



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Grado

Procesos de *piping* en las Bardenas Reales.  
Factores condicionantes y mecanismos de  
formación

*Piping processes in Bardenas Reales.  
Conditioning factors and development  
mechanisms*

Autor

Sergio Gavín Murillo

Directora

Gloria Desir Valén

Facultad de Ciencias

Diciembre 2022

## ÍNDICE

<b>Abstract .....</b>	<b>3</b>
<b>1. Planteamiento y objetivos .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Metodología .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1. Búsqueda bibliográfica .....</b>	<b>5</b>
<b>2.2. Trabajo de campo.....</b>	<b>5</b>
<b>2.3. Trabajo de gabinete.....</b>	<b>6</b>
<b>3. Contexto geológico y geomorfológico .....</b>	<b>7</b>
<b>3.1. Marco geográfico .....</b>	<b>7</b>
<b>3.2. Marco geológico.....</b>	<b>8</b>
<b>3.3. Marco geomorfológico.....</b>	<b>10</b>
3.3.1. <i>Modelados y formas geomorfológicas .....</i>	<i>10</i>
3.3.2. <i>Historia geomorfológica.....</i>	<i>11</i>
<b>4. Resultados.....</b>	<b>12</b>
<b>4.1. Procesos de <i>piping</i> y sus principales mecanismos de formación .....</b>	<b>12</b>
<b>4.2. Factores que controlan el desarrollo del <i>piping</i> .....</b>	<b>15</b>
<b>4.3. Caracterización de las propiedades fisico-químicas del suelo.....</b>	<b>17</b>
<b>4.4. Caracterización morfogenética del <i>piping</i> en las Bardenas Reales .....</b>	<b>18</b>
<b>4.5. Evolución temporal del <i>piping</i> en las Bardenas Reales .....</b>	<b>20</b>
<b>5. Discusión de los resultados .....</b>	<b>22</b>
<b>5.1. Factores condicionantes en la formación del <i>piping</i> en las Bardenas ...</b>	<b>22</b>
<b>5.2. Comparación con resultados de estudios previos en las Bardenas .....</b>	<b>23</b>
<b>6. Conclusiones.....</b>	<b>24</b>
<b>7. Agradecimientos .....</b>	<b>25</b>
<b>8. Bibliografía .....</b>	<b>25</b>

## Abstract

Piping processes play a fundamental role in the landscape evolution of badlands. Piping occurs in the Holocene and Miocene sediments of the Bardena Blanca basin. It controls most of the surface and subsurface runoff. Moreover, piping controls rill erosion and gully development causing gully head retreat. Thus, piping is one of the most important processes on landform evolution.

There are different factors controlling piping erosion such as hydraulic gradient or cracks formation linked to clay dispersion. In the study area clay dispersion causes a swelling above 12% and is due to high sodium content, reaching SAR and ESP values above 25 and 30, respectively. Layer thickness and stormy rainfalls are also fundamental factors in piping development. However, a very steep slope, as in the case of tertiary sediments than have slopes steeper than 30°, or a great amount of rainfall, can avoid piping formation.

There are two different piping development mechanisms linked to the situation in which they develop. In the Holocene sediments the main mechanism is seepage, initiated by desiccation cracks and linked to rills. Pipes are classified as micro pipes. They have small dimensions, from a centimetric to a decimetric scale. Piping is developed only in the massive layer because upper and lower levels inhibit piping development. In gullies the main mechanism is tunneling, initiated by infiltration through stress cracks. It's linked to gully sediments. Gully pipes have bigger dimensions, about metric scale.

To characterize the piping process, diameter, depth, distance from pipe inlets to gully and distance to neighboring pipes has been measured. These measurements have been taken in the field and using the software ArcGIS in difficult access areas. Measurements have been used to make scatter plots to see the differences about dimensions between pipes depending on the measurement station. These graphs also show the relationship between gullies dimension and pipes dimension and between distance to gully and magnitude of pipes diameter and depth. Also, both methods used in the measurement show a good correlation, making sure the data confidence taken with ArcGIS.

Temporal evolution of Bardenas badland occurs on a very fast scale. Therefore, its development is noticeable in a human scale after only a few years, as can be seen comparing current photos with photos of previous studies. Furthermore, a DEMs subtraction has been made using two different Digital Elevation Model created from LiDAR data from 2011 and 2017 to analyze the temporal evolution.

**Key words:** piping, erosion, tunneling, seepage, gully, gully pipe, dispersive clays, runoff, Bardenas Reales

## 1. Planteamiento y objetivos

En el desarrollo de la presente memoria, "*Procesos de piping en las Bardenas Reales. Factores condicionantes y mecanismos de formación*" se utilizarán términos anglosajones dado su amplio uso en la literatura científica, los cuales, aparecerán escritos en cursiva.

Las Bardenas Reales presentan una gran variedad de procesos de erosión relacionados con la escorrentía y las pendientes, como son la formación de regueros o *rills*, barrancos o *gullies*, sufusión o *piping* y movimientos de masas. Todos estos procesos se

generan y desarrollan en periodos de tiempo relativamente cortos dando lugar a una rápida evolución del relieve.

El *piping* es un proceso subsuperficial de erosión, donde el agua percola y arrastra consigo partículas del subsuelo (Marín, 2011). Chorley (1978) define el *piping* como la formación de conductos naturales en el suelo o en otros depósitos no consolidados, por lavado u otros procesos de erosión subsuperficial. Se reconocen dos tipos de *piping* en función del mecanismo de formación, conocidos como percolación o *seepage* y *tunneling* (Desir y Marín, 2011), cuya principal diferencia radica en el sentido de erosión y construcción de los *pipes*, como se detalla a continuación en los resultados.

Los procesos de *piping* se desarrollan en casi todas las zonas climáticas y en distintos tipos de suelos (Bernatek-Jakiel y Poesen, 2018). No obstante, hay ciertas características físico-químicas de los materiales que favorecen su desarrollo, como pueden ser el contenido en sodio (Benito *et al.*, 1993; Gutiérrez *et al.*, 1995), la presencia de minerales de la arcilla con capacidad expansiva (Desir y Marín, 2011), la textura de grano fino (Bernatek-Jakiel *et al.*, 2016), la estructura del suelo (Faulkner, 2006; Bernatek-Jakiel *et al.*, 2016) o la presencia de una capa impermeable (Jones *et al.*, 1997; Uchida *et al.*, 2001). Estas propiedades confieren capacidades dispersivas a los suelos permitiendo que se formen grietas por desecación y por lo tanto que el agua percole y se produzca un flujo de las aguas subsuperficiales dando lugar a los procesos de *piping*.

En las Bardenas Reales, los procesos de *piping* son muy abundantes e intensos llegando incluso a controlar la evolución del relieve y el desarrollo de barrancos. Estos procesos ya han sido estudiados con anterioridad por Gutiérrez *et al.* (1995), Marín (2011) y Desir y Marín (2011). Por lo tanto, el objetivo principal consiste en completar y ampliar los estudios previos. Para ello, se van a caracterizar los parámetros morfogenéticos de los procesos de *piping*; se va a tratar de establecer relaciones entre los materiales en los que se desarrolla el *piping*, la morfología y los mecanismos de formación y se va a determinar las características físico-químicas de los suelos que actúan como factores condicionantes para su desarrollo.

Por otro lado, como el *piping* en las Bardenas Reales ha sido estudiado en dichas campañas previas, otro objetivo consiste en comparar los resultados obtenidos a partir de las mediciones tomadas de los *pipes* en la actualidad con los obtenidos en los estudios anteriores. Estas comparaciones permitirán contrastar que los *pipes* se pueden agrupar según la zona afectada debido a sus características particulares relacionadas con los materiales en los que se desarrollan y las dimensiones y distancia a los barrancos que presentan.

Además, teniendo en cuenta la gran velocidad con la que actúan los procesos de formación del *piping*, otro objetivo del trabajo es analizar la evolución temporal de dichos *pipes*. Este análisis se va a realizar tanto cuantitativa como cualitativamente. Para cuantificar la evolución temporal de los *pipes*, se va a utilizar el software ArcGIS de Esri para generar los modelos digitales de elevación del terreno (MDT), elaborados con datos lidar con una resolución de 20 cm. Por lo que la resta de los lidar entre dos fechas, 2010 y 2017, nos da como resultado las variaciones de la topografía en ese intervalo temporal, siendo los valores positivos las zonas erosionadas y negativos las zonas con acreción. Para medir cualitativamente los cambios producidos en los *pipes* se va a recurrir al registro fotográfico

reciente, comparando un mismo *pipe* mediante fotos actuales y fotos tomadas en los estudios previos.

## 2. Metodología

### 2.1. Búsqueda bibliográfica

Para la elaboración de este trabajo, primero se ha recopilado la bibliografía necesaria respecto a la geología y geomorfología de las Bardenas Reales para situar el contexto geológico y geomorfológico de la zona. A continuación, se ha procedido a recopilar bibliografía acerca del *piping*, los mecanismos de formación, evolución y factores condicionantes para poder comprender el desarrollo de los procesos de *piping* en las Bardenas Reales.

El estudio y síntesis de estos datos han permitido comprender los factores que controlan el desarrollo del *piping* y limitan las zonas en las que se generan. Además, han permitido diferenciar y caracterizar distintos tipos de *piping* que se desarrollan en las Bardenas Reales en función de su mecanismo de formación.

### 2.2. Trabajo de campo

Para poder caracterizar los procesos de *piping* y establecer relaciones entre la localización, morfología y mecanismos de formación, ha sido necesaria la toma de datos de campo. La cual ha consistido en ir tres días al campo para identificar en primer lugar, las zonas con desarrollo de *piping*. Y, en segundo lugar, se ha llevado a cabo la toma de datos de las características de un número suficiente de pipes en cada una de las zonas a las que estaba permitido el acceso (Fig.1). En las zonas de difícil acceso, se han tomado medidas con el software ArcGIS durante el trabajo de gabinete (Fig.1), como se detalla a continuación.

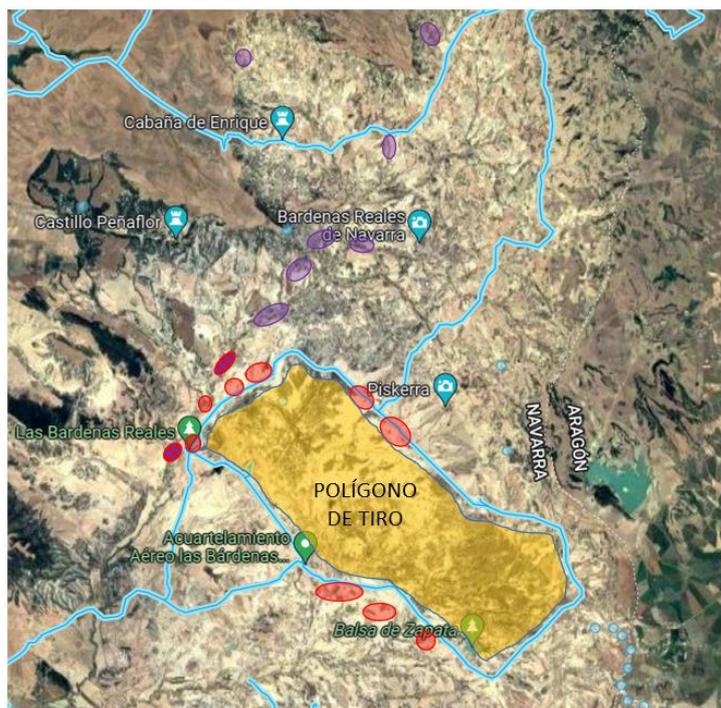


Figura 1. Estaciones de toma de datos de campo en color rojo rodeando el polígono de tiro al tratarse de un área de acceso restringido. En morado los datos tomados con GIS.

