

Ecosecuencias de los paisajes tobáceos holocenos en el dominio mediterráneo

Eco-sequences of Holocene tufa landscapes in the Mediterranean region

*C. Fidalgo Hijano*¹, *J.A. González Martín*¹, *M.J. González-Amuchastegui*², *R. García Giménez*³

(1) Departamento Geografía, Universidad Autónoma de Madrid. España.

(2) Departamento Geografía, Prehistoria y Arqueología, Universidad del País Vasco. España

(3) Departamento Geología y Geoquímica, Universidad Autónoma de Madrid. España

Autor de correspondencia:

C. Fidalgo Hijano Departamento de Geografía, Universidad Autónoma de Madrid. España.

concepcion.fidalgo@uam.es

RESUMEN

Las áreas kársticas con formaciones tobáceas ofrecen paisajes específicos, frágiles y singulares en numerosas regiones del planeta, pero es en el dominio mediterráneo donde adquieren su mayor complejidad y belleza. Su génesis exige un conjunto de condiciones ambientales capaces de construir en un corto espacio de tiempo, paisajes fluctuantes en los fondos de valle.

Además, las tobas constituyen verdaderos archivos paleoambientales indicadores de los cambios climáticos cuaternarios. La mayor parte de los actuales paisajes tobáceos de las latitudes medias se originaron en el Holoceno en una ecosecuencia positiva bajo ambientes forestales y condiciones templadas y húmedas. Sin embargo, los cambios ambientales y los impactos antropogénicos motivaron que muchos de aquellos paisajes iniciasen desde la Edad del Bronce, una dinámica erosiva perdiendo su funcionalidad y con ello, su degradación y desaparición. Este trabajo enfatiza la estrecha relación que el clima y las cubiertas vegetales juegan en las ecosecuencias de estos paisajes.

Palabras clave: Paisajes tobáceos, vegetación, modelo evolutivo, Holoceno, Condiciones geoambientales

ABSTRACT

Karstic areas characterized by the presence of tufa deposits offer specific landscapes with high fragility and great singularity in many regions of the planet, but it is in the Mediterranean domain where they acquire greater complexity and beauty. Their genesis requires a set of environmental factors that allow the development of very fast growing carbonate accumulations able to build in short periods of time fluctuating landscapes in the valley bottoms. In addition, tufa sediments have great value because they are true archives of palaeoenvironmental data used as proxy of Quaternary climatic changes. Most of the tufa landscapes located in the mid-latitudes originated in the Holocene times and their progress took place in a positive sequence under forest environments favored by mild temperatures and humid climatic conditions. However, in the recent millennia, environmental changes related to an increased dryness and to anthropogenic impacts were the cause for many of those landscapes to start a process during the Bronze Age of an erosive eco-sequence that led many of them to lose their functionality and thereby degradation and finally disappearance. This article emphasizes the close relationship climate and vegetal covers play in the eco-sequences of these landscapes.

Key Words: Tufa landscape, vegetation, evolutionary pattern, Holocene, geoenvironmental conditions.

Las tobas, también denominadas travertinos por muchos investigadores (Capezzuoli et al., 2014), son formaciones originadas por la precipitación desencadenada por las aguas meteóricas en ámbitos de ladera o en los fondos de valle bajo dinámicas de manantial, fluvial, palustre y lacustre. Aunque existen diferentes variedades, o facies, están compuestas, sobre todo, por carbonatos (>80%) poco compactos con una estructura porosa que controla, por lo general, su baja densidad ($1,1 \text{ g/cm}^3$) y en la que se incrustan abundantes restos vegetales. Estas formaciones, actuales y pretéritas, se localizan en las regiones kársticas de nuestro planeta caracterizadas por la existencia de roquedos calizos y/o dolomíticos, ambientes climáticos muy variados y siempre presididos por la presencia de cubiertas vegetales.

Desde hace tiempo, los depósitos de toba han sido estudiados desde distintas perspectivas científicas. Su interés reside en el hecho de que estas acumulaciones han sido consideradas como privilegiadas (Vaudour, 1986 y 1988) para la comprensión del medio natural y el conocimiento de la evolución paleoclimática y paleoambiental de los territorios donde se insertan. Ello es posible al ofrecer sus carbonatos abundantes restos biológicos fósiles, especialmente de naturaleza vegetal (Roinron, 1997; Brasier, 2011) y cuya identificación (musgos, tallos, velos algáceos – estromatolitos-, etc.) ha constituido uno de los métodos tradicionales a la hora de clasificar las diferentes facies tobáceas (Pentecost, 2005). Así, la preservación de estas improntas en el registro estratigráfico de las tobas fósiles (Figura N° 1) permite recrear las antiguas condiciones bioclimáticas en que se sedimentaron y las modificaciones del entorno a lo largo del tiempo. Además, sus carbonatos son susceptibles de la aplicación de isótopos ambientales ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$) a la vez que pueden ser datados por procedimientos de cronología absoluta, como U/Th (Uranio-Torio), Carbono-14 (^{14}C), ESR (Electron Spin Resonance) y Termoluminiscencia (Viles and Goudie, 1990).

Figura N° 1

Izquierda: Carbonatos laminados radioconcéntricos, con espesor milimétrico, alrededor de un antiguo tallo, incluidos en la estructura de una barrera tobácea pleistocena en el Valle del Júcar, aguas arriba de Alcalá de Júcar (Albacete). Derecha: dos improntas foliares de especies caducifolias localizadas entre los carbonatos fluviales tobáceos en un afluente del Alto Tajo (Guadalajara). Fotografías de los autores



Las tobas alcanzan un gran protagonismo tanto en la fisiografía como en la dinámica de numerosas áreas kársticas, introduciendo un conjunto de peculiaridades geográficas que permiten hablar con propiedad de “paisajes de los sistemas tobáceos” o de “paisajes tobáceos (González Martín y Rubio, 2000; González Martín et al., 2014, Zang et al., 2012; Quiao et al., 2016). Así, no es posible establecer un modelo de paisaje ligado al ámbito tobáceo sino una secuencia de paisajes fruto de la evolución y del cambio de las condiciones ambientales.

El objetivo de este trabajo se centra en destacar la singularidad de los paisajes tobáceos y establecer una propuesta de modelo evolutivo de los mismos centrándonos en diversos ejemplos del mundo mediterráneo sobre los que los han desarrollado numerosas investigaciones (González Martín et al., 2014).

La singularidad de los paisajes tobáceos

La especificidad de las condiciones necesarias para la génesis de las formaciones tobáceas, más aún cuando éstas presentan una magnitud importante, exige la existencia de procesos y ambientes en los que las condiciones geomorfológicas, hidrológicas y bióticas desempeñan un papel primordial y en los que se desarrollan paisajes específicos y singulares en los que estas acumulaciones de toba tienen un gran protagonismo. Dentro de esta singularidad, destacan:

1.- La específica arquitectura geomorfológica que los carbonatos tobáceos confieren a los paisajes de su entorno al adquirir vistosas (Figura N° 2), y a veces, fascinantes morfologías. Entre ellas sobresalen:

- Los grandes edificios en gradería desarrollados en numerosas laderas y donde cada uno de sus peldaños se encuentra delimitado por grandes cascadas funcionales (Figura N° 2) o fósiles. Magníficos ejemplos de esta variedad tobácea se localizan en el entorno de la ciudad turca de Antalya construida sobre sus carbonatos, o el gran escalón adosado a la Serra Azul (SW Mato Grosso, Brasil) que, con sus 30 km de longitud y más de 100 m de altura, posiblemente sea el más extenso sistema tobáceo fósil del continente sudamericano (Correa et al., 2011).

- Los enormes fitohermos son construcciones tobáceas de tipología y tamaño variable, caracterizadas por su notable porosidad que es debida a la inserción de múltiples elementos vegetales- hidrofitos y macrofitos semiacuáticos- colonizados por microfilms cianobacterianos así como por hongos, diatomeas, etc y cementados por tapices calcíticos (González Martín & González Amuchastegui, 2014) que conforman paisajes tobáceos específicos, edificados en los cauces a modo de represas naturales que obstaculizan el paso de las aguas. Su

existencia es frecuente en las áreas kársticas donde muchas de sus lagunas quedan retenidas por sus estructuras carbonáticas. Buen ejemplo lo conforma los lagos del Parque Nacional de Plitvice (Figura Nº 2), con barreras tobáceas de más de 40 m de altura (Roglic, 1977) y varias centenas en la longitud de su coronación.

