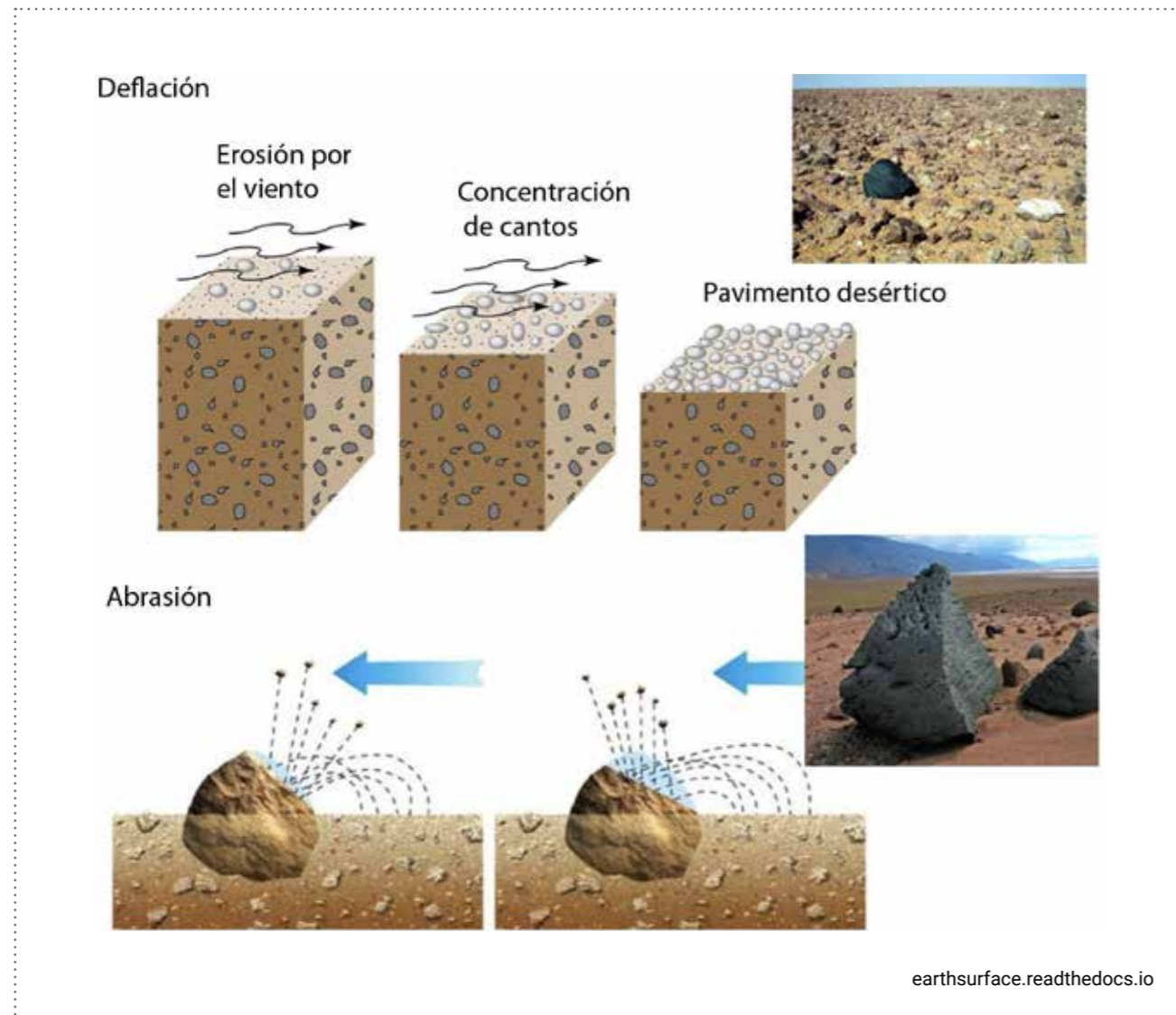




Cuando en el valle del Ebro había dunas eólicas

“Las dunas eólicas son acumulaciones, principalmente de arena y limo, que el viento ha transportado previamente y cuya sedimentación da lugar a depósitos de diferentes formas y tamaños.”

M^a Aránzazu Luzón,
Antonio Pérez y
M^a Asunción Soriano



Los agentes externos modifican la superficie de la Tierra modelándola constantemente. Los más importantes son el hielo, el agua y el viento. Este último es el agente más débil, ya que su menor densidad y viscosidad le permite tan solo movilizar partículas de pequeño tamaño. Si existe humedad, y especialmente si se desarrolla vegetación, se dificulta sobremanera su acción. Por ello, el viento cobra mayor relevancia en aquellas zonas con características áridas independientemente de la temperatura, es decir, es importante tanto en ambientes cálidos (indudablemente los más conocidos) como fríos (sobre todo en áreas cercanas a zonas glaciares). Además, su actividad también es notable en zonas litorales. El origen de

“La actividad del viento causa la erosión, transporte y sedimentación de partículas. Produce deflación y abrasión.”

◀ Cuando un sedimento está formado por partículas de diferente tamaño (arena y grava) el viento puede transportar hacia otras zonas los granos de arena, dejando los cantos de grava acumulados y dando lugar a un sustrato pedregoso o pavimento desértico. Este proceso recibe el nombre de deflación. La abrasión se produce por el impacto de partículas transportadas por el viento sobre la superficie de una roca, provocando su desgaste y generando superficies pulidas en los cantos que se denominan ventifactos.

ción y por último suspensión. Uno u otro tipo dependerá, sobre todo, del tamaño de las partículas, transportándose las de mayor tamaño por tracción y las de menor en suspensión. Cuando disminuye la energía del viento y pierde su capacidad de transporte, se produce la sedimentación de los materiales que estaban en su seno.

Como resultado de la acción del viento se generan diferentes modelados, tanto erosivos como de acumulación, que pueden tener distinta escala. Entre los primeros destacan los ventifactos, pavimentos desérticos, yardangs y depresiones de deflación. Entre los segundos los *ripples* (rizaduras), las dunas (sin ninguna duda las más conocidas) y el loess. Los ripples tienen tamaño centimétrico mientras que las dunas alcanzan escalas incluso hectométricas y ambos suelen estar integrados por partículas de tamaño arena. En el caso de los loess, son arcillas y limos que han sido transportados durante grandes distancias y que recubren modelados preexistentes.

estas áreas con características áridas está condicionado por: la circulación global atmosférica (son las más extensas), el efecto sombra ejercido por cordilleras, la baja temperatura del agua del mar en zonas costeras y, finalmente, la lejanía del interior de zonas continentales con respecto al mar. Es por tanto en estas zonas donde la acción del viento tiene una mayor importancia.

Las formas generadas por el viento reciben el nombre de eólicas. El vocablo deriva del término griego Aíolos (referido a Eolo, dios de los vientos) que en latín derivó a Aeolicus y finalmente al castellano como eólico. Por tanto, este adjetivo se refiere a todo aquello vinculado al viento: corriente de aire que se genera de forma natural en la atmósfera debido a factores como las diferencias de temperatura o de presión.

La actividad del viento causa la erosión, transporte y sedimentación de partículas. Produce deflación (eliminación de material suelto superficial y de pequeño tamaño) y abrasión (desgaste por fricción). Las partículas se transportan de distintas formas, pudiendo ser el transporte por: tracción (rodadura y reptación), salta-

De todos los modelados eólicos mencionados, son sin ninguna duda las dunas las más conocidas, incluso se consideran las formas más representativas de los ambientes áridos. Han sido objeto de estudio desde finales del siglo XIX, siendo más abundantes los trabajos desde la primera mitad del siglo XX por parte de sedimentólogos



Imagen por Antonio Pérez.