En estas zonas se han tomado medidas de la anchura máxima y mínima para obtener el diámetro medio, profundidad, distancia entre *pipes* vecinos y distancia al barranco en caso de que los *pipes* estuviesen asociados a un barranco, de un total de 180 *pipes*. Para la toma de datos se han utilizado varios metros de distintas dimensiones y plantillas para tomar dichas mediciones.

Durante el trabajo de campo, también se han fotografiado y ubicado los *pipes* en el mapa y en la unidad geológica a la que pertenecía, para su posterior análisis y discusión de resultados durante el trabajo de gabinete.

En cuanto a la toma de muestras del suelo para el análisis químico, no ha sido necesaria realizarla ya que la caracterización de las propiedades físico-químicas de los materiales de las unidades sobre las que se desarrollan los *pipes* ya fue realizada por Desir y Marín en 2005.

### 2.3. Trabajo de gabinete

El trabajo de gabinete ha consistido, por una parte, en transcribir los datos tomados en el campo, pasándolos a una hoja de Excel para su posterior análisis. Dado que dentro del área de estudio existen zonas donde el acceso está restringido o directamente prohibido al tratarse de un área militar, y con el objetivo final de realizar un estudio de la incidencia de los procesos de *piping* en toda la depresión de las Bardenas Reales, se ha completado el estudio mediante el uso de sistemas de información geográfica con modelos digitales del terreno de alta resolución, lidars.

A partir del tratamiento de los datos se han elaborado una serie de gráficas de dispersión en las que se compara, en primer lugar, el diámetro y la profundidad de todos los *pipes*, para comprobar si existe algún agrupamiento que sea tanto función de las características propias del *pipe*, sus dimensiones, como de los materiales parentales sobre los que se desarrolla. En segundo lugar, dado que existe una diferencia neta entre los *pipes* que se generan asociados a *gullies* de los demás, se ha optado por analizar de forma independiente los datos de estos *pipes* para ver si existe un control de la distancia del *pipe* al margen del *gully*, la profundidad o la distancia a la que se encuentra el *outlet* respecto de la base del *gully* actual y si las dimensiones del *gully* condicionan en alguna manera el tipo de *piping*. En total, se han medido 221 *pipes* en 18 zonas diferentes, de los cuales, 41 medidas han sido tomadas con ArcGIS en 9 zonas diferentes. Algunas de estas zonas son coincidentes con las zonas donde se tomaron medidas de campo con el objeto de valorar la validez de este método y poder establecer comparaciones entre el resultado de ambas técnicas.

Por otra parte, mediante el uso de ArcGIS de Esri v. 10.7 y los archivos laz descargados del Centro de Descargas del CNIG, se han generado dos modelos digitales de elevación del terreno (mdt) de los años 2010/11 y 2017/18 con el fin de hacer una resta de DEMs (*Digital Elevation Model*). A partir de la resta de DEMs, se puede ver la evolución de las zonas que se han visto afectadas por procesos de *piping*. Permitiendo estudiar la evolución temporal de los procesos de *piping* durante el transcurso de 7 años. Además, para tener un estudio de la evolución temporal más detallado, se han comparado fotografías actuales de un gran *pipe* formado en el barranco Grande con una foto tomada en 2007 (Desir y Marín).

Por último, se han comparado los resultados obtenidos en este trabajo con los resultados de estudios previos mediante gráficas para comprobar la validez de los resultados obtenidos y tener una visión temporal y real.

### 3. Contexto geológico y geomorfológico

#### 3.1. Marco geográfico

El área de estudio se ubica en las Bardenas Reales, al sureste de Navarra (España) y en la zona limítrofe con Aragón (Fig.2). Pertenece a la zona media o sector centro-occidental de la cuenca del Ebro. El trabajo se desarrolla en la parte central de las Bardenas, conocida como Bardena Blanca. En concreto, se trata de la zona del Cabezo Castildetierra y alrededores del polígono de tiro del Acuartelamiento Aéreo Bardenas. Dicha zona se encuentra rodeada por los barrancos Grande, Salinero y de las Cortinas.

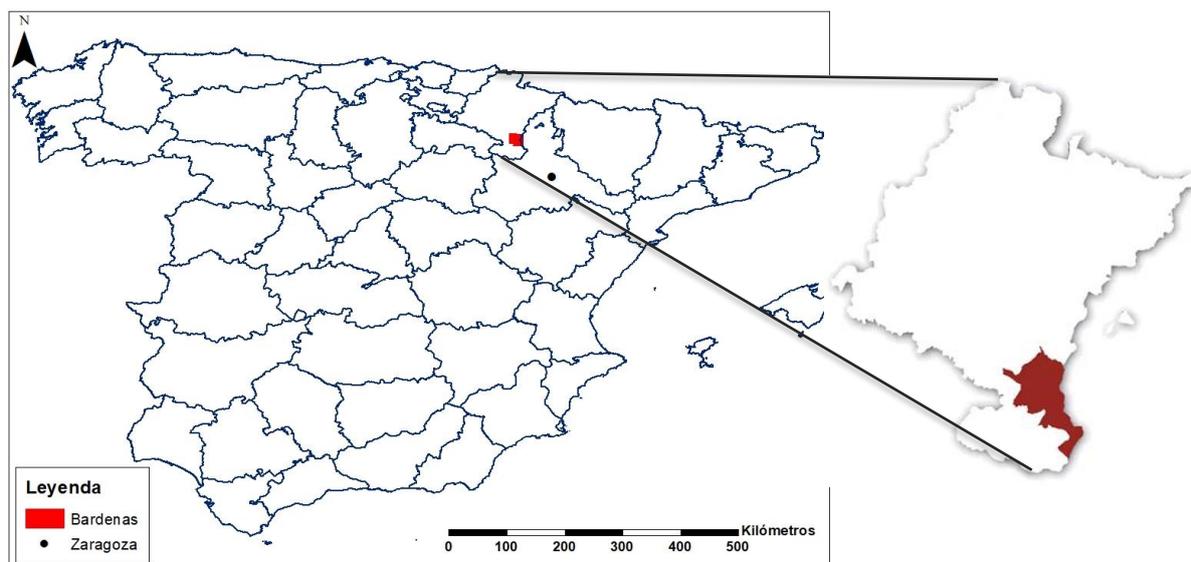


Figura 2. Situación geográfica de la zona de estudio en un mapa provincial de España a escala 1:5.000.000 y ampliación de la comunidad Foral de Navarra y las Bardenas, tomada de “misescapadaspornavarra.com”.

La depresión de las Bardenas Reales ocupa una superficie de unos 415 km<sup>2</sup>. Presenta un clima semiárido con escasas precipitaciones de carácter torrencial, variando entre 300 y 450 mm anuales y una temperatura media de 14.5°C. Sin embargo, el área de estudio se corresponde únicamente con la Bardena Blanca, la cual, es la zona más seca con unas precipitaciones de unos 300 mm anuales. Dado el carácter torrencial, los cursos de agua existentes son irregulares y solamente fluye agua durante las épocas de lluvia.

Estos arroyos intermitentes se disponen formando barrancos como son el barranco Grande o su afluente el barranco de las Cortinas. La red de drenaje muestra cómo se trata de un drenaje tipo dendrítico que drena toda la depresión y que se articula en dos barrancos principales, el barranco Grande, que drena el sector occidental y el barranco Salinero, que drena la mitad oriental (Fig.3). Ambos barrancos confluyen en uno solo, en el paraje de Ladarregia-Campo Nuevo, de manera que toda la escorrentía generada dentro de la depresión es conducida a través del barranco de las Limas hasta el Ebro.

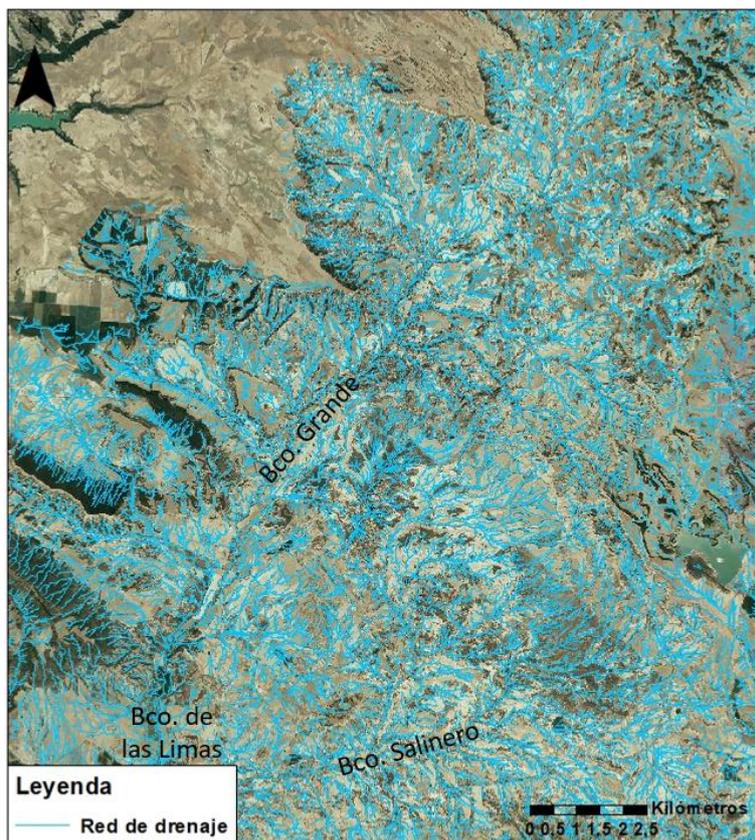


Figura 3. Red de drenaje de la Bardena Blanca realizada con el software ArcGIS a partir de los datos tomados de la Confederación Hidrográfica del Ebro.

### 3.2. Marco geológico

Las Bardenas Reales se encuentran en el sector centro-occidental de la Cuenca del Ebro. Se trata de una depresión cenozoica que se corresponde con la cuenca de antepaís de la Cadena Pirenaica. Dicha cuenca se formó durante la etapa compresiva del orógeno Pirenaico. Limita al norte con la propia Cadena Pirenaica, al sur con la Cordillera Ibérica y al noreste con la Cordillera Costero-Catalana.

