

REVISTA DE LA SOCIEDAD GEOLÓGICA DE ESPAÑA

Volumen 37 Número 1, Junio 2024

ISSN 0214-2708

Editora Principal
Nieves López González
Instituto Español de Oceanografía, CSIC



**Sociedad
Geológica
de España**

Revista de la SOCIEDAD GEOLÓGICA DE ESPAÑA

Revista semestral editada por la Sociedad Geológica de España

<http://www.sociedadgeologica.org>

ISSN: 0214-2708 (versión impresa)

ISSN: 2255-1379 (Internet)

Depósito legal: S.421-2012

Es una revista que recoge los artículos originales e inéditos enviados para su publicación a la Sociedad Geológica de España y seleccionados por el Comité Editorial, con el asesoramiento del Comité Científico y especialistas en la materia. También se recogen las réplicas realizadas después de la publicación de un artículo. La Sociedad Geológica de España no se hace responsable de las opiniones vertidas por las personas autoras de los artículos firmados. La propiedad intelectual atribuye a los/las autores/as la plena disposición y explotación de la obra creada, de acuerdo con las leyes vigentes. La Revista no puede ser reproducida, almacenada o transmitida en cualquier forma o por cualquier medio sin la autorización previa y escrita de la Sociedad Geológica de España. Su reproducción para fines docentes, de investigación o uso personal no requiere autorización previa.

EDITORA PRINCIPAL / EDITOR-IN-CHIEF

Nieves López González

Instituto Español de Oceanografía, CSIC
Centro Oceanográfico de Málaga
Puerto pesquero s/n, 29640 Fuengirola, Málaga (España)
Tel: +34 952 197 124; e-mail: nieves.lopez@ieo.csic.es

EDITORES ADJUNTOS / ASSOCIATE EDITORS

Alberto Pérez López

Departamento de Estratigrafía y Paleontología
Facultad de Ciencias, Universidad de Granada
Campus Fuentenueva, 18002 Granada (España)
Tel: +34 958 243 334; e-mail: aperezl@ugr.es

Aitor Cambeses Torres

Departamento de Mineralogía y Petrología
Facultad de Ciencias, Universidad de Granada
Campus Fuentenueva, 18002 Granada (España)
Tel: +34 958 246 611; e-mail: aitorc@ugr.es

Sonia García de Madinabeitia

Departamento de Mineralogía y Petrología
Facultad de Ciencia y Tecnología, Campus de Bizkaia
Barrio de Sarriena s/n, 48940 Leioa, Bizkaia (España)
Tel: +34 946 015 455; e-mail: sonia.gdm@ehu.es

SEDE EDITORIAL / EDITORIAL OFFICE

Sociedad Geológica de España:

Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca,
Plaza de la Merced s/n, 37008 Salamanca, España.
<http://www.sociedadgeologica.org>

COMITÉ CIENTÍFICO / SCIENTIFIC COMMITTEE

Alberto Pérez-López, Universidad de Granada (Spain)
Andrés Folguera, Universidad de Buenos Aires (Argentina)
Belén Oliva Urcia, Universidad Autónoma de Madrid (Spain)
Brendan Murphy, St. Francis Xavier University (Canada)
César Viseras Alarcón, Universidad de Granada (Spain)
David Gómez Gras, Universidad Autónoma de Barcelona (Spain)
Desirée Palomino Cantero, Instituto Español de Oceanografía (Spain)
Eduardo Zappettini, Servicio Geológico Minero de Argentina (Argentina)
Fco. Javier Hernández Molina, Royal Holloway. University of London (UK)
Francisco Pereira, Universidade de Évora (Portugal)
Francisco Serrano Lozano, Universidad de Málaga (Spain)
Graciela Delvene Ibarrola, Instituto Geológico y Minero de España (Spain)
Jorge Rabassa, Centro Austral de Investigaciones Científicas (Argentina)
José Antonio Ortega Becerril, Universidad Autónoma de Madrid (Spain)
José Brilha, Universidade do Minho (Portugal)
José Miguel Molina Cámara, Universidad de Jaén (Spain)
Juana Vegas Salamanca, Instituto Geológico y Minero de España (Spain)
Julia Cuevas Urionabarrenechea, Universidad del País Vasco (Spain)
Laura Domingo Martínez, Instituto de Geociencias (CSIC), Universidad Complutense de Madrid (Spain)
Luca Basilone, Università degli studi di Palermo (Italy)
Luis Vitor Duarte, Universidade de Coimbra (Portugal)
María José Huertas Coronel, Universidad Complutense de Madrid (Spain)
María Luisa Calvache Quesada, Universidad de Granada (Spain)
Mercedes Ferrer Gijón, Instituto Geológico y Minero de España (Spain)
Pablo G. Silva Barroso, Universidad de Salamanca (Spain)
Paul Wright, National Museum of Wales (UK)
Sila Pla Pueyo, Universidad de Granada (Spain)
Stephen Johnston, University of Alberta (Canada)
Teresa Román Berdiel, Universidad de Zaragoza (Spain)
Teresa Sánchez García, Instituto Geológico y Minero de España (Spain)