Frantisek Staud. wwwphototravelsnet

Arriba: dunas del desierto del Sahara en la región de Merzouga. Las dunas que presentan las crestas puntiagudas son dunas de tipo barján. En el primer plano de la fotografía se observan dunas de crestas redondeadas debido al efecto cambiante en la dirección del viento.

Abajo: campo de dunas barjanoides e interdunas. Después de una tormenta en el desierto, el agua erosiona partes de las dunas dejando amplios espacios, temporalmente inundados, entre las dunas. Si el agua se mantiene durante cierto tiempo se generan pequeños lagos.

y geomorfólogos (Bagnold, 1941; Moiola y Spencer, 1979; Kocurek, 1996; Mountney, 2006; Pye y Tsar, 2009; Lancaster, 2009; Bristow y Mountney, 2013; Lancaster y Mountney, 2020). Curiosamente, tan solo el 25-30% de la superficie total de las zonas desérticas está integrada por arena, el resto son rocas, materiales detríticos gruesos, muy finos e incluso sedimentos fluviales. A nivel mundial las mayores extensiones arenosas se encuentran en el Sahara, Arabia, Asia central, Australia y, aunque menores, en zonas del oeste de Norte América, Sudamérica y Sur de África. Se localizan en latitudes tanto cálidas como frías. Pero las dunas no son formas exclusivas de la Tierra y, a pesar de que fuera de nuestro planeta las más estudiadas son las de Marte (Bridges y Ehlmann, 2017; Lapôtre y Rampe, 2018; Lapotre et al., 2021), Venus, la

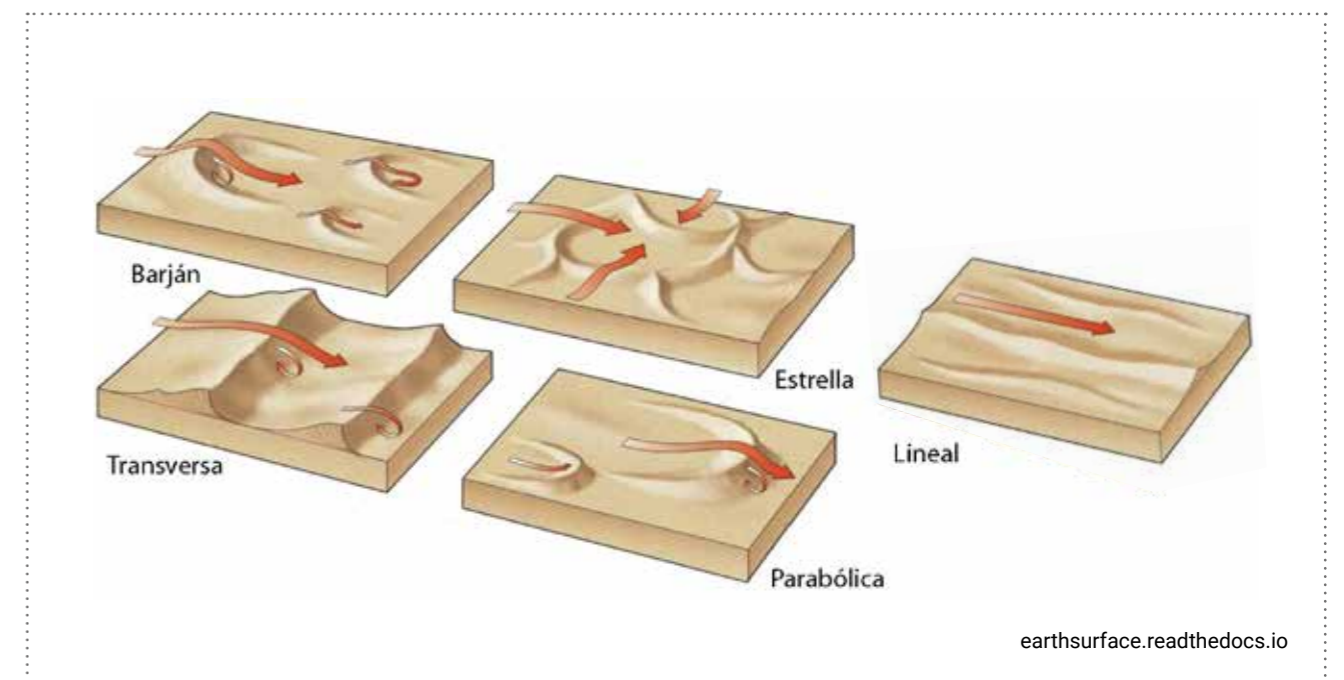
luna de Saturno o Titán tienen dunas como resultado de la existencia de una atmósfera y de disponibilidad de partículas tamaño arena. En cambio, es a través de los estudios geomorfológicos y sedimentológicos llevados a cabo en la Tierra a partir de los que se pueden interpretar los procesos externos y ambientes de sedimentación que se han desarrollado en otros cuerpos celestes.

**DUNAS EÓLICAS:
MORFOLOGÍA Y ESTRUCTURA INTERNA**

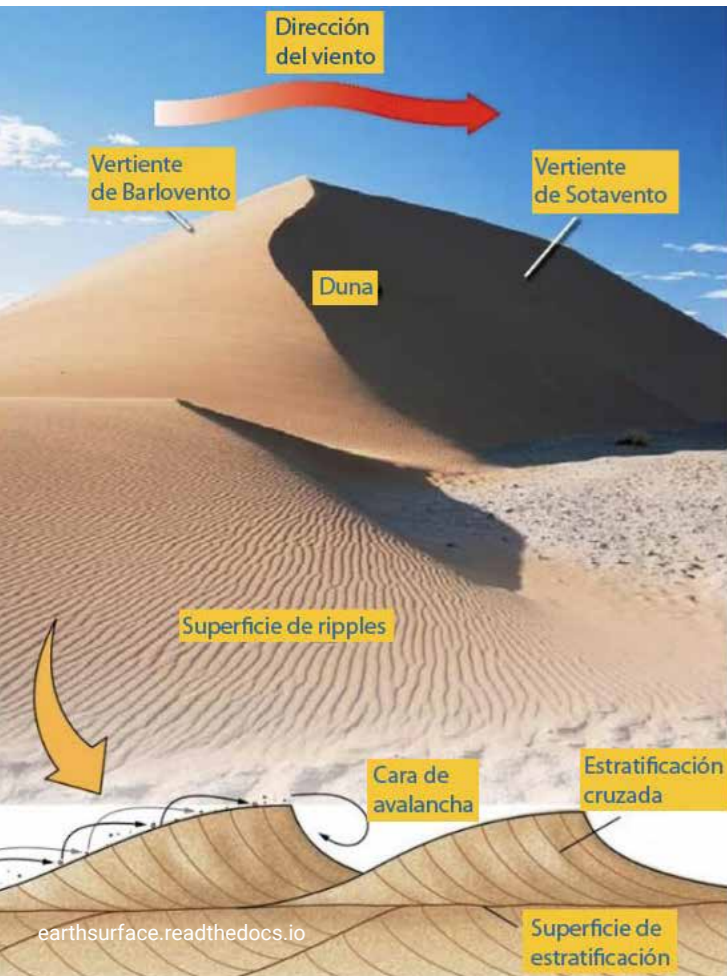
Ya se ha indicado que las dunas eólicas son acumulaciones, principalmente de arena y limo, que el viento ha transportado previamente y cuya sedimentación da lugar a depósitos de diferentes formas y tamaños. La morfología tridimensional de las dunas es variada y relativamente compleja. Depende de factores tales como la dirección y velocidad del viento, la disponibilidad de arena, la humedad y la presencia de vegetación. Las dunas pueden aparecer aisladas o agrupadas formando campos de dunas cuya extensión varía desde decenas de metros a centenas de kilómetros de longitud y alcanzan hasta decenas de kilómetros de anchura. En función de su morfología, las dunas reciben diferentes nombres. En la imagen se representan los tipos más frecuentes. Una de las dunas más sencillas son los barjanes que se forman bajo la acción de vientos unidireccionales y en condiciones de poca disponibilidad de arena. Su altura oscila entre 3 y 10 metros.

