

# Evaluación multidisciplinar 3D de una estructura kárstica asociada a colapso y subsidencia (Cuenca del Ebro)

*Multidisciplinary 3D evaluation of a karstic structure related to collapse and subsidence (Ebro Basin)*

Óscar Pueyo Anchuela<sup>1</sup>, Pedro López Julián<sup>2</sup>, Carlos L. Liesa<sup>1</sup>, Antonio M. Casas Sainz<sup>1</sup>, José Ángel Pérez Benedicto<sup>2</sup> y Andrés Pocoví Juan<sup>1</sup> y Javier Ramajo Cordero<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ciencias de la Tierra. C/ Pedro Cerbuna 12, 50009, Zaragoza, España.

opueyo@unizar.es, carluis@unizar.es, acasas@unizar.es, apocovi@unizar.es, javierramajo@gmail.com

<sup>2</sup> Escuela Universitaria Politécnica de La Almunia. Universidad de Zaragoza, España. C/ Mayor, s/n. 50100, Zaragoza.

pllopez@unizar.es, joanpebe@unizar.es

## ABSTRACT

*The propagation of solution cavities located below alluvial deposits produce surficial evidences that, in some cases, cannot be representative of their actual extension at depth. Cavity propagation through heterogeneous media, for example with interbedded cemented levels, can produce changes in the propagation of deformation producing the identification of cracks, collapses or subsidence zones at the surface. These processes can involve thousands of cubic meters of unstable materials. Any evaluation of mitigation tasks, in this context, needs to consider: i) the amplitude of the affected volumes and ii) the in depth origin with independence of the surficial recorded activity. In this work an integrated analysis is developed to evaluate the size and 3D structure of a sector with surficial evidences of karstic activity integrating geomorphological analysis, field inspection, geophysics (GPR) and boreholes.*

**Key-words:** Doline, mantled karst, 3d model, GPR, engineering geology.

## RESUMEN

*La propagación de cavidades de disolución localizadas por debajo de series aluviales genera una serie de evidencias cuya representación superficial, en ocasiones, puede no ser indicativa de su extensión real en profundidad. La propagación de cavidades a través de medios heterogéneos, en los que pueden existir niveles cementados, puede producir cambios en la progresión de dichas cavidades y la identificación en superficie de grietas, colapsos, o zonas de subsidencia que pueden involucrar decenas de miles de metros cúbicos de material inestable. Cualquier tipo de evaluación de soluciones mitigadoras en estos contextos debe considerar la amplitud de estos volúmenes y el origen del proceso con independencia de la actividad registrada en superficie. En este trabajo se aborda un estudio integrado con el objetivo de determinar la estructura de un sector con evidencias de actividad kárstica superficial y evaluar su extensión y desarrollo tridimensional integrando el análisis geomorfológico, de inspección de campo, geofísica (GPR) y sondeos.*

**Palabras clave:** Dolina, karst aluvial, modelo 3D, georradar, ingeniería geológica.

*Geogaceta*, 57 (2015), 43-46.  
ISSN (versión impresa): 0213-683X  
ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 30 de junio de 2014  
Fecha de revisión: 22 de octubre de 2014  
Fecha de aceptación: 28 de noviembre de 2014

## Introducción

La disolución de materiales evaporíticos localizados por debajo de depósitos aluviales produce, en condiciones superficiales, la aparición de geometrías de colapso y dolinas de subsidencia. En el sector central de la Cuenca del Ebro, la disolución afecta a materiales evaporíticos de la Formación Zaragoza. Esta unidad aflora de forma casi continua en ambos márgenes del río Ebro y se encuentra desde varios metros a varias decenas de metros de profundidad bajo la unidad aluvial actual y las terrazas fluviales del río Ebro.

