generado por varias causas:

— Paralización de los flujos de agua que desbordaban las cascadas o concentración de los mismos motivados por una disminución de los caudales en la surgencia kárstica.

— Normal emigración lateral de los flujos de agua (a veces causada por hundimientos, etc.) que alimentaba las zonas activas de la cascada, que quedarían así en situación de escasa actividad y precipitación de carbonatos.

— Flujos de agua muy caudalosos surgentes por el manantial que favorecidos por las fuertes pendientes longitudinales actuaron con gran energía y turbulencia, erosionando las estructuras carbonáticas previas de las cascadas.

— Agentes meteóricos y especialmente los procesos de hielo-deshielo.

El encajamiento de los distintos escalones puede ser el resultado de dos tipos de comportamientos. Cuando los dos niveles tobáceos separados por un desnivel pertenecen a la misma edad, no cabe duda que se trata de un escalonamiento natural producido por la karstificación del nivel más elevado que permite generar a las aguas a su pie, otro **replano** adventicio (ORDÓÑEZ, GONZÁLEZ y GARCÍA DEL CURA, 1987). Esta no es la causa que debemos aplicar al Puente San Pedro ya que, en la mayoría de los casos, los niveles tobáceos ofrecen diferente edad a uno y otro lado del escalón, y presentan otra complicación añadida: no suele ser visible el sustrato geológico, ni el muro de las formaciones tobáceas.

A pesar de estas dificultades, pensamos que esta morfología en gradería ha estado especialmente controlada por el encajamiento del cauce del Tajo y en las consecuencias y repercusiones que este hecho geomorfológico han tenido en los niveles de base kársticos, con aguas que alumbraban con el paso del tiempo, a cotas cada vez más bajas y que por ello dejaban desarticulados y sin funcionalidad a los edificios tobáceos más altos y antiguos.

En el Puente San Pedro distinguimos las siguientes generaciones (Fig. 2 y 3):

Campillo I

Constituye la generación tobácea más antigua a la vista de sus características morfológicas y de la interpretación de sus facies y estratigrafía. Presenta una topografía culminante poco plana y muy irregular debido a la gran cantidad de microformas originadas por la karstificación posterior que ha sufrido este edificio; también hay que destacar la presencia de mogotes a modo de pequeños relieves residuales que destacan en su techo, producto en unos casos de la erosión diferencial y en otros, como consecuencia de fenómenos de colapso que han afectado a la masa tobácea de zonas adyacentes. Esta formación carbonática —**Campillo I**— correspondería al nivel I de LÓPEZ VERA y MARTÍNEZ GOYTRE y cuya edad ha sido datada entre 110.000 y 140.000 años, pudiendo llegar su máximo cronológico a 200.000 años (LÓPEZ VERA et al., 1989).

Esta generación se apoya sobre una base detrítica compuesta por grandes bloques en unos casos, y en otros sobre un canal incidido en los materiales del Albiense. Este canal está constituido por una serie de bloques y gravas empastados en una matriz arenosa. El material es esencialmente calizo (89%) y bastante redondeado, aunque también aparecen

algunos cantos de cuarcita (7%), cuarzo (1%) y areniscas (3% mucho más aristadas). Este depósito presenta una gran heterometría ($Md = 5,4$ cm y centilo 42 cm en caliza) y una estructura muy caótica, con bloques y cantos sin organización, todo ello empastado en una matriz fina arenosa que cementa el depósito. En definitiva, éste parece responder a una dinámica de fuerte energía de tipo torrencial con abandono brusco de la carga (debris flow) previo a la formación de la toba.