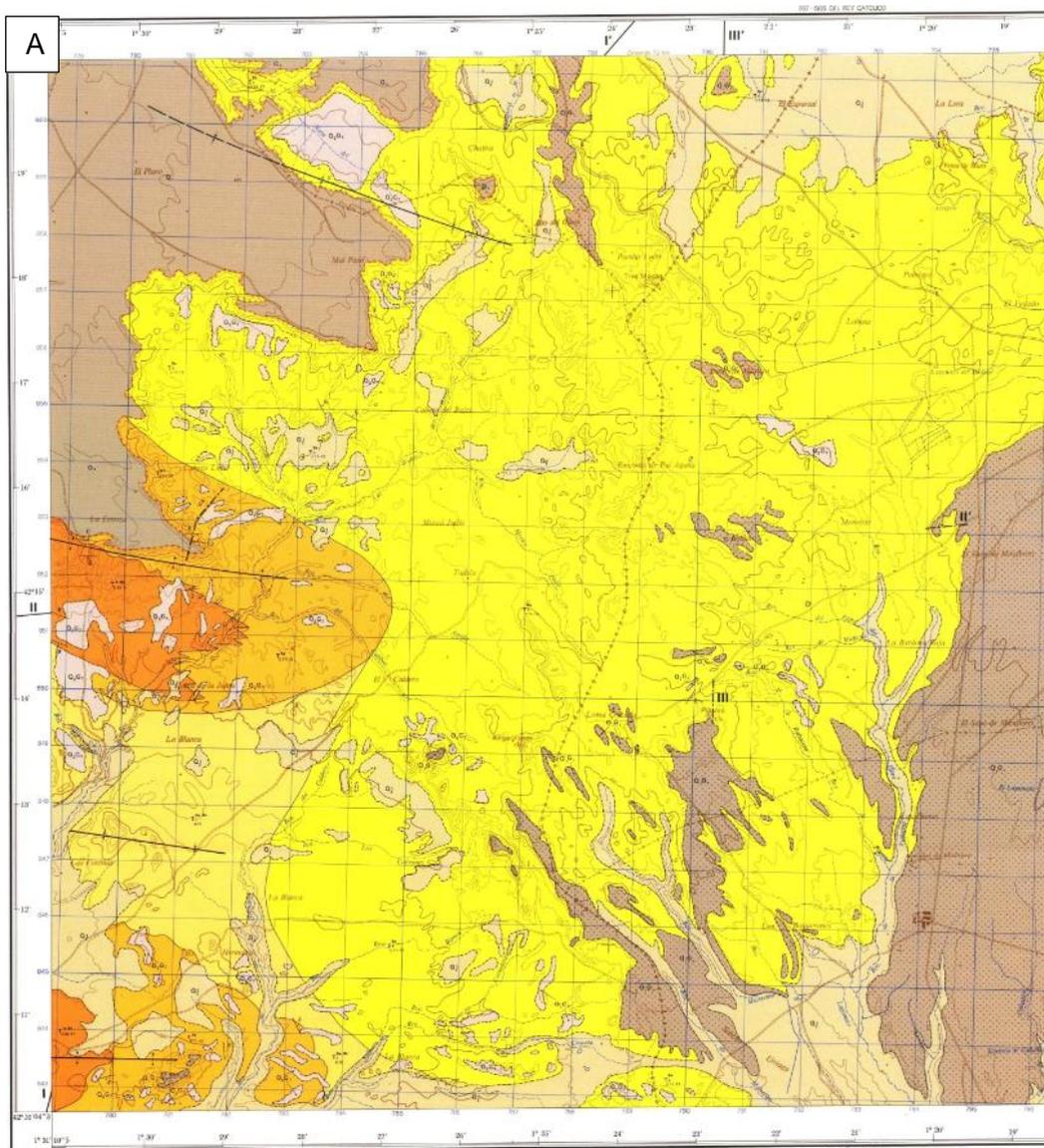
El área de estudio se corresponde con la Hoja 245 (Sádaba) de la Serie MAGNA 1:50.000 (Fig.4). Se compone principalmente de materiales terciarios provenientes de la Cadena Pirenaica y la Cordillera Ibérica y materiales cuaternarios resultado de la erosión y depósito de dichos materiales terciarios. Los depósitos terciarios son mayoritariamente arcillas de edad miocena mientras que los depósitos cuaternarios son principalmente arcillas y limos de edad holocena.

En los materiales terciarios se reconocen cuatro unidades diferentes:

- Formación Lerín (Oligoceno). Aparece al norte y suroeste del área de estudio. Está constituida por capas de yeso y arcillas que en el este presentan un cambio lateral de facies a las arcillas de la siguiente unidad.
- Unidad  $T^{Ba}_{C11-12}$  (Oligoceno-Mioceno). Aparece al norte y sur del área de estudio. Esta unidad se trata de un cambio lateral de facies entre la Fm. Lerín y la Fm. de Ujué y Tudela. Está formada mayoritariamente por arcillas, aunque presenta intercalaciones de yesos, calizas y areniscas.

- Formación Tudela (Mioceno-Plioceno). Ocupa la mayor parte de la zona de estudio. Compuesta principalmente por arcillas, presenta algunas intercalaciones de calizas y areniscas.
- Formación de Ujué (Mioceno). Abarca la zona este del área de estudio (amarillo intenso). Está formada mayoritariamente por arcillas con presencia de paleocanales de arenisca.

Los depósitos holocenos constituyen el relleno del valle. Aparecen en diversas zonas y están formados por arcillas y limos resultantes del lavado de los materiales terciarios circundantes y se encuentran altamente incididos por la red de drenaje (Desir *et al.*, 2005). Se diferencian tres niveles conformados por dos niveles laminados con presencia de laminación algal y entre medio un nivel más arcilloso y menos consolidado. También aparecen pequeños glacia holocenos constituidos por gravas con matriz arcillosa.



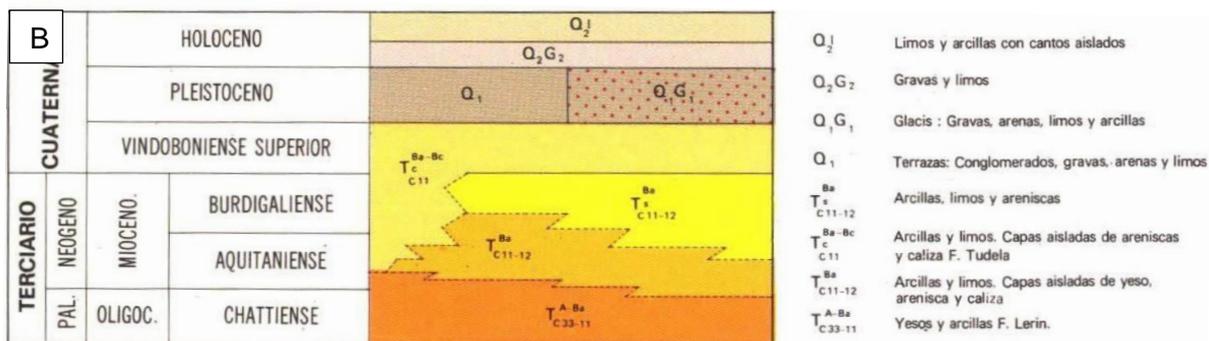


Figura 4. A-mapa geológico de la zona de estudio (Hoja 245 Sádaba serie MAGNA a escala 1:50.000); B-leyenda geológica. Fuente: IGME (Instituto geológico y minero de España).

Respecto a la estructura tectónica, se trata de una zona prácticamente no deformada, con los materiales dispuestos de forma subhorizontal. No obstante, los materiales más situados al oeste de la zona de estudio se encuentran ligeramente afectados por los pliegues halocinéticos que afectan a las formaciones evaporíticas. Dichos pliegues tienen una dirección ONO-ESE y se corresponden con los anticlinales de Arguedas y Falces y el sinclinal de Peralta en su cierre periclinal (Solé, 1976). Por otro lado, los yesos de la Fm. Lerín y las arcillas de la Fm. Tudela se encuentran deformados en algunos puntos como consecuencia de la actividad halocinética de las formaciones yesíferas.

### 3.3. Marco geomorfológico

#### 3.3.1. Modelados y formas geomorfológicas

En la zona de estudio se pueden reconocer cuatro modelados distintos, generados principalmente por la actividad erosiva de la red fluvial (Fig. 5):

Modelado estructural. Constituido por plataformas que se tratan de relieves estructurales desarrollados sobre las calizas miocenas que limitan al sur la depresión. Además, aparecen cuestras que se forman debido a la actividad halocinética de los pliegues de la Fm. Lerín que levantan y basculan los niveles arcillosos de los flancos dando lugar a cuestras.

Modelado fluvial. Representado por varios niveles de terrazas, grandes *gullies*, un intenso desarrollo de *badlands*, *rills*, y pequeños conos de deyección. En la zona de estudio, se reconocen varios niveles de terraza, ligados tanto al río Ebro como al río Aragón. Las terrazas de los dos ríos están deformadas en el sector en el que atraviesan las formaciones yesíferas. El Aragón desde Caparrosa a Valtierra y el Ebro presenta deformadas las terrazas altas asociadas al escape en la zona de Valtierra a Arguedas (Fig. 5). Asociados a los *gullies* y *rills* se generan abundantes procesos de *piping* de escala métrica y decimétrica.

Modelado acumulativo. Es el modelado dominante en la zona de estudio. Pueden diferenciarse dos tipos de glacis: unos de grandes dimensiones, con una gran extensión y potencia, de edad plio-pleistoceno situados al norte de la depresión y otros de menor desarrollo, de edad holocena, que se sitúan en el interior de la depresión a cotas mucho más bajas, los cuales, aunque se trata de glacis de tipo acumulativo, el espesor de su depósito suele ser inferior a un metro.

Modelado gravitacional. En algunas zonas de ladera en los materiales terciarios, se generan pequeños movimientos en masa.

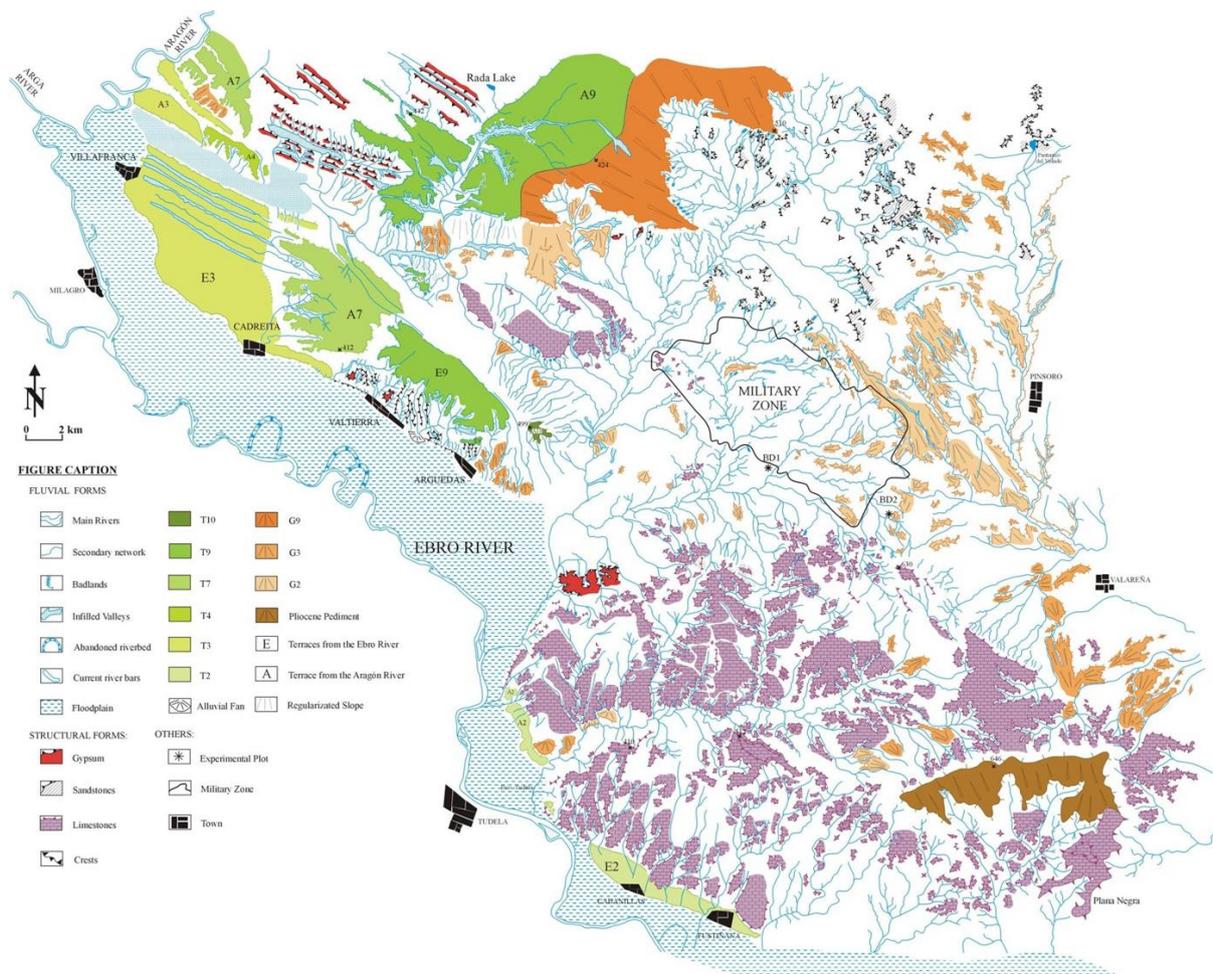


Figura 5. Mapa geomorfológico tomado de Marín (2011). En el mapa se aprecia como la depresión de las Bardenas Reales se encuentra rodeada por las terrazas altas de los ríos Ebro y Aragón, por glaciares de grandes dimensiones al N y los relieves estructurales carbonatados al S. Además, se observan dentro de la depresión numerosos glaciares de menores dimensiones y más modernos de edad holocena.