La disolución produce cavidades dentro de las unidades solubles o despegues en el contacto aluvial/substrato. La expresión superficial de estos procesos depende de las dimensiones de cada cavidad y de las características reológicas de los materiales suprayacentes. Si el comportamiento es cohesivo, la cavidad puede persistir sin afección a las unidades superiores hasta la superación del umbral de resistencia, momento en el que se produce el colapso superficial. Si el material tiene un comportamiento no cohesivo, las capas localizadas por encima de una cavidad se irán acomodando a ésta, rellenándola y generando procesos de subsi-

dencia superficial. Las características de los materiales involucrados en el proceso kárstico configuran tanto el modo en que las cavidades se propagan a niveles superficiales como las formas generadas. La alternancia de niveles de diferente comportamiento puede producir modelos complejos en la propagación de cavidades, como ocurre en medios aluviales con niveles cementados intercalados. En este contexto, la evaluación desde superficie de los radios de afección y más aún de los volúmenes afectados por un proceso kárstico, puede ser compleja. En este trabajo se aborda un estudio en el entorno de Gallur, en el sector central de la

Cuenca del Ebro, en el que se identifican evidencias superficiales de un proceso de karst aluvial que afecta a una infraestructura lineal con desarrollo de subsidencia y grietas (Fig. 1).

Los objetivos principales son el análisis de la relación entre las evidencias superficiales, la serie geológica local y la determinación del rango de volúmenes afectados y extensión del proceso en superficie y en profundidad.

**Metodología**

Para la elaboración de este estudio se ha realizado un análisis geomorfológico basado en fotografías y ortofotografías aéreas desde 1927 a 2012 (fuente SITAR-Gobierno de Aragón), un vuelo propio de detalle realizado en mayo 2014, inspección visual y cartografía de indicadores superficiales, prospección geofísica por georradar extendida a lo largo de toda la zona accesible de prospección (CUI-2 Ramac; antenas de 100

y 250 MHz) y el análisis de tres sondeos con recuperación de testigo continuo. El uso del georradar fue seleccionado por mostrar una alta capacidad de identificación de procesos kársticos someros (ver por ejemplo Dobecki y Upchurch, 2006; Martín-Crespo y Gómez-Ortiz, 2007; Pueyo Anchuela *et al.*, 2011, y referencias allí incluidas). La prospección geofísica por georradar con el equipo de 100 MHz consistió en la realización de perfiles longitudinales en toda la zona de estudio y perpendiculares en los sectores con indicios superficiales de actividad (26 perfiles; 2167,5 m). En el caso del equipo de 250 MHz, la prospección se limitó a la zona de la carretera, con dos grupos de perfiles paralelos, unos longitudinales y otros perpendiculares (28 perfiles; 942,55 m).

El procesado de los datos consistió en amplificación de la señal con la profundidad, filtro de frecuencias fuera de rango, suavizado de los registros en zonas con desplazamiento irregular y ajuste de las velocidades de propagación a partir de 1) ajuste

de hipérbolas de difracción en los perfiles, y 2) comparación con los datos obtenidos de los sondeos.

**Resultados**

El estudio de las fotografías aéreas muestra un dominio compartimentado en campos agrícolas en los distintos vuelos previos a 1998 (p. ej., 1956; Fig. 1B). En 1998 se identifica una explanación en la zona y la existencia de hasta dos depresiones topográficas localizadas en el sector central de la zona analizada. Estas depresiones (Fig. 1C) desaparecen en las fotografías posteriores (2006; Fig. 1D). En el estudio realizado en 2014 (Fig. 1E), se identifican grupos de grietas concéntricas afectando al sector central de la carretera analizada y depresiones topográficas afectando a los niveles no construidos localizados inmediatamente al oeste de la carretera. Estas grietas y depresiones delimitan dos focos de subsidencia principales (Fig. 1E).