La masa tobácea tiene espesores a veces superiores a los 20 m y sus estructuras presentan una sucesiva progradación de cascadas cubiertas por capas de musgos muy petrificadas y consolidadas. Esta progradación alcanzó un desarrollo lateral de por lo menos 600 m; son muy numerosas las discordancias erosivas y los vestigios de una karstificación coetánea a la construcción de la masa carbonática: conductos internos hundidos y bloques tobáceos caídos, fosilizados por posteriores precipitaciones de carbonatos. Asimismo, la orientación de sus relictos saltos de agua y la fosilización de sus estructuras tobáceas revelan una compleja evolución dentro de la prolongada etapa de edificación de esta unidad tobácea.

Campillo II (Fig. 2 y 3)

Presenta grandes afinidades con el anterior ya que esta constituido también por grandes estructuras de cascada, en general muy verticalizadas. Éstas fosilizan en primer lugar una gran discordancia erosiva labrada sobre las masas tobáceas de la generación anterior que coincide con el pequeño **escarpe** que separa las superficies del Campillo I y II. Luego, las facies de cascada fueron fosilizándose unas a otras llegando a una progradación lateral de unos 500-540 m hacia el valle del Tajo. La morfología de su techo es nítidamente horizontal y no presenta las irregularidades detectadas en el conjunto más antiguo. Su espesor se sitúa en torno a 12 m.

Este conjunto, Campillo II, se corresponde con el nivel 2 y se le asignó una edad próxima a los 80.000-99.000 años (LÓPEZ VERA et al., 1989).

Campillo III (Fig. 2 y 3)

Su morfología culminante representa el último **replano** tobáceo de importancia, asociado a la surgencia del Campillo. Su constitución interior (estructuras tobáceas, niveles detríticos y aluviones gruesos, conductos kársticos y espeleotemas) es visible en muchos puntos gracias a los taludes construidos para el trazado de la carretera de Molina de Aragón a Zaorejas y para la pista forestal que recorre el Alto Valle del Tajo. Este edificio se vincularía al nivel 3 que isotópicamente ha dado una edad inferior a los 10.000 años (LÓPEZ VERA et al., 1989).

En cuanto a las estructuras tobáceas, nuevamente se resuelven a partir de facies de musgos asociadas a antiguas cascadas que vuelven a progradar, aunque con menor desarrollo lateral (200-250 m) hacia el valle del Tajo, donde quedan colgadas sobre su cauce. Se detectan numerosas cicatrices erosivas en el seno de estas capas de musgo; a veces están acompañadas por recubrimientos de calcita **parietal**, formas estalagmíticas, etc., que luego son fosilizadas por una acreción lateral asociada a nuevos saltos de agua (Fig. 3:

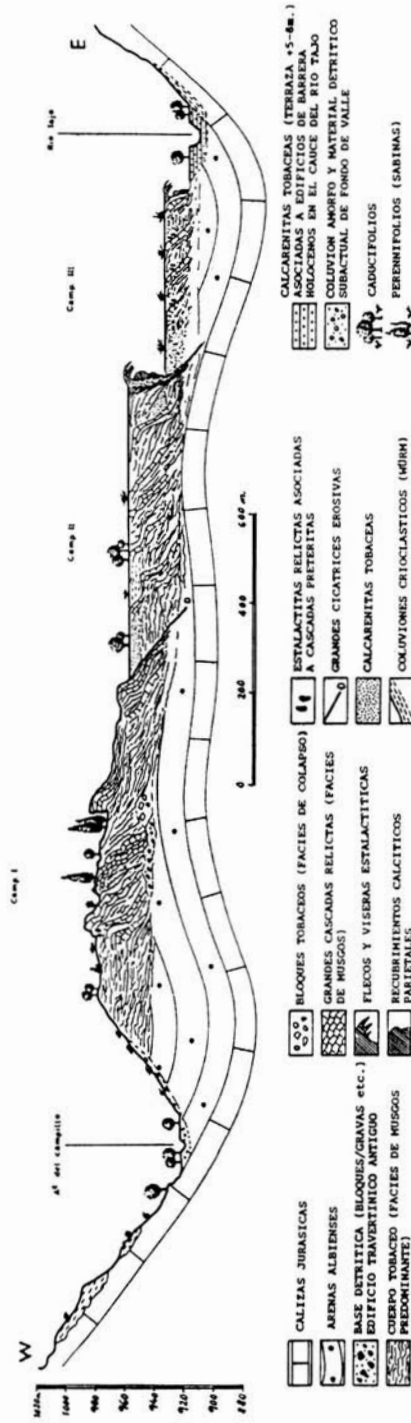


FIGURA 2. Posición geométrica y estructuras sedimentarias de los edificios travertínicos del PUENTE SAN PEDRO (Alto Tajo)