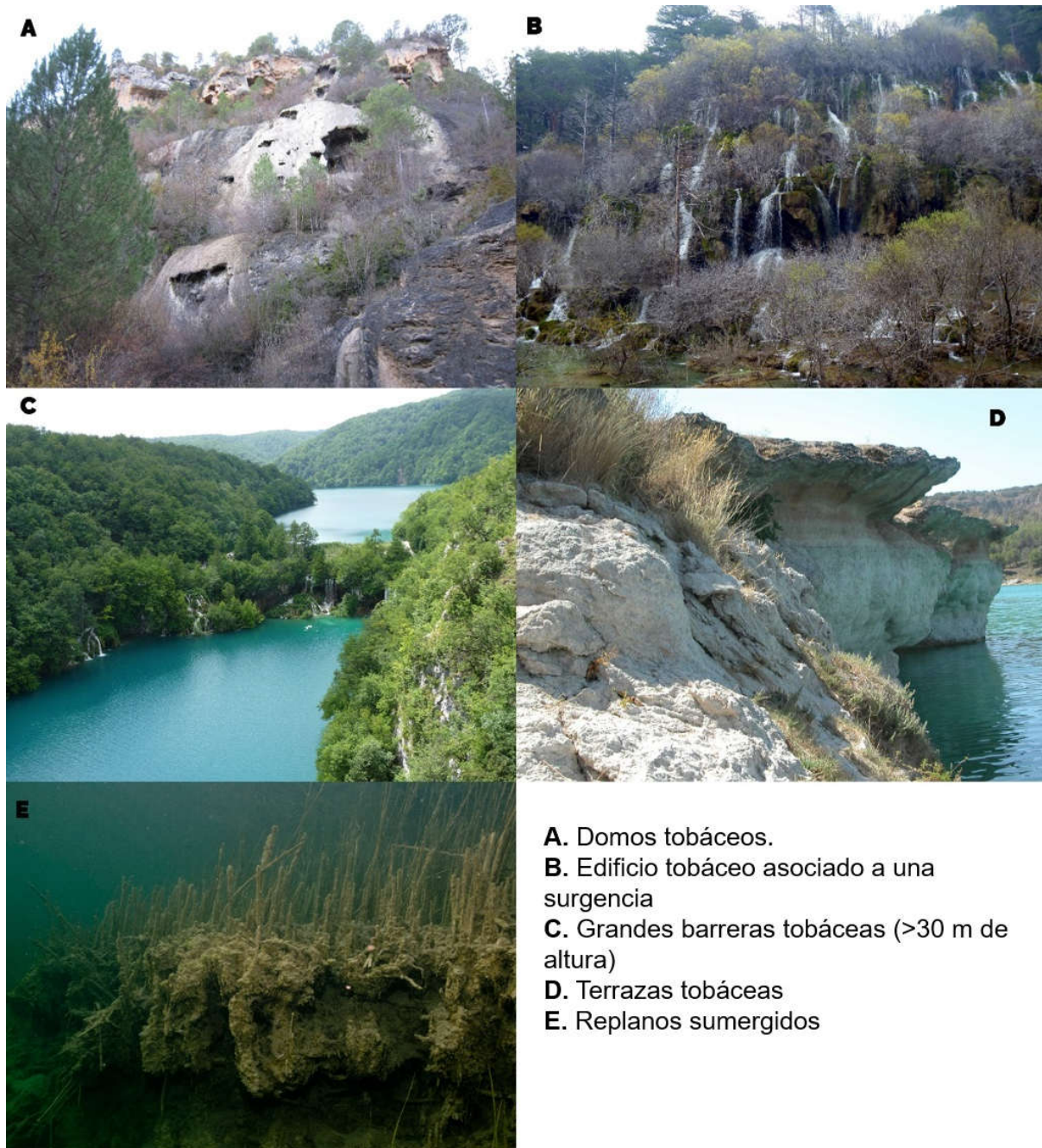
- De menor entidad morfológica, pero muy espectaculares, son los replanos estromatolíticos (Figura Nº 2) que orlan determinados lagos y que podrían asociarse, de modo divulgativo, a “*dispositivos coralinos*”, emergidos por diversas causas y desarrollados en aguas dulces. Éstos se forman bajo lámina de agua y, también, resaltan en el paisaje subacuático actual de ciertas lagunas debido a su plana topografía siempre adosada a las paredes de los vasos y con techos sumergidos a 1-3 m de profundidad (Figura Nº 2).

- Tampoco faltan extrañas morfologías, cavidades y abrigos que refuerzan su enorme valor patrimonial al coincidir con importantes yacimientos

arqueológicos. Entre ellos destacan el Abric Romani, y otros del entorno de Capellades (Barcelona), célebres por haber sido lugares de ocupación neandertal en el Paleolítico medio.

Figura Nº 2.

A. Domos tobáceos sobre una cascada de funcionamiento efímero en el tramo final de un pequeño tributario del Alto Tajo (La Escarehuela.- Zaorejas.- Guadalajara). **B.** Edificio tobáceo asociado a una surgencia en la cabecera del río Cuervo, aguas arriba de Santa María del Val (Cuenca). **C.** Grandes barreras tobáceas (>30 m de altura) han generado lagos y ambientes lacustres en el paisaje del fondo de valle del río Korana (Parque Nacional de Plitvice.- Croacia). **D.** Terrazas tobáceas en la Laguna de la Lengua (Parque Natural de Las Lagunas de Ruidera). Fueron generadas por la actividad algácea desarrollada en aguas lacustres poco profundas y hoy están emergidas por seculares impactos antrópicos. (Fotografías de los autores). **E.** Replanos sumergidos en una margen de la Laguna Conceja (Parque Natural de Las Lagunas de Ruidera). Su plana morfología cimera constituye un lugar preferencial para la sedimentación de carbonatos lacustres debida a la actividad algácea. Fuente: Gemosclera



A. Domos tobáceos.
B. Edificio tobáceo asociado a una surgencia
C. Grandes barreras tobáceas (>30 m de altura)
D. Terrazas tobáceas
E. Replanos sumergidos

2.- El carácter reciente de los paisajes tobáceos y la rapidez con la que discurren sus fases evolutivas en respuesta a los cambios ambientales, constituyen otra de sus señas de identidad. Los entornos que han llegado hasta nuestros días iniciaron su evolución en el Cuaternario y, más concretamente en sus últimas etapas; la mayoría de los paisajes tobáceos actuales despusó su ciclo en el Holoceno hace menos de 10000 años. Además, su progreso fue espectacular debido a la inusitada celeridad con la que actúa la sedimentación de estas formaciones (Magnin et al., 1991), cuyas tasas anuales son de las más altas que puede reconocerse en la superficie del planeta. Se han apreciado valores de hasta 7-8 mm/año en ciertos valles mediterráneos, caso del paraje del Monasterio de Piedra (Vázquez-Urbez et al., 2004 y 2010) y, en otros se han citado (Weijemars et al., 1986) crecimientos mucho más elevados (>140 mm/año). Otras estimaciones, evaluadas en la relación peso/superficie/año, han considerado sedimentaciones comprendidas entre 0.13 y 0.86 g/m²/año (Vázquez-Urbez et al., 2004 y 2010). Tan rápida acumulación origina que, en el corto intervalo de unos escasos miles de años, un determinado sistema fluvial pueda ser sustituido, en el mismo tramo de valle, por otro fluvio-lacustre a la vista del presuroso crecimiento de las barreras tobáceas. Idéntica celeridad se produce con ocasión de las fases de erosión y destrucción en estas acumulaciones. La escasa consistencia y la macroporosidad, derivada del aspecto oqueroso ofrecido por buena parte de las variedades tobáceas, suscita una enorme fragilidad y baja capacidad de preservación en los paisajes. Este es el motivo que revela por qué las tobas conforman uno de los materiales más vulnerables a cualquier proceso erosivo, sea de naturaleza mecánica o química.

3.- La vinculación genética “toba” – “agua” esclarece otra de las características que suelen asociarse a estos ámbitos carbonáticos: la presencia de una mayor o menor humedad en los sitios provistos de estas acumulaciones. A veces, una humedad residual acompaña a las formaciones fósiles pues en los parajes donde se localizan persiste, todavía, un control de la estructura geológica capaz de activar la salida temporal de agua procedente de los acuíferos kársticos circundantes. Sea funcional o residual, dicha humedad se traduce en la colonización de todo el entorno por un marco vegetal que, en muchos parajes (manantiales, orillas de ríos y lagos), alcanza una espléndida frondosidad, siempre y cuando la acción deforestadora del hombre no haya ocasionado graves perturbaciones.

4.- La vegetación, y su indudable valor en la composición y definición del paisaje tobáceo, no conforma sólo el escenario que acoge a las morfologías tobáceas, también va a influir, de modo directo o indirecto, en su crecimiento, desarrollo y conservación a lo largo del tiempo (Fidalgo et al., 2014).

Directamente porque el CO₂ vinculado a las formaciones vegetales y los suelos sobre los que se asientan, ejerce un papel decisivo tanto en la eficacia de los procesos de disolución en los roquedos calizos, origen de los carbonatos tobáceos, como en los procesos de precipitación de éstos. Esta se deriva de la ruptura de equilibrio de las soluciones

en los flujos de agua y está motivada por la actividad fotosintética de los macrofitos y microfitos que viven en el agua o en sus inmediaciones. Esta circunstancia ha llevado a ciertos autores (Casanova 1981; Weisrock, 1986; Vaudour, 1988....) a aplicar términos como “*biolitogénesis*” o “*biosedimentario*” a los procesos y a los materiales tobáceos engendrados por aquellos.