### 3.3.2. Historia geomorfológica

Tras el depósito de los materiales miocenos de la Cuenca del Ebro en régimen endorreico, la apertura de la parte oriental de la Cordillera Costero-Catalana, produjo un cambio de cuenca endorreica a exorreica. Esto supuso el establecimiento de la red fluvial del Ebro, vertiendo sus aguas al mar Mediterráneo. Por lo tanto, al cambiar el nivel de base se produjo la incisión de la red fluvial, pasando de una fase de sedimentación en ambientes lacustres a una de intensa erosión en un ambiente semi-árido.

La incisión de la red fluvial y la erosión diferencial propició que se formaran por procesos de erosión diferencial las plataformas estructurales carbonatadas al sur de la depresión y las terrazas altas de los ríos Ebro y Aragón, generando grandes escarpes. A raíz de estos escarpes se formaron glaciares y coluviones por la erosión y desprendimiento de bloques de las partes altas de la ladera y su posterior acumulación en la parte baja. Esta erosión diferencial, originó también los cerros testigos característicos de las Bardenas Reales,

ya que los paleocanales de arenisca consolidados y capas de caliza de mayor dureza que los materiales subyacentes protegen a las arcillas de carácter más blando de la erosión, como es el caso del cabezo de Castildetierra.

En primer lugar, se produjo la formación de la depresión erosiva y la erosión de los relieves más altos circundantes, tales como las terrazas y glacis de los niveles T9 y T10. Las gravas procedentes de los depósitos de estos glacis y terrazas conforman el relleno o lag basal que recubre el fondo de la depresión y sobre el que posteriormente se depositaron los sedimentos procedentes del lavado de los materiales terciarios. La erosión derivada de la incisión de la red de drenaje, intensificada por las precipitaciones torrenciales características de la zona, dio lugar a la formación de *gullies*, *badlands* y *rills* sobre los materiales holocenos del relleno.

Este modelado sigue activo y evolucionando por distintos procesos de erosión derivados de la escorrentía superficial y subsuperficial como es el caso del *piping* que controla la evolución de los *gullies* mediante el retroceso de cabeceras y ampliación de los canales.

## 4. Resultados

### 4.1. Procesos de *piping* y sus principales mecanismos de formación

El *piping* es un proceso subsuperficial de erosión, donde el agua percola y arrastra consigo partículas del subsuelo (Marín, 2011). Chorley (1978) define el *piping* como la formación de conductos naturales en el suelo o en otros depósitos no consolidados, por lavado u otros procesos de erosión subsuperficial. Los procesos de *piping* se han observado en diferentes paisajes, tanto naturales como artificiales y en la mayoría de las zonas climáticas, con distintos tipos de suelos y distintas características geomorfológicas (Bryan y Jones, 1997).

En zonas semi-áridas como es el caso de las Bardenas Reales los procesos de *piping* tienen una mayor capacidad erosiva pudiendo llegar a generar grandes impactos en el paisaje condicionando el desarrollo de *gullies* mediante el retroceso de cabeceras, conectando y creando nuevos *gullies*. Es común que, bajo la superficie, los *pipes* estén conectados generando una red que puede afectar a la hidrología de la zona influyendo en la composición química del agua, la temperatura de la escorrentía y ciclos hidroquímicos locales, dado que puede suponer hasta un 70% de la escorrentía (Smart *et al.*, 2013; Vannoppen *et al.*, 2017).

A pesar de la escasez de precipitaciones en zonas semi-áridas, la concentración de las lluvias torrenciales en uno o dos máximos pluviométricos, característico de las Bardenas Reales, favorece el desarrollo de *piping*. Esta concentración de la precipitación permite que se infiltre la cantidad suficiente como para que se generen flujos subsuperficiales debido al gradiente hidráulico. La infiltración en épocas de tormenta se ve beneficiada por los periodos de sequía previos que provocan la formación de grietas en el suelo permitiendo que el agua se infiltre en los materiales arcillosos que constituyen el suelo de las Bardenas Reales.

La presencia en la superficie de colapsos y depresiones cerradas hace presuponer, al tratarse de materiales no solubles, que su génesis está ligada a procesos de *piping*. No obstante, es difícil saber dónde, cuándo y durante cuánto tiempo están actuando estos procesos dado que se producen bajo la superficie y no siempre aparecen claras evidencias. Por lo tanto, para inferir las zonas susceptibles en las que se puede desarrollar el *piping*,

resulta fundamental el estudio de las distintas características de los materiales que controlan el desarrollo del *piping*.

Los principales factores que controlan el desarrollo del *piping* están relacionados con la estructura, mineralogía, composición química y el gradiente hidráulico del suelo. A pesar de que en las Bardenas Reales el *piping* se desarrolla sobre arcillas que a priori parecen ser bastante impermeables, el elevado valor del SAR, o sodio adsorbido en el complejo de cambio (Sherard y Decker, 1977; Gutiérrez *et al.*, 1995; Marín, 2011) y la presencia de minerales de la arcilla con capacidad expansiva (Gutiérrez *et al.*, 1995; Marín, 2011) confieren al suelo una capacidad dispersiva favorable para su desarrollo.

Los procesos de *piping* presentan dos mecanismos principales de formación conocidos como *seepage* y *tunneling* (Desir y Marín, 2011). Se diferencian principalmente en el sentido en el que se propaga la erosión y la creación de los conductos. En las Bardenas Reales se dan los dos mecanismos, aunque se encuentran asociados a distintas zonas debido a sus características tal y como se desprende de los resultados observados en campo y del análisis de la comparativa de todos los *pipes* en función de sus dimensiones y características.

Por un lado, el mecanismo de *seepage* o percolación se caracteriza por que el agua infiltrada se mueve a través de los poros de los materiales en función del gradiente hidráulico hasta que alcanza el nivel de base y sale al exterior. Creando un efecto de arrastre del material debido al incremento de la energía y el esfuerzo de cizalla como consecuencia de la pérdida de confinamiento, lo que se traduce en una erosión neta en el punto de surgencia que, con el paso del tiempo, se va propagando hacia el interior del sustrato construyendo el túnel. Los *pipes* generados por *seepage* están relacionados principalmente con grietas originadas por desecación debido a la presencia de minerales de la arcilla con capacidad de hinchamiento que son sometidos a procesos de dilatación y contracción. En las Bardenas Reales, este mecanismo aparece desarrollado sobre los materiales del relleno de edad holocena. Los *pipes* aparecen en los *rills* con pendientes moderadas y presentan diámetros y profundidades centimétricos o decimétricos ya que los niveles laminares limitan su desarrollo (Desir y Marín, 2011). Cuando, el mecanismo de *seepage* se encuentra relacionado con *gullies* de pequeñas dimensiones, asociados a un contacto litológico, los *pipes* adquieren una mayor verticalidad (Fig.7) y cuando alcanzan el contacto litológico se desarrollan en la horizontal, a favor de dicho contacto hasta que sale al exterior (Desir y Marín, 2011).

Por otro lado, el mecanismo de *tunneling* se propaga en el sentido contrario al anterior. De modo que el *piping* generado por *tunneling* se inicia en las fracturas extensionales o de tensión que se forman en los márgenes activos de los *gullies*, por las que se infiltra el agua y su paso produce la dispersión de las arcillas erosionando desde arriba hacia niveles inferiores formando los conductos o *pipes* (Desir y Marín, 2011; Richards *et al.*, 2015). Este tipo de *pipes* presentan mayores dimensiones cuanto más grande es el *gully*, con diámetros y profundidades de escala métrica que llegan a afectar materiales terciarios. En época húmedas debido al aumento del peso del suelo y pérdida de cohesión pueden generar grandes colapsos (Desir y Marín, 2011).

Desir y Marín (2011) clasifican a los *pipes* formados por *seepage* como *Micro Pipes* a los *pipes* que aparecen desarrollados sobre los rellenos holocenos y asociados a los *rills* y que suelen presentar dimensiones reducidas (Fig.6) y *Gully Pipes (seepage)* a los *pipes* verticales que aparecen asociados a contactos litológicos.



Figura 6. Rellenos masivos con múltiples *micro pipes* de escala centimétrica a decimétrica desarrollados por *seepage* asociados a los *rills*.



Figura 7. *Gully pipes* colapsados formados por *seepage* en rellenos holocenos de escala métrica asociados a un contacto litológico.

Respecto a los *pipes* formados por *tunneling* que aparecen asociados a grietas de extensión formadas en los márgenes activos de *gullies*, Desir y Marín (2011) los clasifican como *Gully Pipes (tunneling)* (Fig.8).

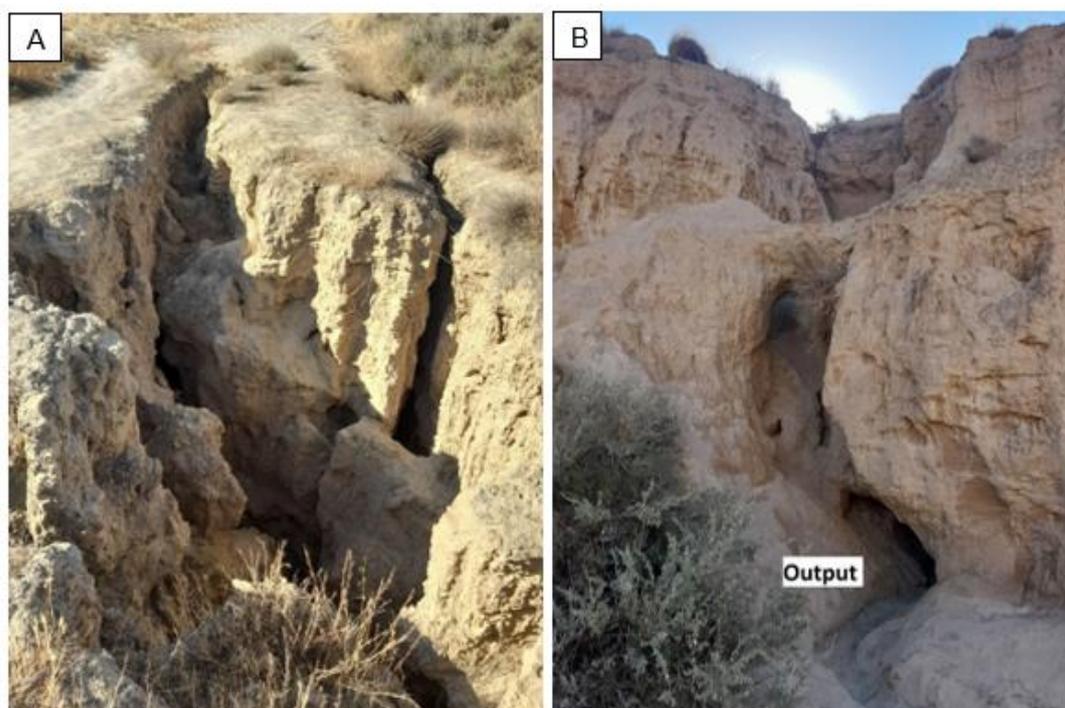


Figura 8. *Gully pipe* de escala métrica originado por *tunneling* asociado a grietas de extensión en el margen del barranco Grande: A-entrada del *pipe* o *input*; B-salida al *gully* u *output*.