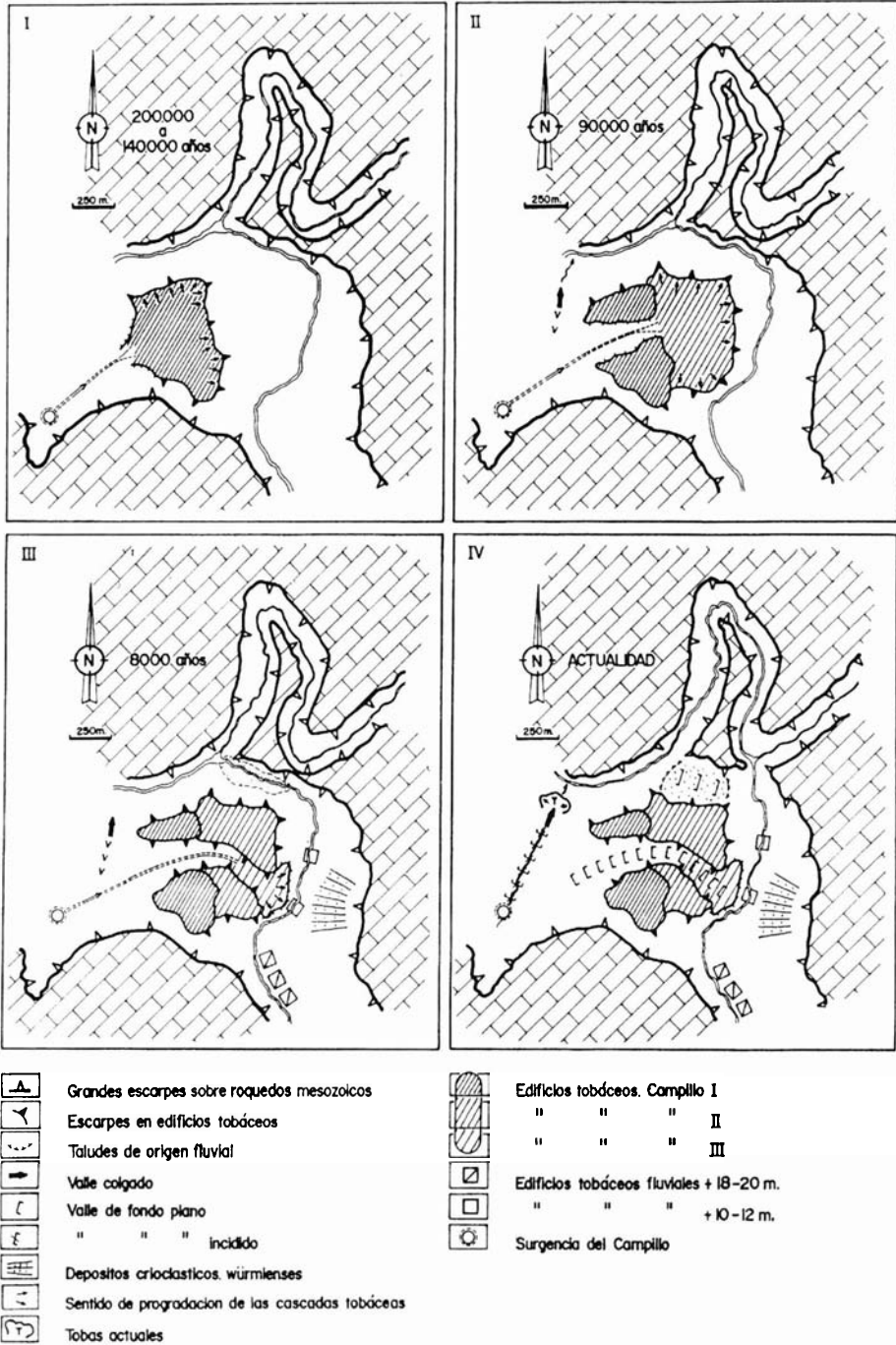


FIGURA 3. Evolución geomorfológica del Puente San Pedro.

«Campillo III»). Estas cicatrices tienen un claro significado de paralización de los mecanismos de construcción tobácea, motivado por una migración de las aguas hacia otras direcciones, fenómeno bastante frecuente en formaciones de este tipo, dada la magnitud de sus frentes, o por un descenso de los caudales.

En la última cascada, la más moderna, pueden observarse numerosos testimonios de sus etapas regresivas más recientes, dada la presencia de numerosos penachos y flecos estalagmíticos junto con otras facies calcíticas de tipo mamelonar.

En la actualidad el conjunto tobáceo del Puente San Pedro ha quedado totalmente desconectado ya que el arroyo de la Cañada desemboca al Oeste del edificio (Fig. 3, IV), mediante la cascada tobácea ya descrita. Este hecho tal vez haya sido motivado por un descenso general en los caudales, que conllevaría a su vez la incisión del edificio tobáceo ubicado en el fondo del valle del río Tajo perteneciente por tanto a otra tipología de acumulaciones, y provocaría la modificación del curso del río Tajo que abandona su antiguo cauce para ser «capturado» por el río Gallo y dibujar el meandro que aquel río describe en este área (Fig. 3). De este modo se explicaría también la existencia de la acumulación tobácea existente en el sector abandonado por el río Tajo, y del replano que incide longitudinalmente la formación del Puente de San Pedro.

En muchos casos el porcentaje superior de los elementos finos se corresponde en las acumulaciones tobáceas con los pequeños **recuencos** que quedan en la parte superior e inmediatamente posterior de las cascadas, donde la energía hidrodinámica es alta pero sin alcanzar los valores de la cascada misma, donde la sedimentación y precipitación de carbonatos reviste otras modalidades.