Indirectamente, por el papel protector ejercido por las cubiertas vegetales al minimizar o reducir la eficacia de los procesos erosivos en los sistemas tobáceos de laderas y fondos de valle.

Los paisajes tobáceos: distribución y génesis

Los sistemas tobáceos funcionales se distribuyen de modo azonal por diversos territorios continentales pero, especialmente, por los dominios templados e intertropicales caracterizados por una mayor o menor humedad (Pentecost, 1995; Ford and Pedley, 1996; Pedley, 2009; González Martín y Fidalgo, 2014). A nivel mundial, son famosísimos por sus magníficos paisajes los conocidos ámbitos tobáceos de Shuzhong, en Jiuzhaigou (Sichuan, China), el Havasupai Canyon (E.E.U.U.), las Cascadas de Agua Azul (Chiapas, Méjico) o el recóndito Parque de Band-e-Amir (Afganistán).

En regiones tropicales, depósitos activos han sido estudiados en parajes muy lluviosos, como los de la Serra de André Lopes (Brasil) con precipitaciones de 1600-1800mm (Sallun Filho et al., 2012) o en el Queensland (N. de Australia), donde el volumen de lluvias (390-540 mm) es mucho más reducido (Taylor et al., 2004) y conlleva la presencia de un bosque de sabana (Carthew et al., 2003a).

En los dominios latitudinales templados, las tobas se encuentran muy bien representadas, especialmente en Europa donde han sido profusamente estudiadas. En sus territorios, tanto de la fachada atlántica como del centro continental, se alojan decenas de dispositivos bordeados por bosques con especies atlánticas caducifolias. Tampoco están ausentes en espacios de montaña -Alpes- donde se emplazan en distintos ámbitos bioclimáticos hasta los 2000 m. Pero es en las regiones mediterráneas, desde Turquía hasta la Península Ibérica, donde destacan magníficos ejemplos: lagos del valle del Krka, del Parque Natural de las Montañas de Velevit así como los ya citados y famosos, de Plitvice en el valle del Alto Korana (Croacia). Incluso, existen manifestaciones extraordinarias en áreas de notable sequedad, como las Lagunas de Ruidera, que sólo recogen unos 400 mm anuales (García del Cura et al., 1996). De igual modo, también están presentes en ciertas regiones que, con clima mediterráneo, salpican los territorios del Hemisferio Sur. Uno de los más interesantes se localiza en el SW de Australia con unas precipitaciones elevadas (1100 mm) pero un largo periodo de sequedad estival, (Forbes et al., 2010).

En España, la mayor parte de las acumulaciones tobáceas y sus paisajes asociados se ubican en la mitad oriental de la Península Ibérica de dominio calizo. Se instalan en el seno de numerosos corredores fluviales modelados sobre los relieves kársticos que personalizan este ámbito territorial donde, a veces y de modo discontinuo, jalonan tramos de hasta 70 km de longitud, como ocurre en el Alto Tajo. Ciertamente, estos paisajes se implantan en

casi todas las grandes cuencas hidrográficas y dentro de ellas se refugian en las áreas de cabecera. Así, se han inventariado dispositivos tobáceos (Vázquez Navarro et al., 2014) en los afluentes de los ríos Tajo (Trabaque, Escabas, Guadiela, Alcantud, Gallo, Cifuentes, Dulce, Alto Henares y Tajuña), Ebro (Rudrón, Tobalina, Inglares, Urederra, Jiloca, Amazaña, Mesa, Piedra, Blanco, Matarraña...), Guadalquivir, (Velillos, Borosa...), Alto Guadiana, Turia, Júcar-Cabriel, etc. Además sobresalen, los extraordinarios lagos de Ruidera y Bañolas, así como decenas de lagunas de menor entidad: Somolinos, Taravilla y Cifuentes (Guadalajara); del Tobar, Uña, Huerta del Marquesado (Cuenca); de Villaverde y del Arquillo (Albacete) y otros cientos de pequeños parajes desperdigados por los innumerables valles citados, a veces con espectaculares edificios más o menos funcionales -Nacimiento del río Cuervo (Figura N° 2) del río Mundo, Monasterio de Piedra, río Verde, Chera y otros muchos-

Todos estos espacios conforman excepcionales ámbitos naturales de alto valor ecológico y paisajístico que a la vez constituyen hábitats específicos para numerosos ecosistemas y especies. Por ello muchos se hallan hoy protegidos, atendiendo a su estructura o compleja génesis o a su elevado interés patrimonial (Carcavilla, 2008; Serrano y González Amuchastegui, 2014, Carcavilla et al., 2014). La capacidad que tienen las tobas de constituir medios singulares de alto valor ecológico es por lo que, mediante la Directiva Hábitats (92/43/CEE), fueron incorporados al inventario de hábitats excepcionales auspiciado por la Unión Europea -Red Natura 2000- (Carcavilla et al., 2014).

La dilatada distribución de los conjuntos tobáceos, a escala continental y/o regional, responde a una exigencia geológica, fundamental para su formación: la existencia de roquedos calizos y/o dolomíticos y, a partir de ellos, la presencia de unos flujos con aguas cargadas de carbonatos. Sin embargo, parecen concurrir otros requerimientos ambientales específicos y locales, donde el factor vegetal juega un papel esencial. Así se desprende del hecho de que estas formaciones se implanten casi siempre en medios forestales, diversos bioclimáticamente pero siempre con contrastadas condiciones de humedad. Allí, donde han sido estimadas las superficies cubiertas por la vegetación su porcentaje supera el 80% del territorio, predominado las especies arbóreas y, en mucha menor proporción, arbustos y praderas (Bossard et al., 2015). En otros ámbitos con tobas actuales, las descripciones son más cualitativas como son los casos de las densas formaciones arbóreas alojadas en las vertientes de numerosos valles de Gran Bretaña (Baker and Simms, 1998) o el conocido “*Bosque del Diablo*” que bordea los lagos de Plitvice (Roglic, 1977).

Figura N° 3

Barrera embrionaria reciente desarrollada en el lecho estacionalmente seco de un tributario de la Laguna Blanca (Campo de Montiel. Albacete). Fotografía de los autores.

La génesis de los paisajes tobáceos: Procesos geomorfológicos y cubiertas vegetales en el origen de los paisajes tobáceos.

La génesis y el desarrollo de los dispositivos tobáceos precisan la concurrencia de una serie de exigencias ambientales (Cuadro N° 1). Entre ellas sobresalen unos requerimientos bioclimáticos que propicien los procesos kársticos de disolución y precipitación de carbonatos. En síntesis, la formación de tobas requiere unas precipitaciones suficientes que aseguren flujos de agua con:

(a) caudales continuos y sin grandes variaciones;

(b) la existencia de aguas subterráneas con cuantiosa carga iónica (procedente de los procesos de disolución sobre los roquedos calizos y/o dolomíticos más o menos inmediatos);

(c) una escasa polución.