Las dunas lineales tienen grandes dimensiones (de 2 a 35 metros de altura), se desarrollan con vientos bidireccionales y elevada disponibilidad de arena. Las dunas en estrella alcanzan incluso 400 metros de altura y se forman con vientos multidireccionales y con gran disponibilidad de arena. En el caso de las dunas parabólicas es necesaria la presencia de obstáculos para su formación y, cuando la deflación es muy importante, se produce un alargamiento de los brazos de la duna, lo que le confiere un aspecto muy característico.

Diferentes tipos de dunas eólicas. La forma depende de la cantidad de arena disponible y de la energía y cambios en la dirección del viento.



earthsurface.readthedocs.io



Partes de una duna con las vertientes de barlovento y sotavento separadas por la cresta de la duna. La vertiente de barlovento se encuentra en el sentido contrario a la dirección del viento, y la de sotavento se inclina en el mismo sentido que la dirección del viento. Sobre la superficie de la duna se pueden desarrollar pequeños ripples que se disponen transversos a la dirección de la duna. En la parte inferior de la imagen se observa la estratificación cruzada característica de la estructura interna de las dunas. Viene dada por la superposición de láminas inclinadas en el sentido del desplazamiento del viento. Son el producto de la caída por avalancha de los granos que llegan a la cresta, transportados por el viento sobre la vertiente de barlovento. Sobre esta superficie se ha reflejado el modo de transporte (saltación) de los granos de arena.

Las dunas son formas fácilmente erosionables puesto que su capacidad de retención de agua es muy baja, dando lugar a una escasa cohesión entre partículas. En esas condiciones, si el viento es lo suficientemente fuerte, se inicia el transporte de arena y, debido a los constantes cambios en la velocidad y dirección de viento, las dunas están en continuo movimiento, superponiéndose y erosionando unas a otras, de manera que normalmente se conservan solo partes de dunas separadas por superficies de erosión. A pesar de su elevada erosionabilidad, pueden preservarse en el registro geológico si las condiciones son favorables, aunque raramente se encuentran completas. Su estudio e interpretación requiere de metodologías de trabajo propias de la Geología. Para poder comprender qué rocas sedimentarias antiguas se originaron por la acción del viento, debemos conocer cómo actúan los procesos sedimentarios eólicos y cuáles son la geometría y la estructura interna de los depósitos generados por estos procesos.

En general, los campos de dunas presentan una morfología particular con irregularidades de varios metros de altura definidas por altos (dunas propiamente dichas) y depresiones (interdunas). Considerando una duna individual, se pueden diferenciar dos partes separadas por la cresta de la duna: vertientes de barlovento y sotavento. La primera es una zona inclinada con pendiente suave en sentido contrario a la dirección del viento y el sotavento es la parte con fuerte inclinación en la dirección del viento. La cresta de la duna se dispone perpendicular a la dirección del viento.

Las partículas de tamaño menor de 50 micras se ponen en movimiento con velocidades bajas del viento (>60cm/s). Los tamaños inferiores a 20 micras se consideran polvo eólico (loess) y son transportados en suspensión, al igual que las partículas de tamaños entre 20 y 50 micras, que equivalen a la fracción limo fino. Las partículas de 50 micras a 2 milímetros (limo grueso y arena) se transportan predominantemente por saltación, las mayores a 2 milímetros por reptación (*creeping*) y si son superiores a este tamaño por el impacto de otras partículas. Las arenas transportadas por el viento presentan unos granos de tamaño muy uniforme, es lo que se llama sedimento muy bien clasificado. Las dunas están formadas casi exclusivamente por granos de arena cuyo movimiento es por saltación, de manera que un grano golpea a otro más grueso, no movable. El grano que golpea apenas pierde momento cinético y sigue saltando. El grano golpeado, que no puede saltar, es empujado y se desliza horizontalmente originando

Diferentes aspectos de la estructura interna de una duna.

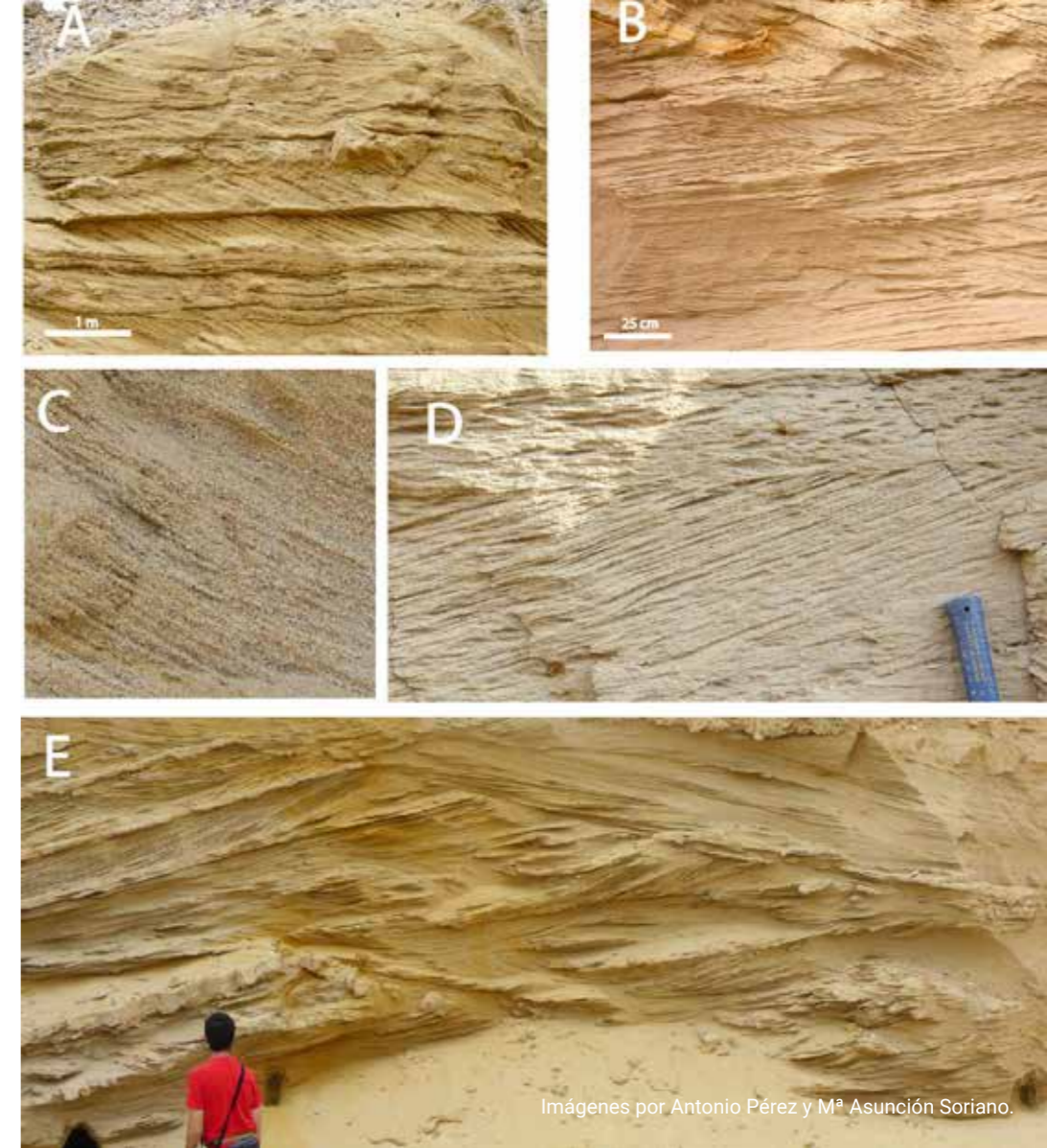
A: unidades de estratificación cruzada con láminas inclinadas en el mismo sentido, que es el de la dirección del viento.