MODELO EVOLUTIVO

En la Figura 3 se establece la evolución **geomorfológica** de este paraje a lo largo del Cuaternario. Comienza ésta con la construcción de un enorme edificio tobáceo, Campillo I, a partir de la precipitación de los carbonatos que marchan disueltos en las aguas procedentes de una surgencia. Esta formación corresponde al Pleistoceno medio, pudiendo haber abarcado su construcción un período bastante largo, dadas sus dimensiones; así, en el Cuadro II se establece un período que puede variar entre 12.000 y 24.000 años, considerando tasas de crecimiento próximas a las registradas en la actualidad, en zonas no muy alejadas y sin tener en cuenta las etapas erosivas detectadas en su estratigrafía que han podido interferir el crecimiento tobáceo, bien mediante la destrucción parcial del edificio, o por la paralización de los procesos de precipitación, ni tampoco las fases de «dinámica estable», esto es, en las que las tasas de precipitación y erosión son equiparables; de tal modo que el período de construcción de esta acumulación ha podido ser más prolongado y en este sentido podrían apuntar los resultados de las distintas dataciones efectuadas en este edificio (LÓPEZ VERA y MARTÍNEZ GOYTRE, 1989).

Esta etapa se correspondería con una fase de fuerte fitoestabilización, con precipitaciones abundantes y caudales muy regulares.

En este momento, como puede verse en la Figura 3, la desembocadura del río Gallo en el Tajo, se efectuaba aguas abajo del pronunciado meandro que aparece en esta zona.