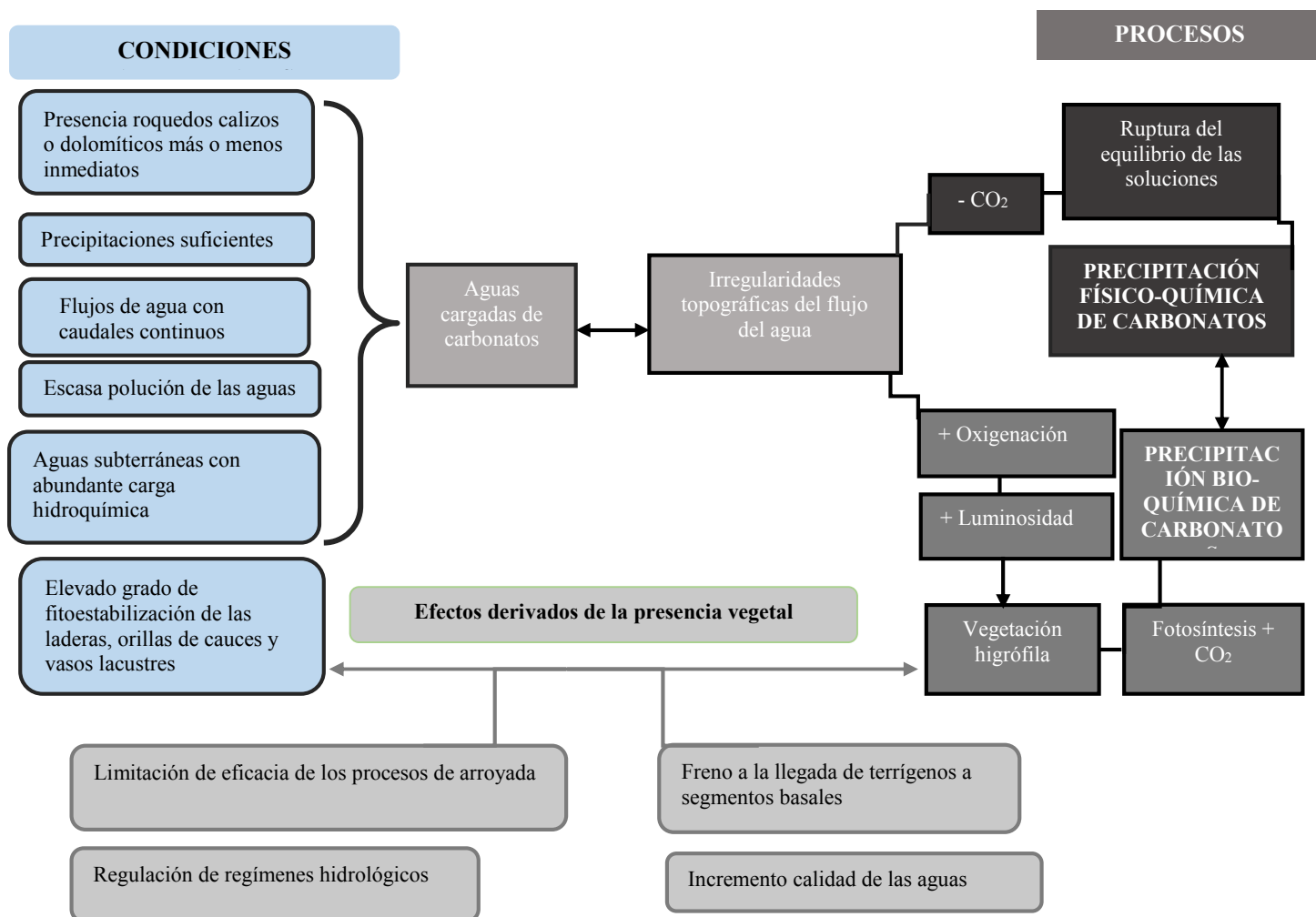
A ellas se añade otra condición: la presencia de una extensa y densa cubierta vegetal cuyo papel trascendental en la sedimentación de las tobas se desempeña a distintos niveles:

Por un lado las cubiertas vegetales, y los suelos sobre los que se instalan, suministran abundante CO₂ a los flujos de agua alimentados por las lluvias, lo que otorga una notable eficacia a los procesos de disolución. Posteriormente, estas corrientes, con mayor o menor carga de carbonatos, pasan a conformar las aguas subterráneas que circulan por los acuíferos hasta alumbrar en las laderas y fondos de valle.

Por otro, una vez que los flujos subterráneos pasan a circular superficialmente, el posible equilibrio de las soluciones carbonatadas, disueltas en sus aguas, sufre una serie de perturbaciones vinculadas a cambios fisico-químicos y/o biológicos. La acción combinada de ambos tipos de precipitación ha sido invocada repetidamente por numerosos autores (Viles and Goudie, 1990), aunque, desde hace unos años, se ha matizado experimentalmente su diferente comportamiento y eficacia. Las alteraciones fisico-químicas están controladas por variaciones en la temperatura del agua y, sobre todo, por la turbulencia provocada por la presencia de micro-rupturas u obstáculos vegetales en lechos y orillas.



Cuadro N° 1
EXIGENCIAS GEOAMBIENTALES PARA EL DESARROLLO DE LOS SISTEMAS TOBÁCEOS.
 Elaboración propia.



Estas modificaciones conllevan la ineludible precipitación de los carbonatos disueltos en las aguas (Cuadro N° 1) que es muy efectiva en las corrientes con flujos agitados (Zhang et al., 2001; Kano et al., 2003; Chen et al., 2004; Kawai et al., 2006, Brusa and Cerabolini, 2009; Vázquez-Urbez et al., 2004 y 2010) y, por tanto, capaces de engendrar fitohermos embrionarios (Figura N° 3) que, con el paso del tiempo, podrían incrementar sus dimensiones hasta valores métricos. Comunidades de musgos y hepáticas predominan en estos parajes y sobre ellos se incrustan, a modo de soporte, los carbonatos precipitados con acentuada velocidad. Pero, además, los flujos de agua registran otro tipo de perturbaciones asociado a la colonización de macrofitos y microfitos en los lechos y orillas. El consumo de CO₂ efectuado durante su metabolismo fotosintético suscita sendos fenómenos de desgasificación en las aguas, desencadenando nuevos procesos, ahora bioquímicos, de precipitación carbonática (Cuadro 1). Son protagonistas de esta biomineralización microfitos, como las algas, cianobacterias, bacterias, diatomeas, etc. (Pentecost, 2005) que, alojados en forma de *biofilms*, juegan un papel clave en la nucleación de la calcita (Golubic, 1991; Pentecost and

Whitton, 2000; Carthew et al., 2003a). Sin embargo, la trascendencia de este tipo de precipitación suele ser mínima en aquellos cursos fluviales de baja energía, pero aumenta excepcionalmente cuando las aguas se hallan inmobilizadas o semi-estancadas. Así, en ciertos cauces italianos con corrientes remansadas, no se detecta ningún tipo de precipitación si los *biofilms* están ausentes (Manzo et al., 2012).

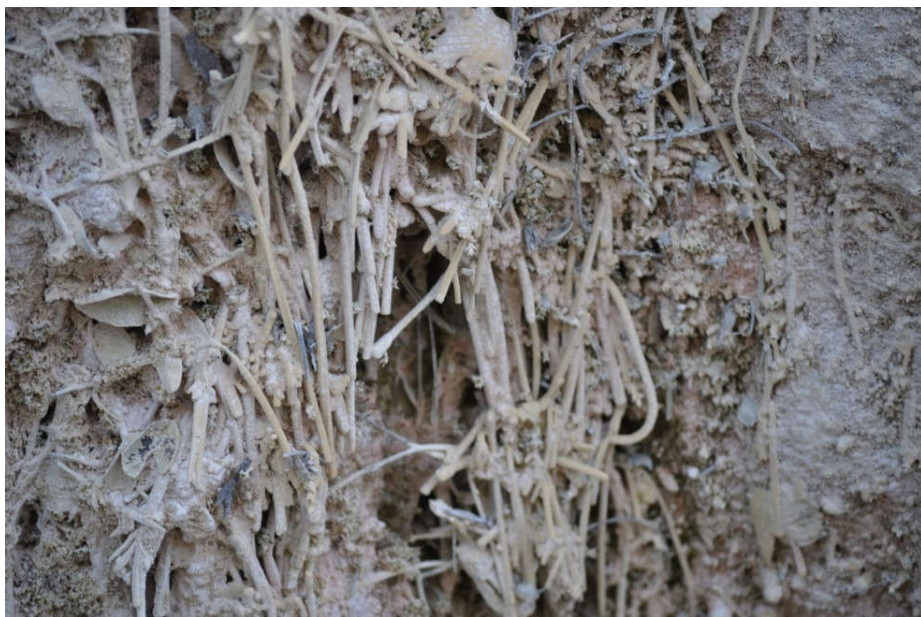
Junto a este papel, pasivo o activo, del elemento vegetal en la acumulación de los sedimentos tobáceos subyace otro, en este caso esencialmente indirecto: la capacidad fitoestabilizadora en el dominio de las laderas o en el de las orillas de cauces y humedales. La bio-protección de las vertientes asegura que la agresividad de los procesos erosivos sea débil, inclinándolo el balance *morfogénesis/edafogénesis* hacia esta última situación biotásica: su protección aminora la eficacia de los procesos de arroyada y, con ello, el correspondiente arrastre de materiales coluvionares hacia los fondos de valle. Asimismo, la conservación de los suelos contribuye a regular los regímenes hidrológicos de las cuencas fluviales (hecho esencial en las ubicadas en el dominio climático mediterráneo), favoreciendo la existencia de flujos

hipodérmicos y su lenta circulación subsuperficial en las vertientes.

De igual modo, las orlas perimetrales -riparia, acuática y subacuática- que flanquean cauces y vasos de agua ejercen, también, un rol protector. Además de intervenir en la precipitación bioquímica, su masa vegetal, al paralizar la llegada de terrígenos desde los segmentos basales de las laderas, asegura una nítida transparencia del agua y la posibilidad de que la luz alcance el fondo de ríos y lagunas. Incluso las especies vegetales que componen el bosque ripícola, y acompañan el trazado de los cauces, incrementan la calidad de las aguas al filtrar los polucionantes naturales. A la vez, liberan abundantes restos (troncos, ramas, hojas...) cuya acumulación en ciertos tramos de los lechos incrementa la agitación de los flujos. Es entonces cuando estos fragmentos vegetales se comportan como soporte inerte sobre el que la precipitación físico-química solidifica abundantes carbonatos que coadyuvan la construcción de barreras embrionarias (Figura N° 4) y de otros depósitos (Carthew et al., 2003b).