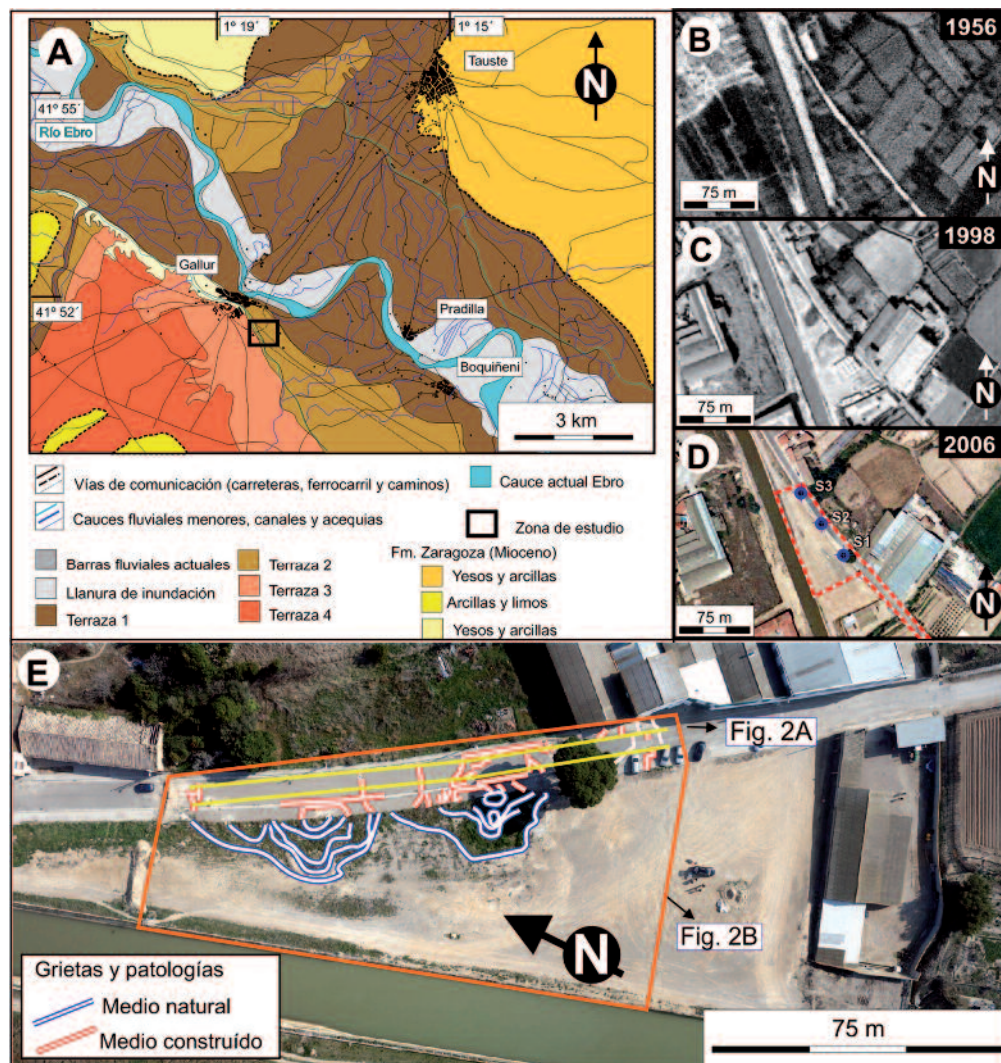


Fig. 1.- A) Mapa geológico de la zona de estudio (modificado de Castiella *et al.*, 1977). B, C y D) Fotografías aéreas de la zona de estudio tomadas en 1956 (B), 1998 (C) y 2006 (D); en D se incluye la localización de la zona analizada por georradar (línea discontinua) y los sondeos estudiados. E) Fotografía aérea realizada en 2013 de la zona tomadas con un sobre la que se incluyen las evidencias superficiales de deformación más significativas.

Fig. 1.- A) Geological map from the studied zone (modified from Castiella *et al.*, 1977). B, C and D) Aerial photographs from the studied zone taken in 1956 (B), 1998 (C) and 2006 (D); in D the location of the surveyed zone by GPR (dashed line) and the analyzed boreholes are included. E) Aerial photograph from 2014 taken from a drone with the main deformation surficial evidences marked.



Los perfiles de georradar (Fig. 2A) muestran un nivel superficial reflectivo que se extiende a cotas variables entre los 4 y los 12 m de profundidad. Bajo esta unidad aparece un medio mucho menos definido en el que se identifica un reflector inferior, a una cota similar en los distintos perfiles, y localizado por debajo de los 12 m. La geometría general de los depósitos muestra dispositivos en sección plano-cóncava (some-rización del contacto inferior del medio reflectivo o descenso del espesor de dicho medio) hacia los bordes SE y NO de los perfiles. Dentro de esta sección, se identifican medios homogéneos subhorizontales y profundizaciones repentinas del medio reflectivo superficial. Estos cambios de espesor aparecen asociados a cambios estructurales de alta pendiente en los reflectores, dibujando dispositivos geométricos de tipo colapso. La posición del contacto inferior del medio reflectivo se ha utilizado para realizar un modelo 3D (Fig. 2B). Este modelo permite identificar la presencia de dos sectores con profundizaciones progresivas del contacto inferior del medio reflectivo que representarían cubetas de amplio radio. En su interior se definen otras estructuras de menores dimensiones y limitadas por discontinuidades de mayor pendiente compatibles con colapsos.