#### 4.2. Factores que controlan el desarrollo del *piping*

A pesar de que el *piping* se desarrolla en casi todas las zonas climáticas y en diferentes tipos de suelos (Bernatek-Jakiel y Poesen, 2018) con sedimentos desde arcillosos hasta arenosos (Gallardo *et al.*, 2017), requiere una serie de características que permitan su desarrollo. Los procesos de *piping* están controlados fundamentalmente por las propiedades del suelo que, pueden ser físicas como la estructura del suelo (Faulkner, 2006), textura de los sedimentos, porosidad y presencia de fracturas (Gutiérrez *et al.*, 1997; Jones *et al.*, 1997) o químicas como la presencia de sales (Gutiérrez *et al.*, 1997) y minerales de la arcilla (Desir y Marín, 2011). No obstante, además de las propiedades del suelo, hay otros factores que también influyen en el desarrollo del *piping*, como la topografía (Holden, 2005), el clima (Jones *et al.*, 1997; Carey y Woo, 2000; Uchida *et al.*, 2002, 2005; Holden, 2006) o incluso usos del suelo (Holden, 2005; Verachtert *et al.*, 2013; Wilson *et al.*, 2015).

Un suelo con contactos litológicos bien definidos entre unidades que presente fracturas en superficie facilitando la infiltración, puede favorecer el flujo lateral por los planos de estratificación o los cambios de horizonte edáfico, pudiendo dar lugar a la formación de *pipes* por el mecanismo de *seepage* (Carey y Woo, 2000, 2002). La textura más favorable de los sedimentos para el desarrollo de dichos procesos varía de fina a media, siendo materiales arcillosos y limosos los más comunes, pero también se pueden producir en sedimentos arenosos. La presencia de macroporos y fracturas mejora la infiltración y percolación favoreciendo el flujo de agua. Las fracturas pueden formarse por desecación, como resultado de la presencia de un margen activo de un *gully* dando lugar a grietas de extensión o incluso, por actividad biológica. En el caso de las Bardenas Reales, se podría decir que los factores físicos relacionados con la estructura del suelo más importantes en el control del *piping* son

la abundante cantidad de grietas de desecación, grietas extensionales, la textura arcillosa y limosa y la abundante porosidad. Además, en los rellenos, en las unidades laminadas inferior y superior de los niveles masivos interestratificados, cuando la potencia supera los 20 cm limitan el desarrollo en profundidad del *piping* ya que los *pipas* se encuentran sobre impuestos a la red de drenaje (Desir y Marín, 2011).

En zonas húmedas como los suelos tienen abundante materia orgánica, la cual permite que el suelo pueda absorber más agua, tienen la suficiente capacidad de hinchamiento como para agrietarse al desecarse. Sin embargo, en zonas semiáridas como es el caso de las Bardenas Reales, con escasez de materia orgánica, cobra una mayor importancia la composición química y mineralógica del suelo debido a que determinan la capacidad dispersiva de los suelos y por lo tanto la formación de grietas. Un suelo con un alto valor de sodio en el complejo de cambio, con un índice ESP mayor al 6% conducen a suelos dispersivos aumentando la posibilidad de que se generen *pipas* (Hardie et al., 2009). Los sedimentos de las Bardenas Reales presentan valores de SAR y ESP por encima de 25 y 30 respectivamente, lo cual supone más de 5 veces la cantidad de sal necesaria para que el suelo sea dispersivo, ofreciendo un índice de dispersión entre 0.5 y 0.8 (Gutiérrez et al., 1995, 1997). La presencia de minerales de la arcilla con capacidad expansiva como son la esmectita o la montmorillonita también aumentan la capacidad dispersiva del suelo. No obstante, en las Bardenas, domina la illita (82-86%) que tiene una menor capacidad de hinchamiento. Sin embargo, gracias a la dispersión producida por el alto contenido en cationes de sodio ( $\text{Na}^+$ ) los suelos adquieren una capacidad de hinchamiento que alcanza el 4,5% en los materiales holocenos e incluso supera el 12% en el caso de los materiales terciarios (Gutiérrez et al., 1995, 1997).

En cuanto a la topografía, la característica más importante es la pendiente de la ladera debido a que controla la velocidad de la escorrentía y por tanto la infiltración. Cuando la pendiente supera los 30° de inclinación, no se desarrollan procesos de *piping* debido a que no se produce la suficiente infiltración, como es el caso de los materiales terciarios (Desir y Marín, 2011). Además, es fundamental que haya un gradiente hidráulico suficiente como para producir un flujo subsuperficial que dé lugar al desarrollo de *piping*, que vendrá determinado por el nivel de base.

Respecto al clima, los principales factores son la alternancia de periodos húmedos con el suficiente aporte de agua y periodos de sequía que produzcan la formación de grietas de desecación (Jones et al., 1997; Uchida et al., 2002, 2005; Holden, 2006). A pesar de que en las Bardenas Reales, las precipitaciones son escasas y de carácter torrencial, se infiltra y percola la suficiente cantidad de agua a través de la abundante cantidad de grietas preexistentes como para generar un flujo subsuperficial que con la erosión que produce con el paso del tiempo da lugar a la formación de *pipas*.

Por último, los usos del suelo también pueden desencadenar la formación de *piping* al convertir zonas de bosque o cultivo en zonas de pasto (Verachtert et al., 2013; Wilson et al., 2015), mediante el drenaje de embalses y pantanos (Holden, 2005, 2006) que promuevan la generación de *pipas* o por el gradiente generado por la construcción de una presa llegando a generar daños en la propia presa (Wilson et al., 2012). No obstante, en este trabajo, estos factores carecen de importancia ya que la única zona en la que se puede reconocer la afección de los usos del suelo es en el embalse de Zapata, el cual se encuentra dentro de la zona restringida. Por lo tanto, no se han podido medir los *pipas* por estar prohibido el acceso y que

por tamaño están por debajo de la resolución del lidar dando un error mayor que la propia medida. Sin embargo, se puede observar como el *piping* afecta a campos de cultivo próximos a los *gullies* (Fig.9).



Figura 9. Campo afectado por el *inlet* de un *pipe* con un diámetro de escala decimétrica y profundidad de escala métrica. Se pueden apreciar las grietas de extensión precursoras del *piping* originadas por la proximidad al *gully*.

### 4.3. Caracterización de las propiedades físico-químicas del suelo

Las características geoquímicas del regolito de las Bardenas Reales es uno de los factores más importantes para el *piping* pueda desarrollarse. Los procesos de *piping* se desarrollan en la Fm. Tudela, en los rellenos holocenos masivos y en las facies de *gully* que aparecen en los rellenos de los *gullies*. Las características de dichas formaciones son semejantes dado que los materiales holocenos proceden del lavado de las formaciones terciarias (ANEXO I).

La Fm. Tudela (Mioceno-Plioceno) como se ha mencionado anteriormente está constituida principalmente por arcillas terciarias con algunos niveles de arenisca. El análisis geoquímico revela que estas arcillas presentan altos valores de sodio en el complejo de cambio otorgándole al suelo unos valores de SAR (*Sodium Absortion Ratio*) y ESP (*Exchangeable Sodium Percent*) que llegan a estar por encima de 25 y 30, respectivamente (Desir y Marín, 2011). Lo cual supone unas 5 veces el umbral necesario para que el suelo adquiera características dispersivas. Además, son suelos con pH alcalino y con una elevada conductividad eléctrica. El análisis mineralógico muestra que dichos materiales están compuestos por minerales de la arcilla (de los cuales, illita, 82-86%, clorita, 9-16% y trazas de caolinita), cuarzo y calcita (Desir y Marín, 2011). Aunque estos minerales de la arcilla en un principio no otorgan una gran capacidad de hinchamiento y dispersión, el conjunto de todas las propiedades mencionadas anteriormente les concede a los materiales de la Fm. Tudela una capacidad de hinchamiento de hasta más del 12% y unos índices de dispersión que varían entre 0.5 y 0.8 (Gutiérrez *et al.*, 2005). Además, Gutiérrez *et al.* (2005) señalan un índice de plasticidad en torno a 5 y 18.7 otorgando un rápido tránsito de comportamiento plástico a líquido.

Los depósitos holocenos como bien se ha dicho anteriormente provienen del lavado de los materiales terciarios de la Fm. Tudela, por lo que están formados principalmente por arcillas y limos (Gutiérrez *et al.*, 1995). Los tres niveles diferenciados presentan un regolito por debajo de 4 cm de espesor. Respecto a la composición química, presenta altos valores de SAR y ESP, situándose ambos por encima de 30, con un pH ligeramente alcalino y alta

conductividad eléctrica. La mineralogía de los rellenos está constituida principalmente por minerales de la arcilla, en proporciones similares a los sedimentos de la Fm. Tudela (illita, 81-85%, clorita, 11-17% e indicios de caolinita) (Desir y Marín, 2011). Todas estas propiedades les confieren a las arcillas una capacidad de hinchamiento de entorno al 4,3 y 4,5% y unos índices de dispersión que varía entre 0,6 a 0,7 para los niveles superiores y 0,9 para el nivel basal (Gutiérrez *et al.*, 1995).

#### 4.4. Caracterización morfogenética del *piping* en las Bardenas Reales

Como se ha señalado anteriormente, el *piping* en las Bardenas Reales tiene una gran importancia en la evolución del relieve ya que controla la creación y evolución de los *gullies* a partir del retroceso de las cabeceras y la fuerte incisión del drenaje en los depósitos holocenos. También, se ha demostrado que el *piping* se puede originar por dos procesos distintos en función de si está asociado a la presencia de un *gully* o si se encuentra limitado a los *rills* presentes en los rellenos. Además, cuando está asociado a un *gully*, la densidad y magnitud de los *pipes* depende de las dimensiones del *gully* y la distancia al margen de dicho *gully* (Desir y Marín, 2011). Con todos estos datos y para poder terminar de caracterizar el *piping*, se han tomado medidas del diámetro, profundidad, distancias entre *pipes* próximos y distancia al *gully* en el caso de *gully pipes* de un total de 221 *pipes* (ANEXOS II y III).

A partir de estas medidas se han elaborado una serie de gráficas de dispersión para comprobar, en primer lugar, si se podía discriminar los *pipes* en función de si estaban asociados al *gully* principal (*tunneling*), a *gullies* de menores dimensiones o a los *rills* que se forman en los rellenos (*seepage*). Para ello se ha representado el diámetro frente a la profundidad de todos los *pipes* (Fig.10). Los resultados obtenidos muestran que sí se pueden discriminar en 2 grupos, en función de si los *pipes* se encuentran asociados a *rills* (*micro pipes*) o asociados a *gullies* (*gully pipes*).