B: estratificación cruzada en la parte inferior de la imagen y laminación cruzada y formas de ripples asimétricos en la parte superior.

C: organización interna de los granos de arena que componen las diferentes láminas.

D: estratificación y laminación cruzada. Se observan formas de megaripples asimétricos así como ripples asimétricos dando lugar a crenulaciones en algunas láminas.

E: estratificación cruzada de gran escala con láminas inclinadas en diferentes sentidos. Las fotografías han sido tomadas en diferentes graveras de extracción de áridos.



Imágenes por Antonio Pérez y M^a Asunción Soriano.

una superficie de deslizamiento continua. Si el grano que llega golpea a uno más pequeño, disipa su energía lanzando este al aire, que sigue el mismo proceso. Para una determinada fuerza del viento se produce un recorrido característico en saltos. En relación con las dunas, estos granos de arena se mueven sobre la vertiente de barlovento, constituyendo lo que se llama carga de fondo. Cuando llegan a la parte más alta o cresta se acumulan. Cuando esta acumulación se hace inestable, los granos caen por el sotavento en forma de avalancha generando un flujo de masas llamado *grainflow*, formando una lámina de granos inclinada en el sentido de la corriente. El sumatorio de láminas inclinadas generadas por ese proceso da lugar a la típica estructura interna de las dunas, la estratificación cruzada, cuyo reconocimiento es muy interesante ya que nos informa sobre la dirección y sentido del viento que ha generado la duna. Un conjunto de partículas, las más finas, pasan a permanecer en suspensión cuando superan la cresta de la duna y caen por su propio peso según un

proceso llamado caída de granos o *grainfall*. Las láminas de estratificación cruzada presentan una organización granocreciente debida a las avalanchas de granos de arena que en su caída van chocando unos contra otros generando un efecto de presión dispersiva, entendiéndose como tal el esfuerzo ascensional debido al efecto de rebote. De esta manera los granos al chocar generan una fuerza que es mayor cuanto más grande es el grano, y esta fuerza provoca que se desplacen hacia arriba, quedando los granos más pequeños hacia la base de la lámina de estratificación cruzada. A su vez, sobre la vertiente de barlovento cuando las condiciones del viento son poco energéticas, o hay mucho suministro de arena, pueden desarrollarse pequeñas formas onduladas, llamadas *ripples*, que dan lugar a láminas onduladas o crenulaciones sobre el techo de la duna. Estas formas también pueden generarse en su parte más baja o migrar a sotavento de la duna y dan lugar a la estructura interna conocida como laminación cruzada.

Para que una duna presente estratificación cruzada la vertiente de barlovento debe tener de 10-15° de inclinación y la de sotavento unos 33°, produciéndose la separación de granos transportados por las corrientes eólicas y el desarrollo de procesos de *grainflow* y *grainfall*. Si la pendiente es menor no se desarrollan estos procesos y los pequeños *ripples* transversos a la dirección de las dunas migran dando lugar a ondulaciones o crenulaciones y laminación cruzada. En este último caso la cresta de la duna es redondeada. Debido a que los vientos cambian fácilmente de dirección, funcionan simultáneamente condiciones de flujo transverso, oblicuo y longitudinal dando lugar a láminas inclinadas en múltiples direcciones. Asimismo, las condiciones de humedad o la fuerza

del viento son variables, y la capacidad de erosión de las dunas cambiante. Todo esto se traduce en estructuras internas complejas definidas por múltiples unidades de estratificación cruzada separadas por superficies de erosión y reactivación (ver imagen de la página anterior). A partir de todo ello, aspectos como la estructura interna de las unidades de sedimentación, su geometría, la medida de paleocorrientes deducidas de la dirección y del sentido de inclinación de las láminas de arena, y el tamaño de grano específico de las arenas que componen las dunas, pueden ayudar a establecer que nos encontramos ante depósitos generados en un ambiente desértico, dominado por la acción de procesos eólicos.

EL PAISAJE DEL ENTORNO DE ZARAGOZA DURANTE EL PLEISTOCENO

Las cuencas de sedimentación son zonas deprimidas de la corteza terrestre de origen, en su mayoría, tectónico, que a lo largo de miles a millones de años se rellenan con sedimentos. Zaragoza se encuentra en la Cuenca del Ebro, que durante el Mioceno, periodo que comienza hace unos 23 millones de años, no tenía comunicación con el mar, es decir, era endorreica. Durante muchos millones de años se depositaron en ella diversos tipos de sedimentos, detríticos cerca de los márgenes (que dieron lugar a conglomerados y areniscas) y de precipitación química en el centro, incluidas abundantes evaporitas (dominantemente yeso, pero también otras sales como la halita que se explota en las minas de Remolinos, o glauberita). Ello es resultado de la configuración paleogeográfica en aquel momento, con sistemas aluviales procedentes del Pirineo y de la Cordillera Ibérica, que ya estaban configurados como los márgenes de la cuenca tal como los conocemos actualmente, y sistemas lacustres con aguas químicamente muy concentradas en la zona central. Desde entonces estos materiales no se han visto afectados por deformaciones tectónicas importantes, por lo que se encuentran subhorizontales o con buzamientos muy suaves. En la segunda mitad del Mioceno se produce la apertura de la Cuenca del Ebro hacia el mar Mediterráneo y se desarrolla un régimen exorreico. Se instala y encaja progresivamente la red fluvial asociada al río Ebro, que evacúa agua y sedimentos hacia el Mediterráneo, provocando una erosión remontante y el vaciado parcial de la cuenca. A partir de ese momento la alternancia de distintas etapas de erosión/depósito, muy vinculadas a cambios en el clima pero también a otros factores geológicos, dan lugar a la arquitectura estratigráfica que actualmente encontramos en los depósitos del entorno de Zaragoza.

Los estudios sedimentológicos, llevados a cabo por investigadores del grupo Geotransfer durante los últimos años en frentes de cantera en esta zona, han puesto de manifiesto que durante el Pleistoceno, al menos desde 750.000 años atrás, el paisaje era muy diferente al desarrollado en el Mioceno (Luzón et al., 2012), pero también al actual. El resultado del paso a condiciones exorreicas arriba mencionado supuso un importante cambio geográfico, desapareciendo de la zona central de la Cuenca del Ebro los grandes lagos que se habían desarrollado durante etapas anteriores. Por otro lado, tras el periodo Plioceno (entre aproximadamente 5 y 2.5 m.a.), de características más cálidas, el Pleistoceno supuso un cambio a condiciones frías, con desarrollo de glaciares en el hemisferio norte a muy bajas latitudes. En este contexto, sobre el sustrato evaporítico mioceno, se construyeron amplias llanuras aluviales donde se depositaron materiales detríticos bajo la acción del agua y el viento.