Figura N° 4

Pequeño obstáculo local en el lecho de una corriente estacional formado por la acumulación de restos vegetales rodeados por un encamisado carbonático. Cañada de las Hazadillas.- Campo de Montiel. Fotografía de los autores



Ecosecuencias evolutivas de los paisajes tobáceos: una propuesta de modelo evolutivo

Las necesidades convergentes de agua y cubiertas vegetales requeridas por los dispositivos tobáceos, permite correlacionar su presencia, en el registro fósil de determinadas regiones, con la existencia de etapas húmedas pasadas que favorecieron su desarrollo bajo condiciones ambientales específicas. Buenos ejemplos lo conforman los localizados en territorios actuales de máxima aridez, como los desiertos egipcio (Smith et al., 2004; Gomma and Abou-

El Anwarr, 2015), etíope (Moeyersons et al., 2006) y libio (Cremaschi et al., 2010).

De igual modo en las regiones templadas, se han hecho coincidir las fases donde progresaron los dispositivos tobáceos con etapas biotásticas (interglaciares o interestadales) presididas por ambientes térmicamente benignos y de notable humedad (Vaudour, 1988; Pedley et al., 1996; Dramis et al., 1999; Braum et al., 2000; Franck et al., 2000; Horvanticic and Calcic, 2000; Zak et al., 2000; Ordoñez et al., 2005; González Amuchastegui y Serrano, 2015a). Incluso, se ha podido concretar cómo determinadas épocas fueron más húmedas (Domínguez Villar et al., 2011) o más cálidas que las actuales, a partir de diversos análisis (polínicos, antracológicos, sedimentológicos, isotópicos) y del examen de las improntas foliares identificadas entre los carbonatos. Así se ha advertido, por ejemplo en el corazón de Europa (Alemania), como junto a una vegetación atlántica (*Corylus*, *Juglans*, *Populus*) se ha detectado también la presencia de especies termófilas, propias de lugares más meridionales (Pentecost, 2005). En este continente, y en todas sus regiones, incluidas las mediterráneas, uno de los periodos donde las tobas conocieron un auge excepcional fue el interglaciar Riss-Würm (Arenas et al., 2014; Torres et al., 2015; Domínguez Villar et al., 2011), Estadio Isotópico del Oxígeno 5 -MIS-5-, cuyo inicio y final sobrevinieron entre 128.000 años y 74.000 años, respectivamente.

Por su parte, el retroceso y/o desaparición de los sistemas tobáceos se registró en el transcurso de las fases frías (glaciares o estadales) en las que condiciones muy rigurosas fueron acompañadas de una notable sequedad.

En esta alternancia, los dispositivos tobáceos se comportaron como otros sistemas terrestres experimentando variaciones temporales en su funcionamiento, o eco-secuencias, reflejadas en profundos cambios en el paisaje y sometidas a un balance donde intervinieron procesos constructivos o de sedimentación y destructivos o de erosión (Fuller et al., 2011).

Ecosecuencia positiva: sedimentación

Un modelo evolutivo de los paisajes tobáceos en los valles kársticos del interior peninsular contempla el encadenamiento de una serie de fases con ambientes a veces muy diferentes (González Amuchastegui & Serrano, 2015b) y que se han sintetizado en tres etapas.

En la Península Ibérica, la mayoría de los paisajes tobáceos que contemplamos en la actualidad, nacieron una vez finalizados los fríos de la última glaciación y del corto episodio gélido del Dryas reciente que, a pesar de perdurar un sólo milenio (11.000–10.000), tuvo importantes consecuencias ambientales. Esta etapa finipleistocena fue adversa para la formación de tobas al conllevar unas condiciones que favorecieron la morfogénesis en las laderas, debido a la eficacia de los ciclos de hielo-deshielo y del enrarecimiento de las cubiertas vegetales. Al actuar sobre las

acentuadas pendientes de los valles y cañones kársticos, ambos factores contribuyeron a generar y a movilizar importantes masas de coluviones que descendieron hasta los fondos de valle, impidiendo cualquier progreso a las formaciones tobáceas.

Con la llegada de los ambientes templado-húmedos del Holoceno, aquellos corredores fluviales pasaron a conocer un escenario diferente. Fue protagonizado por flujos de agua más continuos y caudalosos así como por la colonización de densas masas forestales en vertientes, interfluvios y fondos de valle. Todos estos factores fueron determinantes para el impulso de los procesos de precipitación de carbonatos, modelando una importante transformación del paisaje, y de los ecosistemas, hasta entonces imperantes. Sin embargo, el funcionamiento de los procesos constructores no fue homogéneo a lo largo de los tiempos holocenos. El motivo radicó en los variados ambientes forestales (en especies y densidad) que se sucedieron durante sus etapas Preboreal, Boreal y Atlántica (González Amuchastegui and Serrano, 2015a).

Con estas matizaciones, en una ecosecuencia progresiva hicieron acto de presencia notables edificios tobáceos, de alzado cuneiforme y planta en forma de abanico, desarrollados al pie de los manantiales que alumbraban en las vertientes, rediseñando un nuevo perfil a sus distintos segmentos. Mientras, en los cauces se iban alzando pequeños obstáculos carbonáticos capaces de retener parcialmente las aguas y de trastocar, con su crecimiento en altura, el gradiente longitudinal de los lechos fluviales. Poco a poco, aquellos fitohermos represaron humedales que, después, cedieron su lugar a ámbitos fluvio-lacustres conforme aquellas represas naturales evolucionaban hacia grandes barreras tobáceas.

En un breve lapso de tiempo, ingentes cantidades de carbonatos colmataron los fondos de valle auspiciando un proceso de agradación con tobas que, a veces, desarrollaron, espesores decamétricos. El grado de fitoestabilidad fue tan elevado durante aquel óptimo sedimentario que los cursos de agua fueron incapaces, casi totalmente, de movilizar materiales detríticos. Así, lo sugiere la frecuente ausencia de lechos con arenas, gravas y cantos en el seno de los perfiles estratigráficos de las potentes tobas fluviales de este momento. Quizás, sean los valles del Alto Guadiana y del Alto Tajo dos de los mejores modelos peninsulares que, junto a otros, han experimentado este tipo de evolución progresiva a largo de decenas de kilómetros. En el primero para ofrecer el magnífico escenario de las Lagunas de Ruidera (Pedley et al., 1996; Ordoñez et al., 2005; González Martín et al., 2004), donde su curso fluvial pasó a engendrar las elevadas represas que retienen cada laguna, con profundidades de hasta 20 m. En el segundo, para advertir cómo en su tramo Peralejos de las Truchas - Trillo (Guadalajara), las decenas de pequeñas lagunas que, entonces, jalonaron su paisaje han desaparecido hoy casi en su totalidad. Atestiguando su existencia sólo quedan restos de los antiguos edificios tobáceos, bien pertenecientes a antiguos humedales o como estribos de los fitohermos (< 5-8 m de altura) que represaron las aguas del río (González Amuchastegui y González Martín, 1993; Guerrero y González, 2000). Este contrastado destino de los dispositivos tobáceos, en uno y otro valle, dan paso al

análisis de las secuencias negativas de deterioro y/o destrucción.

Ecosecuencia negativa: erosión

Conocida la convergencia de factores favorables para la gestación y crecimiento de los dispositivos tobáceos así como su extrema fragilidad, se entenderá que una modificación de las condiciones ambientales pudiera conducir a una ecosecuencia negativa. En ella, la ralentización de los procesos de precipitación originaría un rápido deterioro, y posible desaparición, de aquellos dispositivos. Ahora bien, si durante el Pleistoceno y hasta el Holoceno medio, las fluctuaciones climáticas fueron las únicas responsables, la degradación registrada en el transcurso de los últimos milenios conlleva una cierta ambigüedad genética. Se deriva de la coexistencia de dos fenómenos a tener en cuenta: por un lado, las aludidas oscilaciones climáticas de corta duración y por otro, una acción humana que, ya en los tiempos protohistóricos, tuvo la capacidad de transformar el paisaje en numerosos valles mediterráneos y que continuó, con mayor intensidad, en época romana (Curras et al., 2012). Los impactos antrópicos se incrementaron en tiempos posteriores como se detecta en la abundante documentación histórica que testifica la multiplicidad de usos en ellos registrados: prácticas agrícolas y ganaderas, aprovechamientos madereros, roturaciones vinculadas a los trabajos de extinción de plagas de langosta, explotaciones mineras, etc. (González Martín y Rubio, 2000; González Martín et al, 2014). Todos estos impactos contribuyeron a generar una ecosecuencia erosiva derivada de una compleja dinámica, inscrita en un ciclo climático-antrópico (Vaudour 1986, 1988) que llega hasta nuestros días.