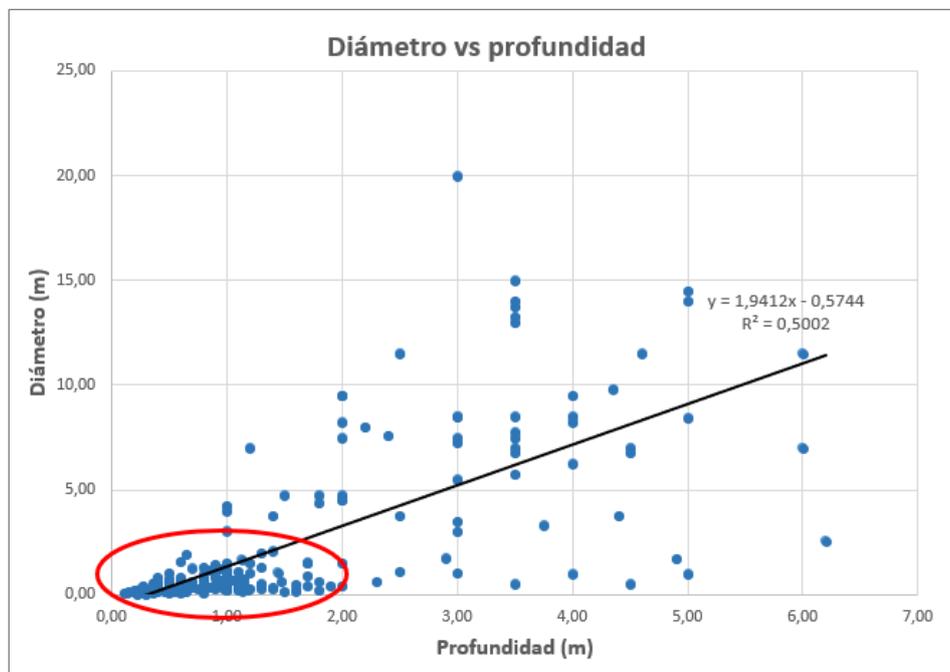


Figura 10. Relación entre el diámetro y profundidad de los *pipes* medidos en la zona de estudio. Se observa cómo los *micro pipes* se pueden agrupar (círculo rojo), diferenciándose de los *gully pipes*, ya que estos últimos suelen presentar dimensiones de mayor escala.

En segundo lugar, se han analizado por separado los *pipes* asociados a los *rills* para comprobar si existe diferencias de una estación de medida a otra. Los resultados muestran, con la excepción de algunos *pipes* que por coalescencia han formado grandes *inlets* y alcanzado profundidades mayores a lo habitual, una clara línea de tendencia de los *pipes* que están asociados a *rills* (Fig. 11), ya que presentan características similares y se generan por el mismo mecanismo (*seepage*).

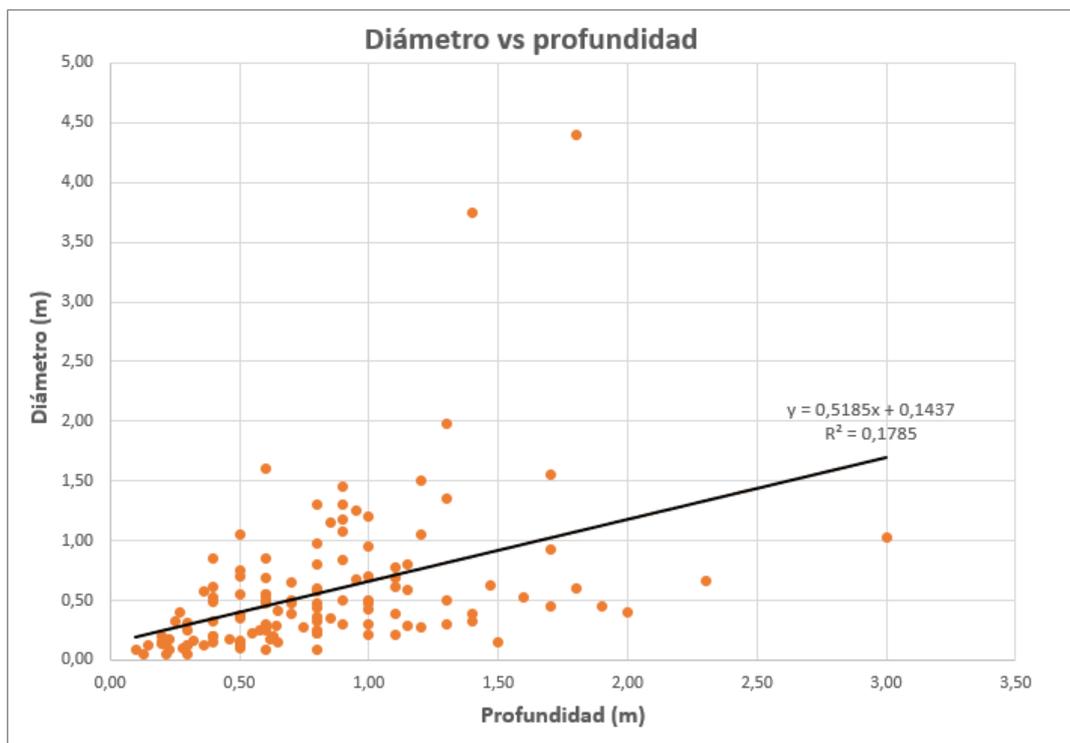


Figura 11. Relación entre el diámetro y la profundidad de los *pipes* asociados a *rills*.

Por último, en el caso de los *pipes* asociados a *gullies*, se ha comprobado, por un lado, si existe una relación entre la distancia al margen del *gully* y las dimensiones de los *pipes* y, por otro lado, si se puede discriminar la zona de medición por las diferencias entre *pipes*.

Los resultados muestran la existencia de un umbral, por encima del cual, los *pipes* tienen unas características y por debajo otras. De modo que por encima del umbral hay un grupo de *pipes* que aparecen a grandes distancias del margen del *gully*, y otro en el que los *pipes* aparecen a distancias cortas. En ambos casos las dimensiones varían desde pequeñas a grandes, con la diferencia de que a cortas distancias del margen del *gully*, la frecuencia de *pipes* es mucho mayor.

Los resultados también muestran que se pueden agrupar los datos por zonas (Fig. 12), ya que se puede ver que el barranco Grande presenta *pipes* de mayores dimensiones y que también se desarrollan *pipes* a distancias más grandes del margen del *gully*. Los *pipes* desarrollados por *tunneling* en *gullies* de menores dimensiones siguen esa tendencia, pero a menor escala. Sin embargo, los *pipes* formados por *seepage* en los *gullies* no siguen esa tendencia y se encuentran muy próximo al margen o directamente unidos al *gully* con diámetros mucho menores. Por último, los *pipes* que afectan al coluvión del barranco Grande aparecen junto al margen del *gully* presentando diámetros moderados pero grandes profundidades.

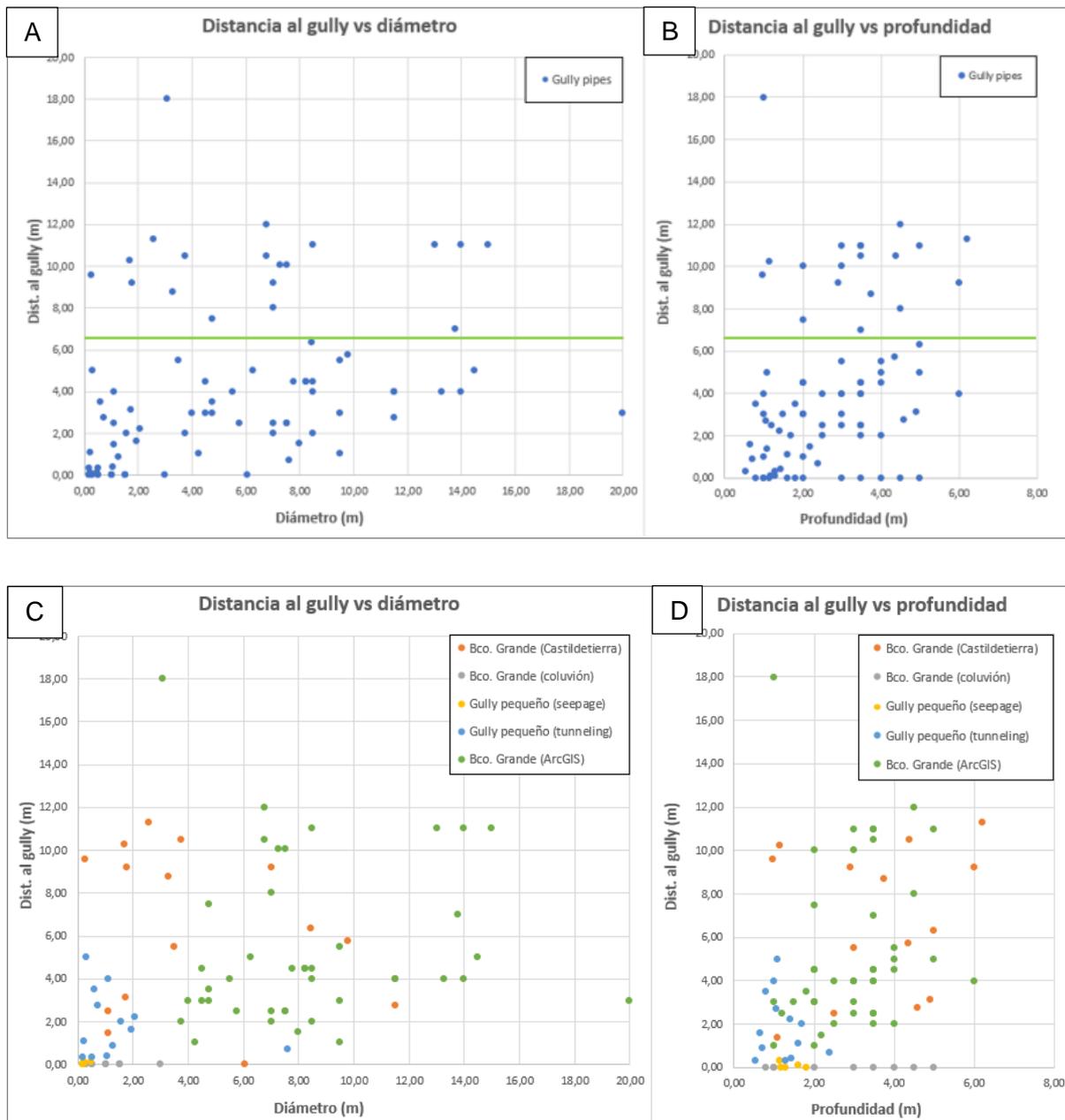


Figura 12. Relación entre la distancia al *gully* y las dimensiones de los *pipes* y agrupación por zonas: A-distancia frente diámetro; B-distancia frente profundidad; C y D-mismas relaciones, pero mostrando los datos agrupados por zonas.

#### 4.5. Evolución temporal del *piping* en las Bardenas Reales

El estudio de la evolución temporal del *piping* en las Bardenas Reales se ha llevado a cabo de dos formas: calculando la diferencia de cota en el transcurso de 7 años mediante una resta de DEMs (*Digital Elevation Model*) con el software ArcGIS de Esri a partir de dos MDT generados con los datos LiDAR del 2011 y 2017, tomados del Centro Nacional de Información Geográfica (Fig.12) y comparando unas fotografías del año 2013 de un *pipe* fácilmente identificable en el barranco Grande con varias actuales del 2022 (Fig.13).