Tras un cambio en las condiciones ambientales que provoca la desarticulación e incisión de Campillo I, comienza de nuevo una etapa en la que se dan las condiciones necesarias para la construcción de un nuevo edificio tobáceo, Campillo II (Fig. 3, II); éste, al igual que el anterior, presenta numerosos frentes progradantes en distintas direcciones, alcanzando dimensiones espectaculares (vol: 12,85 mill. de m³), aunque inferiores a las de Campillo I.

Su edad, 80.000-99.000 años, se sitúa en el Pleistoceno reciente, y más concretamente en el interglaciar Riss-Würm; mientras, en la zona del Puente San Pedro, se está produciendo el estrangulamiento del *interfluvio*, preludio del cambio en el trazado que va a sufrir posteriormente la confluencia del Tajo y del Gallo.

Tras esta fase, comienza la incisión de Campillo II como consecuencia de un cambio intenso en las condiciones ambientales y el inicio de una crisis climática würmiense (aumento de la sequedad y descenso de las temperaturas) que provoca la destrucción de las cubiertas vegetales y la acumulación de los depósitos de *groizes* y *grèzes litèes* al pie de las laderas.

Con posterioridad, una vuelta a los ambientes propicios para la sedimentación tobácea (Fig. 3,111) ya en tiempos holocenos, provoca la construcción del edificio Campillo III de dimensiones más modestas (Cuadro II), contemporáneo de los edificios tobáceos de barrera y retención +8-12 m. del Alto Tajo (GLEZ AMUCHASTEGUI y GLEZ MARTÍN, 1997). En este momento, las aguas procedentes de la surgencia del Campillo se bifurcan en dos corrientes, desembocando una a través de Campillo III y otra a partir de una cascada tobácea que salva un desnivel importante, esta división ya había comenzado a perfilarse en la fase anterior.

Finalmente, en la actualidad (Fig. 3, IV) se produce la incisión del Tajo de los edificios tobáceos +8-12 m. y el abandono de la acumulación Campillo III por parte de las aguas que circulan exclusivamente por el valle que desemboca en el Tajo a través de la cascada tobácea antes descrita y en la que se registra actualmente la precipitación de carbonatos, como ya se expuso en otro apartado.

Mientras, se ha producido la «captura» del Tajo por el Gallo, abandonando aquel el sector de su valle que queda en la parte interna del meandro, donde queda como testimonio de su antigua circulación una importante acumulación calcarenítica.

En la actualidad la precipitación de carbonatos es un proceso activo constatado en la cascada que sirve de desembocadura al arroyo de la Cañada, aunque con una intensidad muy inferior a la registrada en los momentos de construcción de los edificios Campillo I, II y III, y en una dinámica que podríamos definir como «estable», en el sentido en el que se superponen momentos de construcción y destrucción de la acumulación tobácea.

CONSIDERACIONES FINALES

Los edificios tobáceos del Puente San Pedro constituyen uno de los mejores ejemplos de la Península. Se ha enfocado su análisis desde la óptica del geosistema, inserto por tanto en una dinámica kárstica de mayor amplitud, en la que el análisis morfológico del karst y el estudio hidroquímico de las aguas ha permitido establecer una serie de conclusiones sobre el comportamiento kárstico de la zona. La génesis de las acumulaciones del Puente

San Pedro se vincula a las aguas de un antiguo arroyo, formado a partir de las aportaciones de las surgencias que drenaban el acuífero de Villanueva de Alcorón.

Se han definido tres grandes generaciones travertínicas correspondientes al Pleistoceno (Campillo I y II) y otra holocena (Campillo III); éstas son asimilables a episodios de construcción tobácea detectadas en sectores próximos del Sistema Ibérico. En la actualidad, el conjunto se encuentra totalmente desconectado, desembocando el arroyo de la Cañada al oeste del conjunto, a través de una gran cascada tobácea en la que se constata la precipitación actual de carbonatos.