En él, los paisajes tobáceos, tras alcanzar el notable auge que les acompañó hasta el Óptimo Climático Holoceno (4.000 años a.C.), pasaron a conocer una importante transformación que incrementaría sus efectos desde el II milenio a.C. en distintas regiones españolas. Así, el enorme atractivo ofrecido por estos entornos motivó la ocupación del hombre, a partir de la Edad del Bronce y generó que, desde entonces, muchos de ellos entrasen en un proceso de degradación (Goudie et al., 1993; González Martín y Rubio, 2000), vinculado al aprovechamiento de sus múltiples recursos naturales (agua, piedra como elemento constructivo, terrazgo para los cultivos sobre los lábiles y fértiles sedimentos tobáceos, etc.). Aquella temprana presión antrópica, no desdeñable en ciertas áreas (Martín Martín, 2002; González Amuchastegui and Serrano, 2015a; Mejías et al., 2015), conllevó el que cientos de ellos comenzaran a perder progresivamente su funcionalidad y evolucionaran hacia su ocaso.

La degradación de las cubiertas vegetales fue el proceso que mayor responsabilidad tuvo en esta ecosecuencia negativa. En efecto fue el origen de otros procesos en cadena que acarrearón la disfuncionalidad de los sistemas tobáceos al ser amplificadas sus efectos por los impactos humanos (Goudie et al., 1993). La disminución de las masas forestales, además de mermar la presencia de CO₂ en suelos y aguas, incrementó los fenómenos de erosión en las laderas. En ellas, los procesos de arroyada decapitaron

los horizontes edáficos lo que redujo la capacidad de retención hídrica de los suelos y aportaron cuantiosos terrígenos a los fondos de valle. Estos detríticos, con diversa granulometría y naturaleza litológica, se manifestaron con variadas consecuencias sobre las acumulaciones tobáceas y paisajes supeditados:

- Inicialmente, su llegada a los flujos de agua eliminó en ellos los tapices algáceos por abrasión y allí donde sobrevivieron perdieron buena parte de su eficacia constructiva debido a la disminución de su actividad fotosintética derivada del obscurecimiento de las aguas.

- Esta fricción también incentivó numerosos fenómenos de socavación en orillas y fondos donde afloraban las tobas. De modo especial durante los eventos de alta energía, capaces de arrastrar numerosos detríticos de notable tamaño y de litologías muy abrasivas (cuarcitas, cuarzos, etc.). En ocasiones su violento transporte modeló en escasas horas, y por rotación de los clastos, pozas y marmitas de 1 m de profundidad y hasta varios de diámetro (Figura N° 5); buenos ejemplos se han podido advertir actualmente en ciertos valles del Campo de Montiel y de la Sierra de Alcaraz.

Figura N° 5

Procesos recientes de encajamiento y formación de marmitas en los sedimentos carbonáticos pertenecientes a dos rampas adosadas a una barrera tobácea hacia aguas abajo. A la izquierda, ejemplo localizado en las inmediaciones de la Laguna Tomilla (Lagunas de Ruidera) y a la derecha, en un paraje cercano a la Laguna de Arquillo (Sierra de Alcaraz.- Albacete). Fotografías de los autores.



- La acción combinada de estas secuelas, junto a otras asociadas a sensibles cambios hidrológicos (caudales con menor continuidad y/o contrastadas variaciones en su volumen), modificaron las pautas de los procesos fluviales. Así, muchos ríos sustituyeron su tendencia holocena pasando desde una sedimentación preferentemente carbonática a otra de naturaleza casi exclusivamente detrítica, como lo atestigua la presencia de gravas y arenas en incontables cauces actuales (González Amuchastegui y González Martín, 1993; Guerrero y González, 2000; González y Rubio, 2000; Fernández Fernández et al., 2000). Ello conllevó una dinámica generalizada de incisión que, en muchos

tramos, dejó colgados a los conjuntos tobáceos holocenos a varios metros de altura sobre las márgenes de ríos y vasos de antiguas lagunas. Este encajamiento desarticuló los anteriores entornos palustres y/o lacustres operando, en definitiva, la mutación de los ecosistemas de los fondos de valle. En otros tramos, los sedimentos detríticos, tanto procedentes de las vertientes como arrastrados longitudinalmente por los cauces, colmataron los vasos de antiguos humedales y lagunas fosilizando las acumulaciones tobáceas previas (Figura N° 6).

Figura N° 6

Actuales sedimentos terrígenos coluvionares (2) fosilizando recientes acumulaciones fluviales tobáceas (1) aguas arriba de la Laguna Blanca (Parque Natural de las Lagunas de Ruidera). La principal fuente de estos detríticos se encuentra en laderas dedicadas a la agricultura. Fotografía de los autores.



La vegetación también puede interpretar un rol perjudicial en esta ecosecuencia negativa, aunque de modo local y aliado con otros impactos de orden hidrológico. Causas naturales (disminución de la precipitación,) pero sobre todo antrópicas, han sido responsables de que las estructuras carbonáticas sirvan de asiento a

distintos ejemplares arbóreos y/o arbustivos que, con mayor o menor densidad, colonizan las frágiles tobas, penetrando sus sistemas radiculares a notable profundidad (Figura N° 7). Sus efectos de cuña provocan notorios desprendimientos que, por lo general, acontecen en los paramentos de aguas abajo, a la vez que aportan líneas de debilidad que deterioran las condiciones de relativa impermeabilidad de las estructuras carbonáticas que represan los lagos adyacentes.

Figura Nº 7

Raíz vertical de higuera (*Ficus carica*) en la barrera tobácea de la Laguna del Rey (Parque Natural de las Lagunas de Ruidera). Su notable penetración ha motivado el desprendimiento de bloques tobáceos caídos a su pie. Fotografía de los autores



Consideraciones finales

Los paisajes tobáceos se insertan en el dominio de las regiones kársticas y, a pesar de su actual escasa representación espacial, constituyen entornos de gran valor natural y patrimonial. Su importancia reside no sólo en su enorme singularidad y belleza sino también en su arquitectura por las morfologías carbonáticas que los conforman. Además, constituyen magníficos archivos paleoambientales, al ofrecer una gran sensibilidad a las alteraciones registradas en el medio natural. Durante el Cuaternario, estos paisajes progresaron casi siempre bajo etapas biotásicas, templadas y húmedas, desapareciendo durante las fases frías y/o secas. En el Pleistoceno, la naturaleza de estos cambios ambientales provino exclusivamente de oscilaciones climáticas y su repercusión sobre las cubiertas vegetales. Sin embargo, en el Holoceno, el hombre desempeñó un papel primordial al modificar el entorno con una presión incluida en una dinámica climático/antrópica, resultando difícil dilucidar, con rigor, los límites de responsabilidad entre las pequeñas fluctuaciones climáticas y la acción humana.

Los paisajes tobáceos actuales son los supervivientes de un vasto conjunto de lugares que se extendieron durante el Holoceno por los territorios de Europa central y mediterránea. Así, lo atestigua la existencia de una enorme cantidad y variedad de acumulaciones carbonáticas emplazadas en sus valles kársticos y cuyo conocimiento ha sido posible mediante la aplicación convergente de distintas metodologías: geomorfológicas, sedimentológicas, isotópicas, radiométricas, etc.

España dispone de un abundante número de parajes tobáceos, algunos de ellos excepcionales, que han sobrevivido en ámbitos donde la antropización del medio no

fue históricamente muy acentuada. Por lo general, estos espacios se hallan preservados con diferentes figuras de protección, a pesar de ello, las amenazas sobre estos vulnerables entornos no han cesado. Para asegurar su supervivencia futura es ineludible que la Administración incremente las medidas protectoras y patrocine estudios dirigidos a reconocer, mediante técnicas de monitorización, el papel preciso desempeñado por la vegetación en cada uno de ellos. No sólo porque su presencia es el reflejo ineludible de unas condiciones medioambientales propicias al desarrollo de formaciones tobáceas; sino porque despliega un rol activo y pasivo, junto con el recurso hídrico, en la génesis de estos entornos. Hasta entonces, se impone evitar cualquier tipo de intervención que conlleve actuaciones deforestadoras pues constituyen uno de los principales factores desencadenantes de la paralización y muerte de los sistemas tobáceos y de sus paisajes asociados.