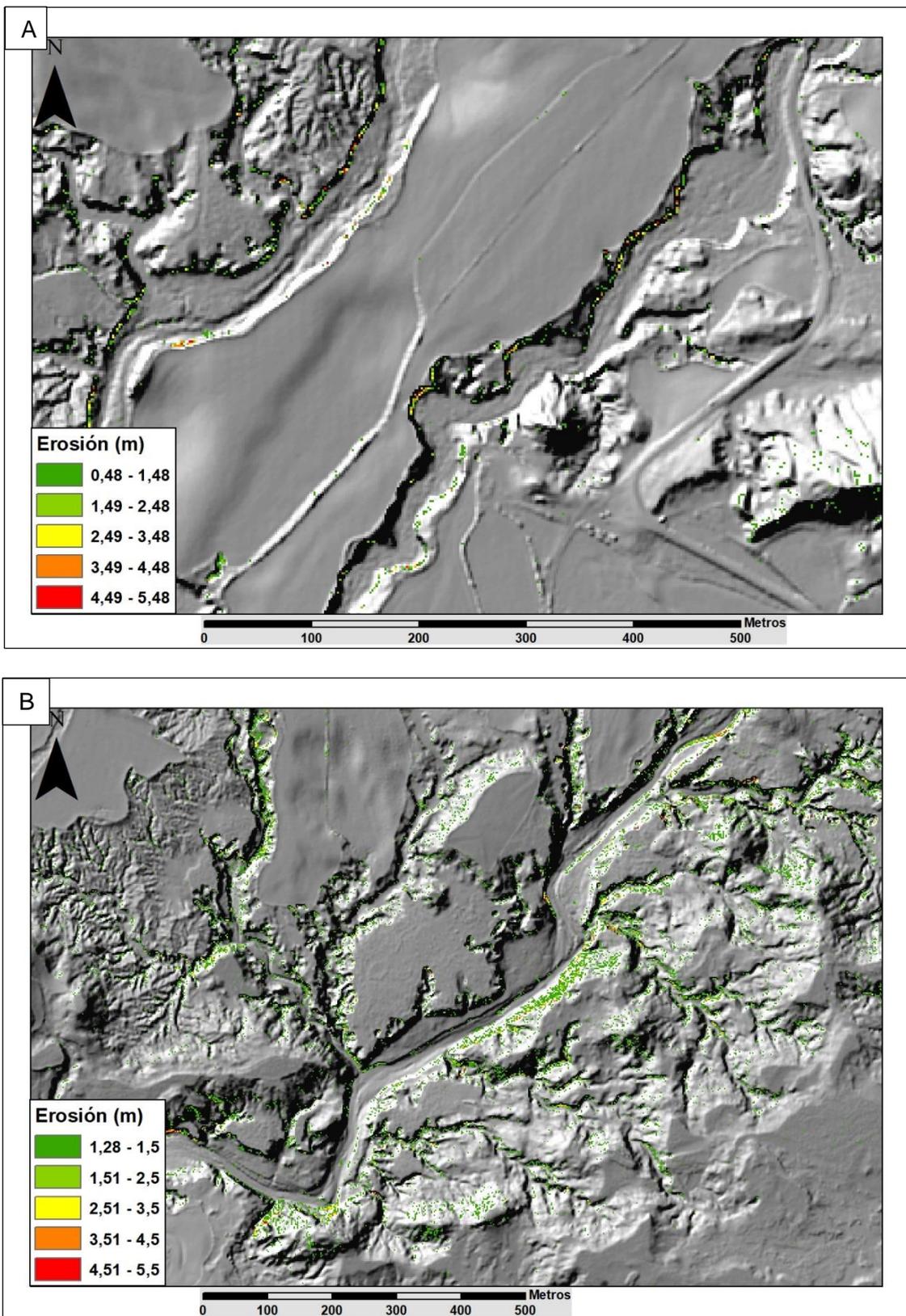


Figura 12. Erosión por *piping* producida entre 2011 y 2017 en los diferentes *gullies*, con variaciones de hasta más de 5 m debido al colapso de *pipes*: A-erosión causando un ligero ensanchamiento del barranco Grande; B-erosión del barranco Grande aguas arriba.

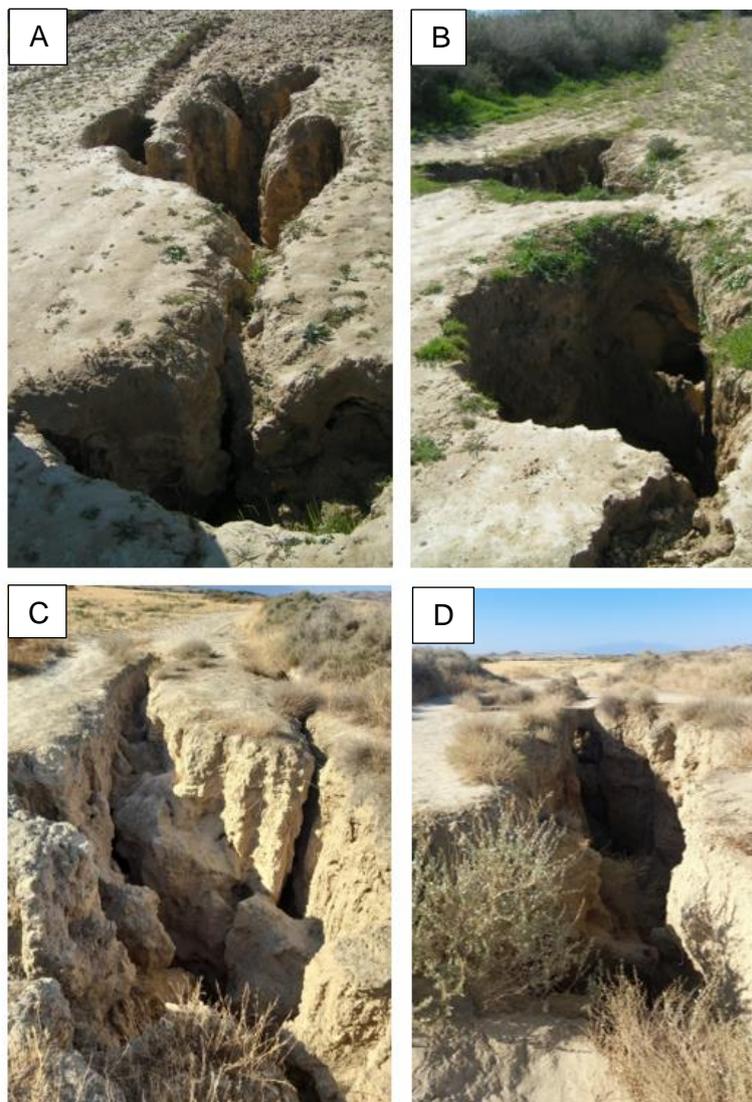


Figura 13. Evolución temporal de un *pipe* de escala métrica asociado al barranco Grande: A, B-estado del *pipe* en 2013 (foto: G. Desir, marzo 2013); C, D-estado actual en 2022. Se puede observar la gran rapidez con la que actúan los procesos de *piping*.

## 5. Discusión de los resultados

### 5.1. Factores condicionantes en la formación del *piping* en las Bardenas Reales

A pesar de la dificultad de predecir las zonas en las que se genera el *piping*, el estudio de las zonas en las que se ha reconocido dicho proceso mediante la caracterización morfogénica de los *pipes*, junto a la especificación de los factores que controlan el *piping* en las Bardenas Reales permiten saber en qué zonas se pueden producir procesos de *piping*, el mecanismo de formación y las dimensiones que se pueden esperar de dichos procesos. De modo que el desarrollo del *piping*, refiriéndose tanto a su mecanismo de formación como a sus dimensiones, está determinado por dos ambientes: los rellenos holocenos y los *gullies*.

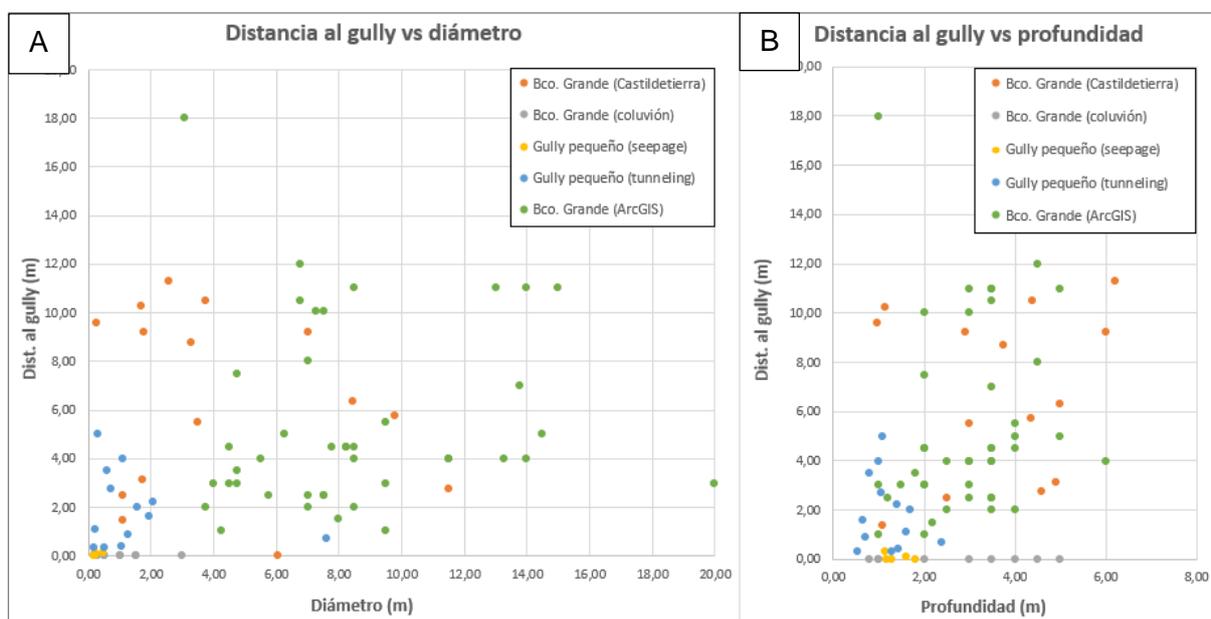
En el caso de los rellenos holocenos, como se ha dicho anteriormente, el *piping* se forma por *seepage*, presenta menores dimensiones y está asociado a los *rills*, presentando

una gran densidad. La infiltración del agua que permite su formación viene controlada por la pendiente y la presencia de fracturas de desecación. Estas fracturas que permiten que el agua percole se producen gracias al hinchamiento por absorción de agua y posterior contracción por desecación que sufren las arcillas gracias a la capacidad dispersiva que alcanzan por la gran presencia de cationes de Na<sup>+</sup>. El *piping* se encuentra limitado a la unidad masiva intermedia, limitado arriba y abajo por dos unidades laminares que presentan laminación algal impidiendo que el *piping* se desarrolle más allá de dicha unidad masiva (Desir y Marín, 2011). En el caso de que se formen pequeños *gullies* sobre los rellenos, los *pipes* que se desarrollan en sus márgenes adquieren formas muy verticalizadas y presentan una mayor longitud, pudiéndose desarrollar en la horizontal al llegar al contacto litológico.

En el caso de los materiales terciarios, debido a que tienen pendientes mayores a 30°, se ve reducida la infiltración de agua y en los meses de invierno se generan pequeños movimientos de masas, impidiendo el desarrollo de *piping*. Por lo tanto, el *piping* se encuentra limitado a los sedimentos en los márgenes de los grandes *gullies*. Este tipo de *piping* se da principalmente en la Fm. Tudela, afectando materiales miocenos. Se produce por *tunneling* a partir de grietas formadas por esfuerzos tensionales y presenta mayores dimensiones. Tanto el gradiente hidráulico necesario como las grietas que permiten la infiltración del agua están asociadas al *gully*. La magnitud y densidad viene determinada por la distancia al margen del *gully* y las dimensiones de éste. El diámetro y profundidad de los *pipes* tiene una relación directa con las dimensiones del *gully* e inversamente proporcional a la distancia al margen del *gully* (Desir y Marín, 2011). De modo que cuanto más próximo al *gully*, la densidad y dimensiones de los *pipes* tiende a aumentar.