En la actualidad, el río Ebro responde al modelo fluvial meandriforme, con un único curso de elevada sinuosidad, desarrollo de barras de meandro y una importante llanura de inundación arcillosa con meandros abandonados (galachos). En cambio, los depósitos más antiguos evidencian que durante el Pleistoceno el sistema fluvial fue distinto, existiendo múltiples canales muy someros individualizados por barras de gravas longitudinales de hasta varios metros de altura, es decir respondía a un modelo fluvial tipo entrelazado o *braided*.

“Las cuencas de sedimentación son zonas deprimidas de la corteza terrestre de origen, en su mayoría, tectónico, que a lo largo de miles a millones de años se rellenan con sedimentos.”

Ambientes sedimentarios en el entorno de Zaragoza durante el periodo Pleistoceno. El equivalente al río Ebro (fluyendo de NW a SE) tendría múltiples canales con elevada cantidad de agua. A su llanura aluvial llegarían de forma esporádica aportes de abanicos aluviales procedentes de los relieves próximos (La Muela y La Plana de Zaragoza). Dunas eólicas y pequeños lagos propios de áreas de interdunas o relacionados con dolinas, completarían el paisaje de ese momento.

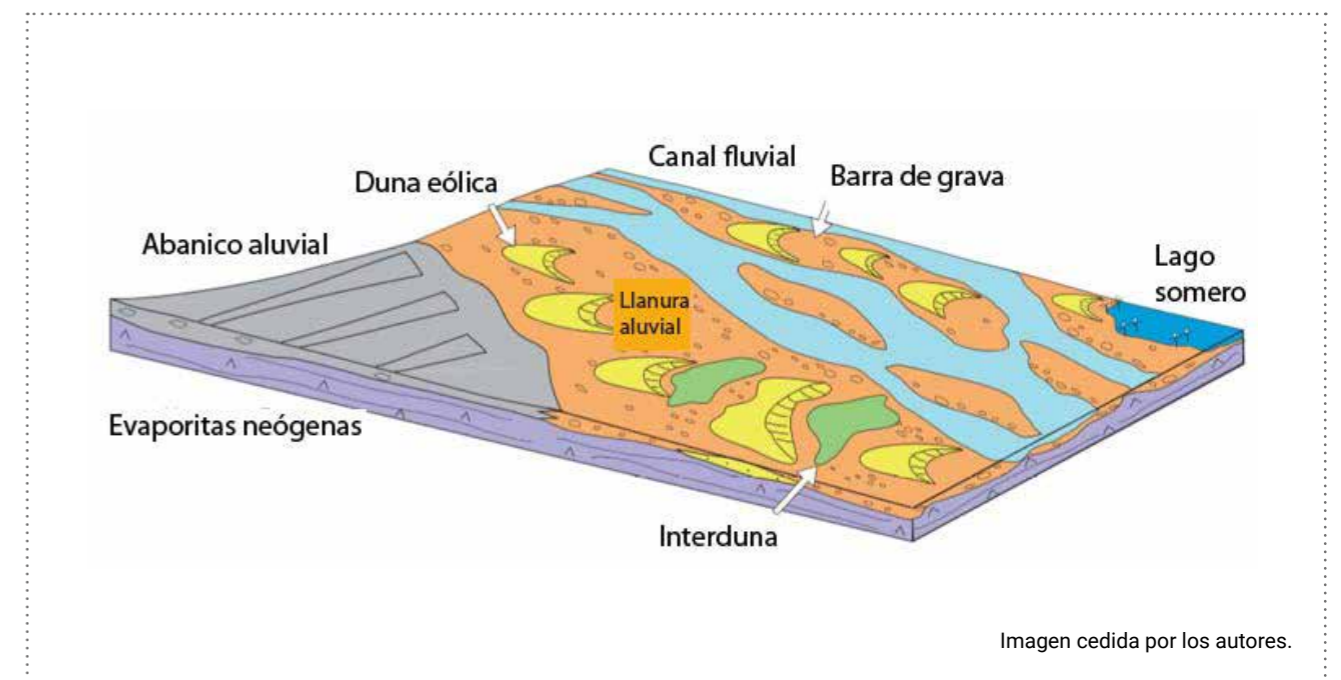


Imagen cedida por los autores.

“Para que una duna presente estratificación cruzada la vertiente de barlovento debe tener de 10-15° de inclinación y la de sotavento unos 33°.”

Ello se relaciona con una situación de elevada disponibilidad de agua, procedente del deshielo de los glaciares que existieron en las montañas circundantes, especialmente en el Pirineo.

En episodios de avenida, los cursos acuosos transportan importantes cantidades de material detrítico grueso desde las montañas circundantes. En momentos de estiaje y menor energía, gravas y arenas se acumulan generando barras predominantemente longitudinales y rellenos de canales, depósitos típicos de cauces activos. Cuando estos canales se colmatan de sedimentos, se produce el desplazamiento de la corriente activa a un lugar próximo, deprimido, donde continúa el proceso de transporte y sedimentación. La continuidad de esta dinámica a lo largo de decenas, centenas de miles de años, dio lugar en el entorno de Zaragoza a la formación de una amplia llanura aluvial. En algunas zonas se reconocen depósitos de gravas y arenas de cantos de grandes dimensiones y muy mal clasificados que señalan que, además de los cursos fluviales precursores del actual río Ebro y sus afluentes, existieron sistemas aluviales perpendiculares a los cursos principales. Estos se caracterizan por cursos acuosos muy esporádicos que transportaban materiales desde relieves como La Plana o La Muela, sufriendo un escaso transporte (ver imagen de la página anterior).

Las características de los sedimentos más finos (dominantemente arenas) que forman cuerpos de tamaño de grano muy homogéneo, de hasta varios metros de

espesor, intercalados entre las gravas fluviales y aluviales en esta zona, reflejan que en algunos momentos importantes extensiones de la llanura aluvial estuvieron cubiertas por campos de dunas de arena de hasta más de 10 metros de altura. Se desarrollaron de forma recurrente en relación con las fases áridas y frías. Bajo estas condiciones, el viento, además del agua, juega un papel importante en los procesos de erosión, transporte y sedimentación. Las zonas de la llanura aluvial, expuestas en momentos de menor disponibilidad de agua, contenían grandes cantidades de arena y la acción del

Corte de gravera realizado en Arcosur (Sur de Zaragoza). Se observan gravas con estratificación cruzada en surco y evolución granodecreciente propias del relleno de los canales fluviales entrelazados que existían durante el Pleistoceno.



Imagen por Aránzazu Luzón

Registro de dunas de arena entre gravas fluviales de edad Pleistoceno. Canteras próximas a las localidades de Rodén y Figueruelas.



Imagen por Aránzazu Luzón.

viento favoreció su movimiento y depósito posterior en zonas próximas, instalándose sobre esta llanura campos de dunas eólicas barjanoides. Las condiciones de viento, similares o incluso con rachas más fuertes que en la actualidad, construyeron estas grandes formas arenosas que migraban hacia el Este, coincidiendo prácticamente con la dirección del Cierzo actual. Los estudios geomorfológicos y sedimentológicos realizados han permitido establecer que los campos de dunas se situaban en una región comprendida, al menos, entre Pedrola, al noroeste, y Fuentes de Ebro, al sureste.