Bibliografía:

- ARENAS, C., VÁZQUEZ-URBEZ, M., PARDO, G. and SANCHO, C. Sedimentology and depositional architecture of tufas deposited in stepped fluvial systems of changing slope: Lessons from the Quaternary Añamaza valley (Iberian Range, Spain). *Sedimentology*, 2014, Nº 61, p. 133-171.
- BAKER, A. and SIMMS, M.J. Active deposition of calcareous tufa in Wessex, U.K., and its implications for the Late-Holocene tufa decline. *Holocene*, 1998, nº 8, p. 359-365.
- BOSSARD, C. C., CAO, Y., WANG, J., ROSE, A., TANG, Y. New patterns of establishment and growth of *Picea*, *Abies* and *Betula* tree species in subalpine forest gaps of Jiuzhaigou National Nature Reserve, Sichuan, Southwestern China in a Changing environment. *Forest Ecology and Management*, 2015, Nº 356, p. 84-92.
- BRASIER, A.T. Searching for travertines, calcretes and speleothems in deep time: processes, appearances, predictions and the impact of plants. *Earth Science Reviews*, 2011, Nº 104, p. 213-239.
- BRAUM, F.M., HAMBACH, M., MANGINI, A. and WAGNER, G. Warm period growth of travertine during the last Interglaciation in Southern Germany. *Quaternary Research*, 2000, Nº 54 (1), p. 38-48.
- BRUSA, G. and CERABOLINI, B.E. Ecological factors affecting plant species and travertine deposition in petrifying springs from a Italian "Natura 2000" site. *Botanica Helvetica*, 2009, Nº 119, p. 113-123.
- CAPPEZZUOLI, E., GANDIN, A. and PEDLEY, M. Decoling tufa and travertine (freshwater carbonates) in the sedimentary record. The state of the art. *Sedimentology*, 2014, Nº 61, p.1-21.
- CARCAVILLA, L. y RUIZ, R. El papel de la geología y la geomorfología en la declaración de espacios naturales protegidos

- en Castilla-La Mancha. En: J. Benavente y F.J. Gracia (eds.), *Trabajos de Geomorfología en España 2006-2008*, S. E.G., 2008, p. 435-438.
- CARCAVILLA, L., DURÁN, J.J., VÁZQUEZ, A. y VÁZQUEZ-NAVARRO, J. Patrimonio geomorfológico: conservación y gestión de los edificios y paisajes tobáceos. En: J. A. González Martín y M.J. González Amuchastegui (eds.) *Las Tobas en España*, Badajoz, Sociedad Española de Geomorfología, 2014, p. 339-348.
- CARTHEW, K.D., DRYSDALE, R. N. and TAYLOR, M. Tufa deposits and biologic activity, Riversleigh, NW Queensland. En: I.C. Roach (edit.), *Advances in Regolith*, CRE-Lms., 2003a, p. 55-59.
- CARTHEW, K.D., TAYLOR, M. and DRYSDALE, R. N. Are current models of tufa sedimentary environments applicable to tropical systems? A case study from the Gregory River. *Sedimentary Geology*, 2003b, N° 162, p.199-218.
- CASANOVA, J. Morphologie et biolithogenèse des barrages de travertins. *Actes du Colloque de l'A.G.F. Formations carbonatées externs: tufs et travertins*. Paris. Association Française de Karstologie, 1981, Mem. 3, p. 45-54.
- CORREA, D., AULER, S.S., WANG, X., EDWARDS, R.L. and CHENG, H. Geomorphology and genesis of the remarkable Araras Ridge tufa deposits, Western Brazil. *Geomorphology*, 2011, N° 134 (1-2), p. 94-101.
- CREMASCHI, M., ZERBONI, A., SPÖTL, C, FELLETTI, F. The calcareous tufa in the Tadrart Acacus Mt. (SW Fezzan, Libya): an early Holocene palaeoclimate archive in the Central Sahara. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, N° 287 (1), p. 81-94.
- CURRAS, A., ZAMORA, L., REDD, J.M., GARCÍA SOTO, E., FERRERO, S., ARMENGOL, X., MEZQUINA JOANES, F., MARQUÉS, M.A., RIERA, S. and JULIÁ, R. Climate change and human impact in central Spain during Roman times: High-resolution multi-proxy of a tufa lake record (Somolinos, 1280 m.a.s.l.). *Catena*, 2012, N° 89, p. 31-55.
- CHEN, J., ZHANG, D.D., WANG, S., XIAO, T. and HUANG, R. Factors controlling tufa deposition in natural waters at waterfall sites. *Sedimentary Geology*, 2004, N° 166, p. 353-366.
- DOMÍNGUEZ-VILLAR, D., VÁZQUEZ NAVARRO, J.A., CHEN, H. and EDWARDS, R.L. Freshwater tufa record from Spain supports evidence for the past interglacial being wetter than the Holocene in the Mediterranean Region. *Global Planetary*, 2011, N° 77, p. 129-141.
- DRAMIS, F., MATERAZZI, M. and CILLA, G. Influence of climatic changes on freshwater travertine deposition: a new hypothesis. *Phys. Chem. Earth*, 1999, N° 24 (10), p. 893-897.
- FERNÁNDEZ FERNÁNDEZ, A., GARCÍA DEL CURA, M.A., GONZÁLEZ MARTÍN, J.A. y ORDOÑEZ, S. Morfogénesis y sedimentación carbonática pleistocena en el valle del Júcar. *Geotemas*, 2000, N° 1(3), p. 353-357.
- FIDALGO HIJANO, C., GONZÁLEZ MARTÍN, J.A. y GONZÁLEZ AMUCHASTEGUI, M.J. Vegetación y paisajes tobáceos. En: R. Cámara Artigas, B. Rodríguez Pérez y J.L. Muriel Gómez (eds.), *Biogeografía de Sistemas Litorales. Dinámica y Conservación*. Universidad de Sevilla y A.G.E. (Grupo G³ Física), 2014, p. 327-333.
- FORBES, M., VOGWILL, R. and ONTON, K. A characterisation of the coastal tufa deposits of South-West, Western Australia. *Sedimentary Geology*, 2010, N° 232 (1-2), p. 52-65.
- FORD, T.D. and PEDLEY, H. M. A review of tufa and travertine deposits of the world. *Earth Science Reviews*, 1996, N° 41, p.117-175.
- FRANCK, N., BRAUM, M., HAMBACH, U., MANGINI, A. and WAGNER, G. Warm period growth of travertine during the last interglaciation in Southern Germany. *Quaternary Research*, 2000, N° 54, p. 38-48.
- FULLER, B.M., SKLAR, L.S., COMPSON, Z.G., ADAMS, K.J., MARKS, J.C. and WILCOX, A. C. Ecogeomorphic feedbacks in regrowth of travertine step-pool morphology after dam decommissioning, Fossil Creek, Arizona. *Geomorphology*, 2011, N° 126, p. 314-332.
- GARCÍA DEL CURA, M. A.; GONZÁLEZ MARTÍN, J. A y ORDÓÑEZ, S. Las Lagunas de Ruidera. En: García Rayego, J.L y González Cárdenas, E. (eds.), *Elementos del Medio Natural en la Provincia de Ciudad Real*, 1996, p. 83-129.
- GOLUBIC, S. Modern stromatolites: A review. En: R. Riding (ed.), *Calcareous Algae and Stromatolites*. New York, 1991: Springer, p. 541-561.
- GOMMA, M.M. and ABOU-EL ANWARR, E.A. Electrical and Geochemical properties of tufa deposits as related to mineral composition in the South-Western Desert Egypt. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2015, N° 12, p. 292-302.
- GONZÁLEZ-AMUCHASTEGUI, M. J. y GONZÁLEZ MARTÍN, J.A. Significado geomorfológico de las acumulaciones tobáceas del alto valle del río Tajo (sector Peñalén-Huertapelayo). En *El Cuaternario de España y Portugal*, I.T.G.E. y A.E.Q.U.A., I, 1993, p. 99-109.
- GONZÁLEZ-AMUCHASTEGUI, M.J. and SERRANO, E. Holocene Tufa changes as response to human impact on environments (Upper Ebro Basin. Northern Spain). *Zeitschrift für geomorphologie*, 2015, N° 59-2, p. 199-223.
- GONZÁLEZ-AMUCHASTEGUI, M.J. and SERRANO, E. Tufa buildups, landscape evolution and human impact during the Holocene in the Upper Ebro Basin. *Quaternary International*, 2015, N° 364, p. 54-64.
- GONZÁLEZ MARTÍN, J.A. y RUBIO FERNÁNDEZ, V. Las transformaciones antrópicas del paisaje de los sistemas fluviales tobáceos del Centro de España. *Boletín Real Sociedad Española. Historia Natural (Sec. Geol.)*, 2000, N° 96, (1-2), p.155-186.
- GONZÁLEZ MARTÍN, J.A., ORDOÑEZ, S. y GARCÍA DEL CURA, M^a A. El Alto Valle del Guadiana y las Lagunas de Ruidera. En: G. Benito y A. Díez Herrero (eds.), *Itinerarios geomorfológicos por Castilla-La Mancha*, S.E.G., 2004, p. 125-157.
- GONZÁLEZ MARTÍN, J.A., FIDALGO, C., ARTEAGA C, GONZÁLEZ AMUCHASTEGUI, M.J. y RUBIO, V. La degradación antrópica de los paisajes tobáceos. . En: J. A. González Martín y M.J. González Amuchastegui (eds.) *Las Tobas en España*, Badajoz, Sociedad Española de Geomorfología, 2014, p. 317-338.
- GONZÁLEZ MARTÍN, J.A. y FIDALGO, C. Las acumulaciones tobáceas: exigencias geoambientales y distribución espacio-temporal. . En: J. A. González Martín y M.J. González Amuchastegui (eds.) *Las Tobas en España*, Badajoz, Sociedad Española de Geomorfología, 2014, p. 39-59.
- GOUDIE, A. S., VILES, H. A. and PENTECOST, A. The Late-Holocene tufa decline in Europe. *The Holocene*, 1993, N° 3, p.181-186.