Los sondeos realizados en la zona permiten identificar unos 12 m de espesor de aluvial con similar desarrollo en la zona (Fig. 2A). En el caso del sondeo más meridional (S1), aunque el espesor de aluvial es similar, se identifica un nivel superior de 6 m de materiales de aporte de origen antrópico y que produce una profundización de los contactos naturales. La serie del aluvial está com-

puesta por niveles de gravas e intercalaciones arenosas. Dentro de las gravas se identifican cementaciones carbonatadas que definen distintos niveles encostrados y que no presentan una correlación directa entre los distintos ensayos realizados. Por debajo de estas unidades, se identifica un nivel de arcillas de coloración pardo-rojiza y una serie margosa de coloración grisácea. Este nivel margoso se identifica en el entorno de los 12 m en los sondeos septentrionales (S2 y S3) y aparece desplazado en el caso del sondeo más meridional. Esta profundización es similar al desplazamiento de los contactos de las unidades del aluvial y del espesor de la unidad de rellenos superior.

El medio reflectivo identificado en el georradar parece seguir el contacto inferior de los materiales detríticos del aluvial, aunque en algunos casos este reflector bisela los cambios estructurales identificados en la unidad reflectiva. Este aspecto podría suponer una relación con el nivel freático en la zona y con el contacto más impermeable del techo de las arcillas pardas.

**Discusión y conclusiones**

El análisis comparado de los datos obtenidos del análisis geomorfológico, inspección visual y del modelo realizado a partir de la correlación de datos del georradar permite identificar dos depocentros relativos asociados a subsidencia y grietas marginales delimitando orlas concéntricas con movimiento de apertura centripeto. Sin embargo, tanto el estudio en profundidad realizado con georradar como los datos de sondeo revelan que en algunos casos las variaciones estructurales de reflectores o el

espesor de las unidades en los sondeos no muestra conexión con cambios en profundidad. Estas geometrías muestran, sin embargo, sectores donde se producen percolaciones verticales (zonas de colapso) con el desarrollo de orlas de subsidencia marginales y con disposición concéntrica con respecto a colapsos.

La propagación de cavidades desde el substrato puede ejemplificarse a través de varias situaciones (Fig. 3A): 1) propagación vertical de una cavidad en un medio rígido y desarrollo de un colapso superficial, o 2) propagación de la cavidad a superficie en un medio no cohesivo en el que se desarrolla una geometría gaussiana invertida (p. ej., Peck, 1969). Una tercera situación puede darse cuando existen niveles cementados intercalados en el aluvial y donde se producen conjuntamente acomodaciones plásticas, colapsos y migración del material no cementado (iii en Fig. 3A). Esta situación es la identificada en el caso estudiado (Fig. 3B) con una serie aluvial que presenta intercalaciones de niveles cementados por carbonato. El modelo 3D obtenido para la zona muestra (Fig. 3B): zonas subsidentes asociadas a geometrías en cubeta, limitadas por patologías, con menor compacidad relativa y ausencia de conexión vertical directa de estas estructuras con el substrato (S2 y S3) y geometrías de colapso que afectan a la totalidad de la serie analizada (caso del S1).

Cualquier evaluación de los riesgos asociados a este tipo de estructuras kársticas, pero también en la formulación de soluciones de estabilización, pasaría por una cuantificación de los volúmenes afectados o inestables asociados al proceso kárstico. Las