“El viento, además del agua, juega un papel importante en los procesos de erosión, transporte y sedimentación.”



A: Detalle de la estructura interna de una duna donde se observan las láminas de estratificación cruzada y superficies de reactivación. Cantera próxima a la localidad de Figueruelas.

B: Arenas eólicas organizadas en varias unidades de estratificación cruzada separadas por superficies de erosión o reactivación. Cantera próxima a la localidad de Figueruelas.

C: Unidades de estratificación cruzada de espesor métrico separadas por superficies de reactivación. El espesor de las unidades da idea de las dimensiones que debieron tener las dunas desarrolladas en el sector central de la Cuenca del Ebro. Cantera próxima a la localidad de Figueruelas.

D: Depósitos eólicos de geometría tabular (sand-sheet). Internamente presentan laminación paralela o estratificación cruzada de bajo ángulo de inclinación de las láminas. La parte superior muestra decoloraciones que sugieren la colonización de esta forma por vegetación. Foto tomada en Arcosur.

E: Depósitos de flujos de masas. Cuando los canales fluviales desbordan y alcanzan los campos de dunas, las arenas son erosionadas y se mezclan los sedimentos dando lugar a depósitos heterométricos canalizados que aparecen conservados entre las arenas eólicas. En este caso el depósito tiene forma de canal y erosiona una unidad de estratificación cruzada correspondiente a una duna eólica.

Las dunas pueden conservar su forma externa, con las vertientes de barlovento y sotavento, así como su estratificación cruzada interna característica, si bien lo más habitual es que su parte superior se encuentre erosionada. También se conservan pequeñas ondulaciones o crenulaciones (ripples y su laminación interna asociada) que migrarían sobre las dunas o al pie de estas. Más raros son los depósitos de geometría tabular (sand sheets). Localmente, se formaron en las zonas entre las dunas (interdunas) pequeñas lagunas de dimensiones muy modestas, a veces con acumulación de agua durante largos periodos. Sistemas fluviales, aluviales y eólicos interaccionaron a lo largo de varios cientos de miles de años en la zona central de la Cuenca del Ebro y sus depósitos han quedado registrados, posibilitando su estudio y extraer hoy en día estas conclusiones.

A pesar de que el Pleistoceno fue un periodo frío, alternaron periodos glaciares e interglaciares (más cálidos), controlando la dinámica de estos sistemas a través de modificaciones en la descarga de agua y de sedimentos. Cuando los ríos se encuentran en fase de avenida, en momentos de mayor disponibilidad de agua, el cauce principal a menudo se desborda y el agua cubre la llanura de inundación. En esta situación, los campos de dunas serían alcanzados por las corrientes acuosas, destruyéndose estas formas arenosas no consolidadas y generándose flujos de agua muy cargados en sedimentos. Cuando disminuyó su energía, el rápido depósito de una mezcla de arena con cantos de grava formó cuerpos granulométricamente heterogéneos. En una fase posterior, estos depósitos quedaron emergidos y se vieron sometidos de nuevo a la acción del viento, los granos de arena fueron transportados, quedando solo los materiales que este no puede arrastrar, los cantos, formando niveles de poco espesor. Finalmente,

“Las dunas pueden conservar su forma externa, con las vertientes de barlovento y sotavento, si bien lo más habitual es que su parte superior se encuentre erosionada.”



Imagen por Aránzazu Luzón

▲
Alternancia de arenas eólicas con estratificación cruzada y depósitos de arcillas y limos laminados de color ocre y rojizo característicos de las áreas de interdunas. Cantera próxima a la localidad de Figueruelas.

las interdunas, zonas deprimidas entre las dunas, pudieron ser secas o húmedas. En estas últimas el agua puede acumularse unos pocos días, si la evaporación es intensa, o mantenerse durante largos periodos de tiempo a modo de pequeñas lagunas en las que se depositan los materiales más finos por decantación.

LA DISOLUCIÓN DE LOS YESOS CONSERVÓ LAS DUNAS

Las diferentes etapas de sedimentación y erosión afectaron a los ríos provocando el abandono de los cauces y las llanuras de inundación. Desde que se inicia la conexión con el mar Mediterráneo la incisión del río Ebro produce el abandono de la antigua llanura aluvial que queda a una cota superior a la del nuevo cauce. Este proceso da lugar a sucesivos niveles escalonados de terrazas fluviales que recubren a los yesos miocenos en extensas áreas en las proximidades de Zaragoza. En el sector central del valle del Ebro, Gil (2017) identifica diez niveles de terrazas cuyas alturas oscilan entre 3 y 220 m sobre el nivel actual del río, encontrándose los más antiguos (los situados a mayor cota) muy erosionados.

“El sector central de la Cuenca del Ebro es un área propicia para el desarrollo de procesos kársticos como consecuencia de la importante disolución que se produce en los yesos.”

Tal como ha sido puesto de manifiesto por Soriano y Simón (1995; 2002) y Gutiérrez et al. (2011), entre otros trabajos, el sector central de la Cuenca del Ebro, y en particular la ciudad de Zaragoza y su entorno, es un área propicia para el desarrollo de procesos kársticos como consecuencia de la importante disolución que se produce en los yesos. Las gravas y arenas fluviales y eólicas que integran los niveles de terrazas del río Ebro permiten el paso del agua hacia los materiales solubles (yesos y sales) infrayacentes lo que causa el desarrollo de galerías y cavidades cuya propagación hacia la superficie da lugar a la generación de numerosas dolinas que en la actualidad constituyen un riesgo geológico importante que provoca considerables pérdidas económicas.

En el pasado, a lo largo del Pleistoceno, también se produjeron procesos de karstificación. Son numerosos los ejemplos de paleodolinas que se observan en los taludes de canteras y obras lineales de este sector del valle del Ebro donde los materiales tienen numerosas deformaciones y basculamientos (Gil et al., 2013; Simón et al., 2014; Soriano et al., 2012; 2019).

Además, la subsidencia kárstica contemporánea a la sedimentación (sinsedimentaria), producida por la disolución de los yesos y otras sales ha favorecido una gran acumulación de materiales fluviales y eólicos generando series sedimentarias de varias decenas de metros de espesor (Benito et al., 1998; Luzón et al. 2008; Gil et

“Las diferentes etapas de sedimentación y erosión afectaron a los ríos provocando el abandono de los cauces y las llanuras de inundación.”

Durante el Cuaternario, la disolución de los yesos y sales del sustrato de la Cuenca del Ebro generó dolinas que no son activas hoy día (paleodolinas). En los casos mostrados en estas fotos no se ve el contacto con ese sustrato, pero es evidente la intensa deformación de los materiales, con basculamientos, engrosamientos, pliegues y fallas afectando a las capas, todo ello como consecuencia de la karstificación. En el ejemplo de la foto inferior derecha, el colapso favoreció la generación de una pequeña charca donde se acumularon depósitos de grano muy fino (limos y arcillas) que se han conservado gracias a ese hundimiento. Ambos ejemplos se localizan próximos a Zuera.



Imagen por Antonio Pérez y M^a Asunción Soriano.

al., 2013) en un solo nivel de terraza, que en otras condiciones, sin subsidencia debida al karst, no superarían la decena de metros de espesor. La actuación sin-sedimentaria de estas dolinas queda evidenciada por el desarrollo de ciertas estructuras de deformación como las discordancias progresivas que se desarrollan en sus márgenes (Luzón et al., 2008, 2012; Simón et al., 2014).