- GUERRERO DOMÍNGUEZ, L. y GONZÁLEZ MARTÍN, J. A. Características geomorfológicas del modelo de construcción tobáceo del Alto Tajo en su fondo de valle (Peralejos de las Truchas-Guadalajara). *Geotemas*, 2000, N° 1(3), p. 375-378.
- HORVATINCIC, N., CALIC, R. and GEYH, M.A. Interglacial growth of tufa in Croatia. *Quaternary Research*, 2000, N° 53 (2), p.185-195.
- KANO, A., MATSUOKA, J., KOJO, T. and FUJI, H. Origin of annual laminations in tufa deposits, southwest Japan. *Palaeogeography, Palaeoclimatology and Palaeoecology*, 2003, N° 191, p. 243-262.
- KAWAI, T., KANO, A., MATSUOKA, J. and IHARA, T. Seasonal variation in water chemistry and depositional processes in a tufa-bearing stream in SW. Japan based on 5 years of monthly observations. *Chemical and Geology*, 2006, N° 232, p. 33-53.
- MAGNIN, F., GUENDON, J.L., VAUDOUR, J. et MARTIN, P. Les travertins: accumulations carbonatées associées aux systèmes karstiques, séquences sédimentaires et paléoenvironnements quaternaires. *Bulletin Société Géologique de France*, 1991, N° 162 (3), p. 585-594.
- MANZO, E., PERRI, E. and TUCKER, M.E. Carbonate deposition in a fluvial tufa system: processes and products (Corvino Valley, Southern Italy). *Sedimentology*, 2012, N° 59, p. 553-577.
- MARTIN MARTIN, J.M., DIAZ-HERNÁNDEZ, J.L., ESTEVAN-AMAT, A. and JULIA, R. Travertine canals from Alicún (S. Spain): implications on neolithic water management and on interpretation of the recent climatic evolution. *Geogaceta*, 2002, N° 31, p. 19-21.
- MEJÍAS, M., BENITO DE LUGO, L., LÓPEZ-SÁEZ, J.A. y ESTEBAN, C. *Arqueología, Hidrogeología y Medio Ambiente en la Edad del Bronce de la Mancha: la Cultura de las Motillas*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España, 2015.
- MOEYERSONS, J., NYSSSEN, J., POESEN, J., DECKERS, J., HAILE, M.. Age and backfill/overflow stratigraphy of two tufa dams, Tigray Highlands, Ethiopia: evidence for Late Pleistocene and Holocene wet conditions. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, N° 230 (1), p. 165-181.
- ORDÓÑEZ, S., GONZÁLEZ MARTÍN, J.A., GARCÍA DEL CURA, M.A. and PEDLEY, H.M.. Temperate and semi-arid tufas in the Pleistocene to Recent fluvial barrage system in the Mediterranean area: The Ruidera Lakes Natural Park (Central Spain). *Geomorphology*, 2005, N° 69, p. 332-350.
- PEDLEY, M., ANDREWS, J., ORDOÑEZ, S., GARCÍA DEL CURA, M.A., GONZÁLEZ MARTÍN, J.A. and TAYLOR, D. Does climate control the morphological fabric of freshwater carbonates? A comparative study of Holocene barrage tufas from Spain and Britain. *Palaeogeography, Palaeoclimatology and Palaeoecology*, 1996, N° 121, p. 239-257.
- PEDLEY, M. Tufas and travertines of the Mediterranean region: a testing ground for freshwater carbonate concepts and developments. *Sedimentology*, 2009, N° 56 (1), p. 221-246.
- PENTECOST, A. The Quaternary travertine deposits of Europe and Asia Minor. *Quaternary Science Review*, 1995. N° 14, p. 1005-1028.
- PENTECOST, A. and WHITTON, B. A. Limestones. En: B. A. Whitton & M. Potts (eds.), *The Ecology of cyanobacteria. Their diversity in time and space*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands 2000, p. 257-279.
- PENTECOST, A. *Travertine*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany, 2005.
- QUIAO, X., LUGLI, S., REN J. XIAO, W., CHEN, P., TANG, Y. Are climate warming and enhanced atmospheric deposition of sulfur and nitrogen threatening tufa landscapes in Jiuzhaigou National Nature Reserve, Sichuan, China?. *Scientific of the Total Environment*, 2016, N° 562, p.724-731.
- ROGLIC, J. Les lacs de Plitvice (Yougoslavie). *Norois*, 1977, N° 95 (bis), p. 305-318.
- ROIRON, P. Apport des flores des travertins à la reconstitution des paléoenvironnements néogènes et Quaternaires. *Études de Géographie Physique*, 1997, Suppl. au N° 26, p. 39-42.
- SALLUN FILHO, W., SAPIENSA ALMEIDA, L.H., BOGGIANI, P.C. and KARMANN, I. Characterization of quaternary tufas in the Serra do André Lopes, Southeastern Brazil. *Carbonates & Evaporites*, 2012, N° 27, p. 357-373.
- SERRANO, E. y GONZÁLEZ AMUCHASTEGUI M.J. Tobas y patrimonio en la ciudad de Frías (Burgos). El patrimonio geomorfológico como parte del conjunto histórico. *Avances en la Geomorfología Española*, SEG-Universidad de Extremadura, Cáceres, 2004, p. 425-428.
- SMITH, J.R., GIEGENGACK, R. and SCHWARCZ, H.P. Constraints on Pleistocene pluvial climates through stable-isotope analysis of fossil-spring tufas and associated gastropods, Kharga Oasis, Egypt. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, N° 206, p. 157-175.
- TAYLOR, M.P., DRYSDALE, R.N. and CARTHEW, D. The formation and environmental significance of calcite rafts in tropical tufa-depositing rivers of northern Australia. *Sedimentology*, 2004, N° 51, p. 1089-1101.
- TORRES, T., ORTIZ, J.E., BLÁZQUEZ, A.M., RUIZ ZAPATA, B., GIL, M.J., MARTÍN, T. and SÁNCHEZ-PALENCIA, Y. The MIS 5 palaeoenvironmental record in the SE Mediterranean coast of the Iberian Peninsula (Río Antas, Almería, Spain). *Climate of the Past Discussions*, 2015, N° 11, p. 3897-3936.
- VAUDOUR, J. Introduction à l'étude des édifices travertineux holocènes. *Méditerranée*, 1986, N° 57 (1-2), p. 3-10.
- VAUDOUR, J. *Histoire de l'environnement*. URA 903 et ATP PIREN-CNRS Aix-en- Provence, 1988.
- VÁZQUEZ-NAVARRO, J. A., VÁZQUEZ, A. y CARCAVILLA, L. Caracterización general y distribución espacial. En: J.A.González Martín y M.J. González Amuchastegui (eds) *Las Tobas en España* Sociedad Española de Geomorfología, 2014, p.103-118.
- VÁZQUEZ-URBEZ, M., SANCHO, C., ARENS, A., OSÁCAR, C. y AUQUÉ, L. Medidas volumétricas del crecimiento tobáceo en el Monasterio de Piedra (provincia de Zaragoza) En G. Benito y A. Díez Herrero (edits) *Contribución reciente sobre Geomorfología*. S.E.G. y C.S.I.C., 2004, N° 1, p.157-164
- VÁZQUEZ-URBEZ, M., ARENAS, C., SANCHO, C., OSÁCAR, C., AUQUÉ, L. and PARDO, G. Factors controlling present-day tufa dynamics in the Monasterio de Piedra Natural Park (Iberian Range, Spain): depositional environmental settings, sedimentation rates and hydrochemistry. *International Journal of Earth Sciences*, 2010, N° 99, p.1027- 1049.
- VILES, H.A. and GOUDIE, A.S. Tufas, travertines and allied carbonate deposits. *Progress in Physical Geography*, 1990, N° 14, p.19-41.
- WEIJEMARS, R., MULDER-BLANKEN, C.W. and WIEGERS, J. Grown rate observations from the mossbuilt Checa travertine terrace, Central Spain. *Geology Magazine*, 1986, N° 123, p. 279-286.

WEISROCK, A. "Variations climatiques et périodes de sédimentation carbonatée à l'Holocène. L'âge des depots". *Méditerranée*, 1986, N° 1-2, p. 165-173.

ZAK, K., LOZEK, V., KADLEC, J., HLADIKOVA, J. and CILEK, V. Climate-induced changes in Holocene calcareous tufa formations, Bohemian Karst. Czech Republic. *Quaternary International*, 2002, N° 91, p.137-152.

ZANG, J.L., WANG, H.J., LI, D., ZHAO, D.M. An analysis of travertine landscape degradation in Huanglong Ravine of Sichuan,

a world's heritage site and its causes and protection countermeasures. *Acta Geoscience Sinica*, 2012, N° 1, p. 111-120.

ZHANG, D.D., ZHANG, Y., ZHU, A. and CHENG, X. Physical mechanisms of river waterfall tufa (travertine) formation. *Journal of Sedimentary Research*, 2001, N° 71 (1), p.205-216.