El significado climático de las distintas acumulaciones ha permitido establecer una evolución paleoambiental en la que se suceden etapas de construcción tobácea de claro carácter biostásico y otras de incisión en las que las condiciones ambientales sufrieron una clara degradación y el desarrollo de formaciones de naturaleza netamente contrastada.

BIBLIOGRAFÍA

- AYALA, F.J., RODRÍGUEZ, J.M., DURÁN, J.J., DEL VAL, J. y RUBIO, J. (1986): Memoria del mapa del karst de España. I.G.M.E., Madrid, 68 págs.
- GAMS, I. (1978): The polje: the problem of definition. *Z. Geomorph. N.F.*, 22, pp. 170-181.
- GONZÁLEZ AMUCHASTEGUI, M.J. (1993): *Geomorfología del «Alto Tajo» en el sector de Molina de Aragón*. Tesis Doctoral, inédita, U. Autónoma de Madrid, 732 págs.
- GONZÁLEZ AMUCHASTEGUI M.J., GARCÍA GIMÉNEZ, R. y GONZÁLEZ MARTÍN, J.A. (1995): Naturaleza hidrogeográfica de los conjuntos kársticos en la zona de Molina de Aragón y Alto Tajo a partir del estudio de sus surgencias. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 14, pp. 209-224.
- GONZÁLEZ AMUCHASTEGUI, M.J. y GONZÁLEZ MARTÍN, J.A. (1997): Formaciones tobáceas y modelo de evolución fluvial en El Alto Tajo. *Medios carbonatados continentales*. Sevilla.
- GONZÁLEZ MARTÍN, J.A., ORDÓÑEZ, S. y GARCÍA DEL CURA, M^a A. (1987): Evolución geomorfológica de las Lagunas de Ruidera (Albacete-Ciudad Real): *Est. Geológicas*, 43, pp. 227-239.
- LÓPEZ VERA, F. Y MARTÍNEZ GOYTRE, J. (1989) Formación travertínica de Puente San Pedro (Guadalajara). Edad, ambiente de formación y evolución. *Bol. Geol. y Min.*, vol. 100-2, pp. 248-258.
- ORDÓÑEZ, S., GARCÍA DEL CURA, M.A., GONZÁLEZ AMUCHASTEGUI, M.J. y GONZÁLEZ MARTÍN, J.A. (1992): Génesis actual de carbonatos fluviales en el alto valle del río Tajo (prov. de Guadalajara) *III Congreso Geológico de España*. Tomo I, pp. 158-163. Salamanca 1992.
- VAUDOUR, J. (1984): Les travertins de piémont: contribution à l'étude des géosystèmes karstiques méditerranéens. *Montagnes et Piémonts* R.G.P.S.O., pp. 349-362.

CUADRO II
Dimensiones y posibles tasas de crecimiento de las diferentes generaciones tobáceas del Puente San Pedro.

DIMENSIONES Y POSIBLES TASAS DE CRECIMIENTO DE LAS DIFERENTES GENERACIONES TOBÁCEAS DEL PUENTE SAN PEDRO									
Generación Tobacea	Cota máx. (m.)	Cota mín. (m.)	Espesor Medio (m.)	Progradación longitudinal (m.)	Anchura media (m.)	Volumen mill m ³	Duración fases constructivas, precipitación sin tener en cuenta las etapas erosivas		
CAMPILLO I Edad: 200.000 140.000 110.000	985	940	32	600	800	15,36	5 cm./año = 1m: 1 año Progradación longitudinal 12.000 años	2,5 cm./año = 1 m: 40 años Progradación longitudinal 24.000 años	
CAMPILLO II Edad: 99.000 80.000	960	925	28	540	850	12,85	10.800 años	21.600 años	
CAMPILLO III Edad: <10.000	930	905	20	250	200	1	5.000 años	10.000 años	