A pesar de que, como se ha expuesto con anterioridad, los depósitos eólicos son fácilmente erosionables por agentes geológicos como el viento y el agua,

sus posibilidades de preservación aumentan cuando los materiales acumulados quedan de manera rápida por debajo del nivel de erosión (Kocurek y Havholm, 2006). Esto ocurre, por ejemplo, en zonas de elevada subsidencia, donde el espacio potencial para la acumulación aumenta progresivamente y los materiales quedan localizados de forma rápida bajo el límite de erosión. Un escenario típico sería el de zonas de tectónica extensional activa donde las fallas generan depocentros (zonas de acumulación preferencial de materiales) subsidentes. En cambio, la particularidad del

“La actuación sinsedimentaria de estas dolinas queda evidenciada por el desarrollo de ciertas estructuras de deformación progresivas que se desarrollan en sus márgenes.”

BIBLIOGRAFÍA

- Bagnold R.A. (1941). The physics of blown sand and desert dunes. London. Methuen.
- Benito, G; Pérez-González A., Gutiérrez-Santolalla F. y Machado M.J. (1998). River response to Quaternary subsidence due to evaporite solution (Gállego River, Ebro Basin, Spain) *Geomorphology*, 22: 243-263.
- Bridges N.T. y Ehlmann B.L. (2017). The Mars Science Laboratory (MSL) Bagnold Dunes campaign, Phase I: Overview and introduction to the special issue, *J. Geophys. Res. Planets*, 122.
- Bristow C., and Mountney N.P. (2013). Aeolian Stratigraphy. In: John F. Shroder (ed.) *Treatise on Geomorphology*, Volume 11, pp. 246-268. San Diego: Academic Press.
- Gil H. (2017). *Los depósitos cuaternarios en el sector central de la Cuenca del Ebro: Arquitectura estratigráfica, paleokarst, su interacción con la sedimentación y cronología*. Tesis doctoral 354 p. Universidad de Zaragoza.
- Gil H., Luzón M. A., Soriano M. A., Casado I., Pérez A., Pueyo E. y Pocióvi A. (2013). Stratigraphic architecture of interfering alluvial-aeolian systems developed on active karst terrains: an Early Pleistocene example in the Ebro basin (NE Spain). *Sedimentary Geology*, 296: 122-141.
- Gutiérrez F., Galve J.P., Lucha P., Castañeda C., Bonachea J., Guerrero J. (2011). Integrating geomorphological mapping, trenching, InSAR and GPR for the identification and characterization of sinkholes in the matled evaporite karst of the Ebro Valley (NE Spain). *Geomorphology*, 134: 144-156.
- Kocurek G. (1996). Desert Aeolian systems. En H.G. Reading (Ed.), *Sedimentary Environment: Processes, Facies and Stratigraphy*. Blackwell Science, Oxford (1996): 125-153.
- Lancaster N. (2009). Dune morphology and dynamics. En A.J. Parsons y A.D. Abrahams (Eds.) *Geomorphology of desert environments* (2ª edición) Springer: 557-595.
- Lancaster N., Mountney N.P. (2020). Earth Surface Processes and Sediments: Eolian Processes and Sediments, Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Elsevier.
- Lapôtre M. A., y Rampe E. B. (2018). Curiosity's investigation of the Bagnold Dunes, Gale crater: Overview of the two-phase scientific campaign and introduction to the special collection. *Geophysical*



Paleodolina de grandes dimensiones en las cercanías de Fuentes de Ebro. Se observa cómo las gravas fluviales están deformadas y fracturadas y en el interior de la dolina hay depósitos de arenas eólicas. Pese a lo fácil que resulta el transporte de las arenas, éstas no fueron erosionadas gracias a la existencia de esta oquedad debida a karstificación, que las mantuvo por debajo del nivel de erosión facilitando su observación en la actualidad.



entorno de Zaragoza radica en que la subsidencia no es de origen tectónico, sino de origen kárstico, siendo en general los depocentros más reducidos. El desarrollo de dolinas y campos de dolinas no solo dio lugar a que estos materiales quedaran preservados, sino que favoreció su acumulación ya que, al llegar a estas zonas deprimidas, el viento sufría una expansión y deceleración de manera que, debido a la pérdida de capacidad de transporte, depositaría los materiales arenosos.

La figura de la derecha muestra cuatro bloques diagrama que ilustran de manera simplificada distintos episodios en relación con el desarrollo de dolinas y el depósito de los materiales que integran alguna de las terrazas del Ebro y cómo la disolución del sustrato favoreció la mayor preservación de materiales localmente. En el ejemplo, tras una etapa de predominio de sedimentación fluvial, con barras y canales en un sistema fluvial entrelazado, una etapa de menor disponibilidad de agua favoreció la génesis de dunas eólicas. La subsidencia continuada, ligada a la karstificación del sustrato que originó dolinas en superficie, dispuso localmente bajo el límite de erosión materiales previamente depositados que en el caso de ser eólicos son más erosionables. Esta subsidencia fue contemporánea al depósito, dando lugar al "engrosamiento" de los depósitos en las zonas de dolinas. El posterior cese de la subsidencia ralentizó el proceso hasta que este cesó, continuando la sedimentación de los materiales que ahora no mostrarían evidencias de deformación sinsedimentaria, y las dolinas fueron fosilizadas.

IMPLICACIONES PALEOAMBIENTALES

El Pleistoceno fue un periodo de descenso en las temperaturas a nivel global, a pesar de ello alternaron etapas más cálidas y más frías. En las zonas montañosas que rodean la Cuenca del Ebro, especialmente en Pirineos, las bajas temperaturas favorecieron el desarrollo de glaciares que en momentos de fusión, al menos parcial, aportarían importantes cantidades de agua y sedimentos hacia la cuenca. En estas condiciones se desarrollaron sistemas fluviales de tipo braided y en los periodos más secos, dunas eólicas en las llanuras de inundación que serían destruidas, al menos parcialmente, en posteriores avenidas. Las peculiaridades del entorno de Zaragoza, con yesos miocenos en el sustrato, da lugar a una importante karstificación contemporánea al depósito y el desarrollo de dolinas favoreciendo la conservación de materiales que, en otras circunstancias, se habrían erosionado impidiendo extraer las conclusiones de tipo paleoambiental presentadas en este trabajo.

M^a Aránzazu Luzón, Antonio Pérez y M^a Asunción Soriano
Dpto. de Ciencias de la Tierra
Facultad de Ciencias
Universidad de Zaragoza