## 5.2. Comparación con resultados de estudios previos en las Bardenas Reales

Con el fin de corroborar los resultados obtenidos se han realizado las mismas gráficas de distancia al *gully* frente a diámetro y profundidad (Fig.14), con las mediciones tomadas en una campaña de estudio previa (ANEXO IV) (Desir y Marín, 2011).



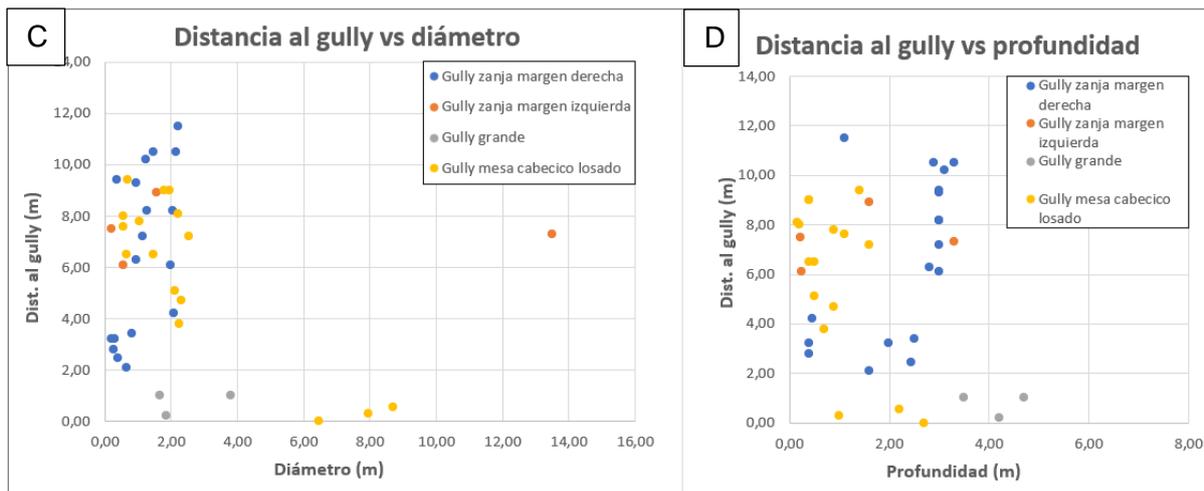


Figura 14. Relaciones entre distancia al *gully* y dimensiones de los *pipas* agrupados por zonas: A-distancia al *gully* frente al diámetro (estudio actual); B-distancia al *gully* frente a la profundidad (estudio actual); C-distancia al *gully* frente al diámetro (estudio previo); D-distancia al *gully* frente a la profundidad (estudio previo).

Las gráficas de estudios previos confirman lo mencionado anteriormente en los resultados. Por un lado, se pueden agrupar los *pipas* según la zona en la que se desarrollen, ya que en función del mecanismo de formación y las dimensiones del *gully* van a presentar diferentes características. Por otro lado, se confirma que existe cierto umbral por encima del cual los *pipas* tienen unas características y por debajo otras. En cuanto a la relación entre la distancia al margen del *gully* y las dimensiones de los *pipas* no está del todo clara, pero parece que los diámetros de los *pipas* tienden a ser mayores a distancias cortas del margen del *gully*, existiendo cierta relación inversamente proporcional.

Concluir que se ha demostrado mediante la erosión producida en el transcurso de 7 años obtenida a partir de la resta de DEMs y la evolución de un gran *pipe* en el barranco Grande tras 9 años mediante el registro fotográfico, que la erosión y evolución de los *gullies* producidos por procesos de *piping* en las Bardenas Reales, no solo sigue activa, sino que, además, se produce a una escala de tiempo muy corta. De modo que se trata de un relieve activo con una evolución muy rápida y se pueden apreciar grandes cambios con el transcurso de unos pocos años.

## 6. Conclusions

Piping processes play a fundamental role in the landscape evolution of Bardenas badland due to backward erosion drives to gully head retreat, widening the channel. Furthermore, piping is linked to rill erosion, so most surface and subsurface runoff is due to this process.

The main conditioning factors of piping in Bardenas are hydraulic gradient, slope, layer thickness, gully dimensions, soil sodium content, cracks density and stormy rainfall. These parameters allow cracks formation and enough infiltration to produce channel flow and erode the soil.

There are two different piping development mechanisms linked to the situation in which they develop. In the Holocene sediments the main mechanism is seepage. It's linked to rills and pipes have smaller dimensions due to small layer thickness. In gullies the main mechanism is tunneling, and pipes have bigger dimensions. Gully pipes dimensions depend directly on gully dimension and inversely on the distance between pipe input and the edge of the gully.

Temporal evolution of Bardenas badland occurs on a very fast scale, being noticeable after only a few years, as can be seen in the DEMs subtraction and in the photographic record.

## 7. Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a la directora del trabajo Gloria Desir del área de geodinámica externa de la Facultad de Ciencias geológicas en la Universidad de Zaragoza, ya que sin ella no hubiera sido posible llevar a cabo este trabajo.

En segundo lugar, agradecer a Penélope y Esra por la ayuda en la toma de datos de campo a la hora de medir los *pipes*.

## 8. Bibliografía

Benito, G., Gutiérrez, M., Sancho, C. (1993). The influence of physico-chemical properties on erosion processes in Badland areas, Ebro Basin, NE-Spain. *Geomorphology*, 37, 199-214.

Bernatek-Jakiel, A., Gutiérrez, F., Nadal-Romero, E., Jakiel, M. (2019). Exploring the frequency-size relationships of pipe collapses in different morphoclimatic regions. *Geomorphology*, 345, 106845.

Bernatek-Jakiel, A., Kacprzak, A., Stolarczyk, M., 2016. Impact of soil characteristics on piping activity in mountainous area under a temperate climate (Bieszczady Mts., Eastern Carpathians). *Catena*, 141, 117-129.

Bernatek-Jakiel, A., Poesen, J. (2018). Subsurface erosion by soil piping: significance and research needs. *Earth-Science Reviews*, 185, 1107-1128.

Bryan, R.B., Jones, J.A.A. (1997). The significance of soil piping processes: inventory and prospect. *Geomorphology*, 20, 209-218.

Chorley, R.J. (1978). The hillslope hydrological cycle. En: *Hill-slope Hydrology* (ed. M.J. Kirkby), Wiley, Chichester, 1-42.

Colino Polo, F. (2018). *Erosión por piping en las formaciones arcillosas terciarias de la provincia de Huesca*. Trabajo Fin de Máster. Universidad de Zaragoza.

Desir, G., Marín, C. (2011). Influencia de los procesos de *piping* en la evolución del modelado. Bardenas Reales (Navarra, España). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 37 (1), 67-78.

Faulkner, H. (2006). Piping hazard on collapsible and dispersive soils in Europe. In: Boardman, J., Poesen, J. (Eds), *Soil Erosion in Europe*. John Wiley and Sons, Ltd, Chichester, 537-562.

Faulkner, H., Alexander, R., Teeuw, R., Zukowskyj, P. (2004). Variations in soil dispersivity across a gully head displaying shallow sub-surface pipes, and the role of shallow pipes in rill initiation. *Earth Surf. Process. Landforms*, 29, 1143-1160.

Gallardo, A.H., Giaccardi, A., Aguilera, D. Battistino, Y.N., Martinez, A. (2017). Gully erosion and streams development in the Río Quinto Basin, Midwest Argentina. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 30, 21-30.

Gutiérrez, M., Sancho, C., Benito, G., Sirvent, J., Desir, G. (1997). Quantitative study of piping processes in badland áreas of the Ebro Basin, NE Spain. *Geomorphology*, 20, 237-253.

Gutiérrez, M., Sancho, C., Desir, G., Sirvent, J., Benito, G., Calvo, A. (1995). *Erosión Hídrica en Terrenos Arcillosos y Yesíferos de la Depresión del Ebro*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Universidad de Zaragoza, 389 pp., Zaragoza.

Hardie, M., Richard, D., Cotching, B., Duckett, T., Zund, P. (2009). *Dispersive soils and their management*. Tasmania Explore the possibilities.

Holden, J. (2005). Controls of soil pipe frequency in upland blanket peat. *J. Geophys. Res.*, 110, 1-11.

Jones, J. A. A. (2010). Soil piping and catchment response. *Hydrol. Process.*, 24, 1548-1566.

Jones, J.A.A., Richardson, J.M., Jacob, H.J. (1997). Factors controlling the distribution of piping in Britain: a reconnaissance. *Geomorphology*, 20, 289-306.

Marín, C. (2011). *Estudio de la erosión y morfologías resultantes en un área de clima semiárido (Bardenas Reales, Navarra)*. Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza.

Richards, K., Doerge, B., Pabst, M., Hanneman, D., O'Leary, T. (2015). *Evaluation and Monitoring of Seepage and Internal Erosion*. FEMA.

Sherard, J.L., Decker, R.S. (1977). *Dispersive Clays, Related Piping, and Erosion in Geotechnical Projects*. American Society for Testing and Materials.

Smart, R.P., Holden, J., Dinsmore, K.J., Baird, A.J., Billet, M.F., Chapman, P.J., Grayson, R. (2013). The dynamics of natural pipe hydrological behaviour in blanket peat. *Hydrol. Process.*, 27, 1523-1534.

Solé Sedó, J. (1976). *Mapa Geológico de España*, E. 1:50.000, Hoja 245 (Sádaba). Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 2.

Verachtert, E., Van Den Eeckhaut, M., Poesen, J., Deckers, J. (2010). Factors controlling the spatial distribution of soil piping erosion on loess-derived soils: A case study from central Belgium. *Geomorphology*, 118, 339-348.

Uchida, T., Kosugi, K., Mizuyama, T. (2001). Effects of pipeflow on hydrological process and its relation to landslide: A review of pipeflow studies in forested headwater catchments. *Hydrol. Process.*, 15, 2151-2174.

Uchida, T., Kosugi, K., Mizuyama, T. (2002). *Effects of pipe flow and bedrock groundwater on runoff generation in a steep headwater catchment in Ashiu, central Japan*. *Water Resources Research*, 38.

Uchida, T., Tromp-van Meerveld, L., McDonnell, J.J. (2005). The role of lateral pipe flow in hillslope runoff response: an intercomparison of non-linear hillslope response. *J. Hydrol.*, 311, 117-133.

Vannoppen, W., Verachtert, E., Poesen, J. (2017). Pipeflow response in loess-derived soils to precipitation and groundwater table fluctuations in a temperate humid climate. *Hydrol. Process.*, 586-596.

Verachtert, E., Van Den Eeckhaut, M., Martínez-Murillo, J.F., Nadal-Romero, E., Poesen, J., Devoldere, S., Wijnants, N., Deckers, J. (2013). Impact of soil characteristics and land use on pipe erosion in a temperate humid climate: field studies in Belgium. *Geomorphology*, 192, 1-14.

Wilson, G. V., Nieber, J. L., Sidle, R. C., Fox, G. A. (2012). Internal Erosion during Soil Pipeflow: State of the Science for Experimental and Numerical Analysis. *ASABE*, 56 (2), 465-478.

Wilson, G.V., Rigby, J.R., Dabney, S.M. (2015). Soil pipe collapses in a loess pasture of Goodwin Creek watershed. Mississippi: role of soil properties and past land use. *Earth Surf. Process. Landforms*, 40, 1448-1463.