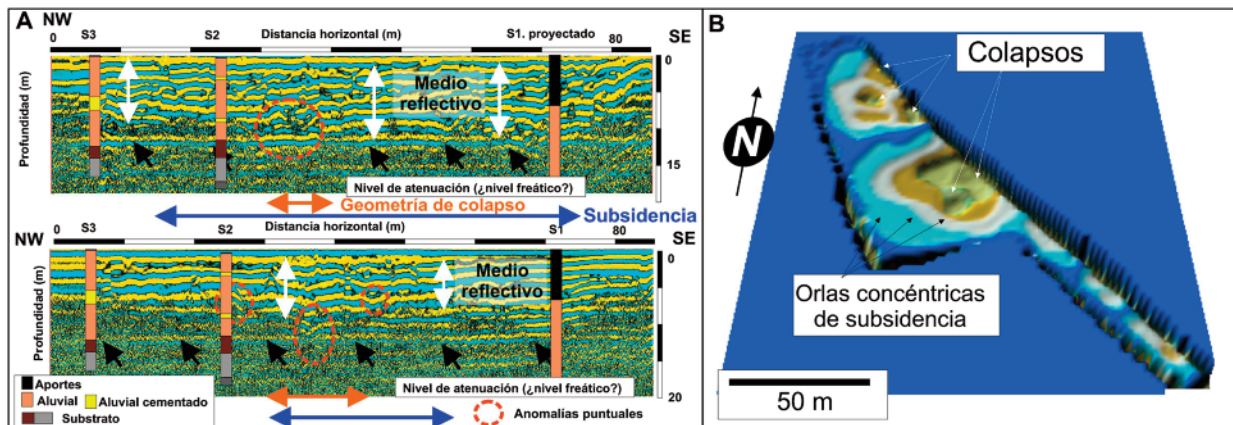


Fig. 2.- A) Perfiles de georradar realizados con antenas de 100 MHz donde se incluyen los sondeos y anomalías puntuales de alto contraste identificadas. B) Modelo de correlación realizado a partir de la interpolación de los contactos y geometrías identificados en los perfiles de georradar.

Fig. 2.- A) 100 MHz GPR profiles where boreholes and isolated high contrast anomalies are included. B) Model of lateral correlation of contacts and geometrical changes identified at the GPR profiles.

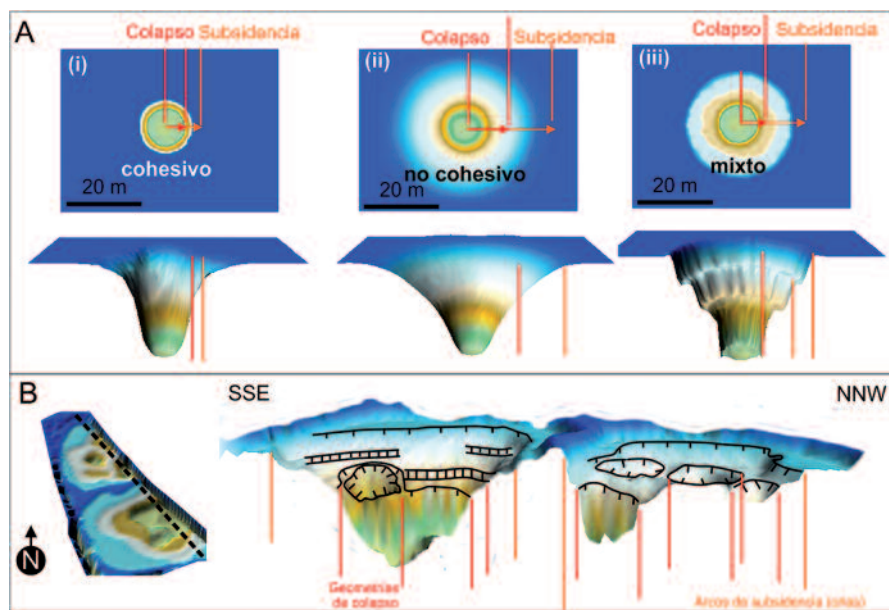


Fig. 3.- A) Modelos conceptuales de propagación de cavidades en el subsuelo para medios rígidos (i), medios heterogéneos (ii) y medios granulares con baja rigidez (iii). B) Modelo realizado a partir de los datos obtenidos en planta y en corte.

Fig. 3.- A) Conceptual models for cavity propagation at rigid (i), heterogeneous (ii) and with low cohesion granular medias (iii). B) Proposed model for the analyzed case at map and section view.

características exactas del proceso de propagación de las cavidades en un determinado contexto dependerán de la reología de los niveles involucrados, del volumen de la cavidad original, profundidad de la misma, etc. Estos factores preconfiguran el modelo de propagación (Fig. 3A), el radio superficial y tipología del fenómeno y los volúmenes de material desplazados. La sistematización de estos factores puede ser complicada. Sin embargo, para el caso analizado y con el objetivo de realizar una evaluación de las características y órdenes de magnitud en el que se producen este tipo de procesos, pueden realizarse análisis considerando las distintas tipologías de proce-

tos y los volúmenes involucrados en la propagación de cavidades en el subsuelo a partir de los modelos considerados (Fig. 3A) y de los resultados obtenidos en este trabajo (Fig. 3B).