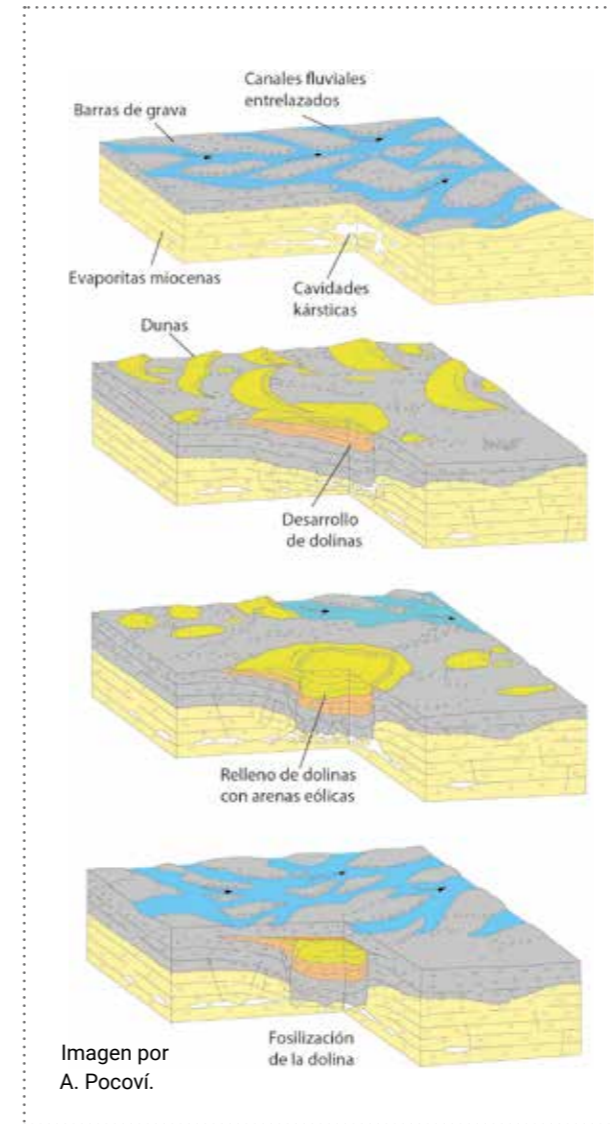
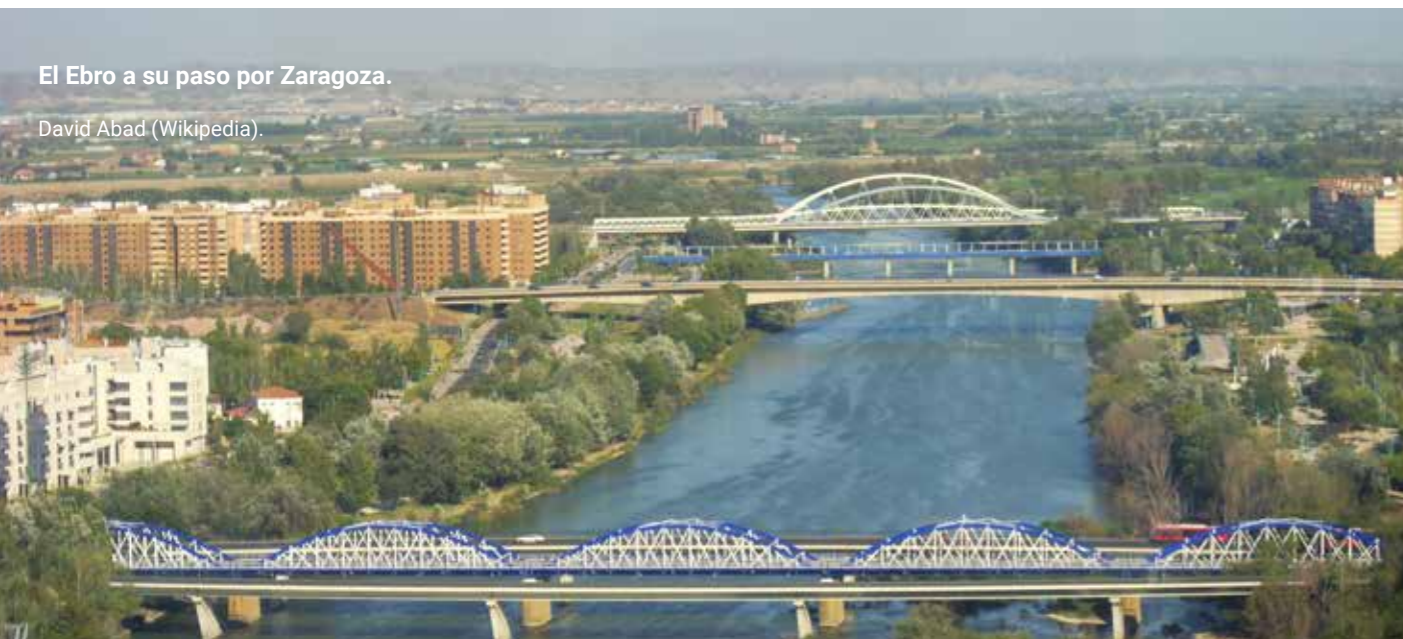


Imagen por A. Pocoví.

Durante los periodos de gran disponibilidad de agua, el curso fluvial del antiguo río Ebro se caracterizó por cursos entrelazados entre los que se disponían gran cantidad de barras constituidas, principalmente, por gravas. En periodos de menor disponibilidad de agua, la acción del viento cobraba mayor importancia y se desarrollaban dunas. Como resultado de la disolución del sustrato se generaron dolinas (actualmente paleodolinas) y en las zonas karstificadas se acumularon y conservaron tanto depósitos fluviales como eólicos o lacustres. Posteriormente, todos ellos quedaron cubiertos por nuevos depósitos fluviales (esta vez sin deformar al haber cesado la disolución del sustrato).

Research Letters, 45.

- Lapôtre M. G. A., Ewing R. C., and Lamb M. P. (2021). An Evolving Understanding of Enigmatic Large Ripples on Mars. *J. Geophys. Res. Planets* 126 (2).
- Luzón A., Pérez A., Soriano M.A., Pocoví, A. (2008). Sedimentary record of Pleistocene paleodoline evolution in the Ebro basin (NE Spain). *Sedimentary Geology* 205, 1-13.
- Luzón M.A.; Rodríguez-López J.P.; Pérez, A.; Soriano M.A.; Gil, H.; Pocoví A. (2012). Karst subsidence as a control on the accumulation and preservation of aeolian deposits: A Pleistocene example from a proglacial outwash setting, Ebro Basin, Spain. *Sedimentology*, 59: 2199-2225.
- Maiola R.J. and Spencer A.B. (1979). Differentiation of eolian deposits by discriminant analysis. En McKee, E. D. (ed), *A study of Global Sand Seas*. U. S. Geol. Survey Prof. Paper 1052: 53-58.
- Mountney N.P. (2006). Periodic accumulation and destruction of Aeolian erg sequences in the Permian Cedar Mesa Sandstone, White Canyon, Southern Utah, USA. *Sedimentology*, 53: 789-823.
- Pye K. y Tsar H. (2009) *Aeolian sand and sand dunes*. 458p. Springer-Verlag, Berlín Heidelberg.
- Simón J. L., Soriano M. A., Pérez A., Luzón A., Pocoví A. y H. Gil. (2014). Interacting tectonic faulting, karst subsidence, diapirism and continental sedimentation in Pleistocene deposits of the central Ebro Basin (Spain). *Geological Magazine*, 151 : 1115-1134.
- Soriano M. A., Luzón A., Pérez A., Yuste A., Pocoví A., Simón J. L. y Gil H. (2012). Quaternary alluvial sinkholes: record of environmental conditions of karst development. Examples from the Ebro basin, Spain. *Journal of Cave and Karst Studies*, 72: 173-185.
- Soriano M.A. y Simón J.L. (1995). Alluvial dolines in the central Ebro Basin, Spain: a spatial and developmental hazard analysis. *Geomorphology*, 11: 295-309.
- Soriano M.A. y Simón J.L. (2002). Subsidence rates and urban damages in alluvial dolines of the Central Ebro basin (NE Spain). *Environmental Geology*, 42: 476-484.
- Soriano M.A., Pocoví A., Gil H., Pérez A., Luzón A. y Marazuela M.A. (2019). Some evolutionary patterns of palaeokarst developed in Pleistocene deposits (Ebro Basin, NE Spain): Improving geohazard awareness in present-day karst. *Geological Journal*, 54: 333-350.



El Ebro a su paso por Zaragoza.

David Abad (Wikipedia).