Los modelos analizados en la figura 3A permiten evaluar los radios de extensión y volúmenes afectados dependiendo de los comportamientos cohesivo o no cohesivo del aluvial, pero también las situaciones intermedias como la analizada en este caso. Si se consideran las características geológicas de la zona (Fig. 4), una evaluación entre un medio completamente rígido y uno de comportamiento no cohesivo granular como el que se da aquí, se puede realizar una eva-

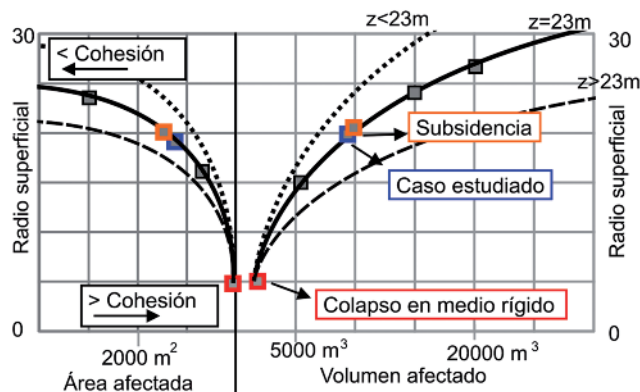


Fig. 4.- Relación entre las áreas, radios y volúmenes afectados en la propagación de una cavidad en medios con distintos comportamientos reológicos.

Fig. 4.- Relation between areas, radii and affected volumes in a cavity propagation through different rheological media.

luación volumétrica de los materiales afectados con una horquilla de volúmenes afectados de entre 3000 y 9000 m<sup>3</sup>. El caso analizado en este trabajo mostraría un volumen afectado similar al esperado para un cono de comportamiento plástico, aunque se han identificado colapsos aislados y niveles sin percolación vertical directa.

Estos valores ponen en consideración los volúmenes necesarios para ser analizados con el objetivo de estabilización, las profundidades que serían necesarias valorar y también los radios de extensión lateral en casos con comportamientos mixtos. Los cálculos obtenidos en la Fig. 4 pueden permitir, para el contexto local de estudio, una aproximación previa en la evaluación de los volúmenes afectados a partir de indicadores superficiales relacionados con procesos kársticos propagados desde el substrato de la zona y que suelen presentar menor extensión que los indicadores superficiales (p. ej., Pueyo Anchuela *et al.*, 2013).

**Agradecimientos**

Los autores quieren agradecer al Ayuntamiento de la Villa de Gallur la colaboración y disponibilidad de los datos aquí presentados. Esta investigación se enmarca dentro de los objetivos del Grupo de Investigación Geotransfer de la Universidad de Zaragoza. Los autores quieren agradecer los comentarios y sugerencias de los revisores Albert Casas y Andrés Carbó Gorosábel y de los editores de Geogaceta.

**Referencias**

Castiella Muruzábal, J., del Valle de Lersundi, J. y Ramírez del Pozo, R. (1977). *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 321 (Tauste) y memoria*. IGME, Madrid, 18 p.

Dobecki, T.L. y Upchurch, S.B. (2006). *The Leading Edge* 25, 336-341.

Martín Crespo, T. y Gómez Ortiz, D. (2007). *Environmental Geology* 53, 57-66.

Peck, R.B. (1969). Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground. En: *Proceedings of the 7th International Conference in Soil Mechanics Foundation*. Engineering, State of the Art vol., 225-250.

Pueyo Anchuela, Ó., Casas Sainz, A.M., Soriano, M.A., Pocoví Juan A. (2011). *Physics and Chemistry of the Earth, parts A/B/C* 36, 1211-1227.

Pueyo Anchuela, Ó., Pocoví Juan, A., Casas Sainz, A.M., Ansón-López, D. y Gil Garbí, H. (2013). *Geomorphology* 189, 135-149.