Imagen de portada:

Facies Buntsandstein donde se incrusta el Santuario de la Virgen de la Hoz, Geoparque Comarca de Molina de Aragón y el Alto Tajo.
Foto cedida por: Pilar Campos González

REVISTA DE LA SOCIEDAD GEOLÓGICA DE ESPAÑA



Vol. 37 (1) (2024)



CONSIDERACIONES HISTÓRICAS SOBRE EL ORIGEN DEL CONCEPTO DE FACIES SEDIMENTARIA

Some historical regards concerning the origin of the concept of sedimentary facies

Cándido Manuel García Cruz

INHIGEO, c/Llobet, 29, La Laguna, 38296 Santa Cruz de Tenerife. candidomgc@gmail.com

Resumen: Se analiza tanto el origen como el significado del concepto de facies aplicado a las formaciones sedimentarias. Este término fue acuñado por el geólogo suizo Amantz Gressly en 1838 a partir de sus estudios en el macizo del Jura Oriental, al norte de los Alpes. Gressly tuvo en cuenta las dimensiones horizontales y verticales de los estratos, y junto con el contenido lítico también incluyó el componente paleontológico. De esta forma, se podían deducir las características ambientales del medio de sedimentación, y los factores tectónicos, que habrían condicionado su formación y, por otro lado, establecer las características paleogeográficas y paleoecológicas de una región, bajo los principios de la causalidad natural y del actualismo. Con anterioridad, durante los siglos XVII, XVIII y XIX, algunos autores habían señalado la importancia de considerar los restos fósiles para entender mejor las formaciones sedimentarias. En los primeros años, se estaban definiendo las principales unidades de la columna geológica y, al mismo tiempo, se estaba abandonando la corriente neptunista. La Geología necesitaba, pues, un nuevo marco teórico en el que desarrollar las nuevas investigaciones. Gressly, con su definición de facies, puso los cimientos de un nuevo sistema para entender el registro estratigráfico.

Palabras clave: Facies sedimentaria, Amantz Gressly, macizo del Jura, historia de la Geología, siglo XIX.

Abstract: Both the origin and the meaning of the concept of facies when applied to sedimentary formations are discussed. This term was coined by the Swiss geologist Amantz Gressly in 1838, from his studies in the East Jura massif, north of the Alps. Gressly considered the horizontal and vertical dimensions of the strata, and along with the lithic content he also included the palaeontological component. Thus, on the one hand, it could be deduced the environmental features of the sedimentary environment, as well as the climatic conditions and the tectonic factors that would have conditioned its formation, and, on the other hand, establishing the palaeogeographical and palaeoecological characteristics of a region based upon the principles of natural causality and actualism. Previously, during the 17th, 18th, and 19th Centuries, some authors such as John Woodward, in 1695, in different areas of England, and Benoît de Maillet, in 1748, on the Mediterranean coasts of North Africa, based upon the Neptunism's catastrophist ideas, had pointed out the importance of considering the fossil remains for better understanding sedimentary formations. In the early 19th century, George Young and John Bird, studying the Yorkshire coast, in 1822, had also observed the horizontal connection between some parts of many of the strata, but not as a whole in relation to the fossils. In those years, the major units of the geological column were being defined, and at the same time the Neptunist current was being abandoned. Geology therefore needed a new theoretical framework in which to develop the new researches. Gressly laid the foundations for a new way of understanding the stratigraphical record with his definition of facies.



Keywords: *Sedimentary facies, Amanz Gressly, Jura Massif, history of Geology, 19th Century.*

García Cruz, C.M., 2024. Consideraciones históricas sobre el origen del concepto facies sedimentaria. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 37 (1): 3-9.

Introducción

El término *facies* aplicado a los procesos sedimentarios (expresado así a partir de ahora como simplificación de *facies sedimentaria*), ha constituido un concepto fundamental en el desarrollo de las Ciencias de la Tierra. Su definición fue clave a partir del siglo XIX para la evolución de varias disciplinas como la Sedimentología, la Estratigrafía, la Paleontología, la Paleoecología, la Paleogeografía, o la Paleoclimatología. La Geología, en general, pasó de ser una ciencia meramente descriptiva, a convertirse en una ciencia histórica: el término *facies* constituye uno (el segundo desde el punto de vista epistemológico) de los cuatro conceptos que engloba la idea de *tiempo geológico*, que, junto con *cambio*, *relación causal* y *cronología*, conforman los pilares básicos para comprender la edad de los materiales terrestres.

Desde el siglo XVII, y en especial ya a principios del siglo XIX, se había venido observando con bastante regularidad que, en una formación geológica, los aspectos petrológicos y paleontológicos solían estar asociados, y que por lo general excluían géneros y especies cuando se trataba de formaciones distintas. Este contraste entre los tipos de rocas y de fósiles se atribuía a una diferencia en el ambiente físico en que se habían originado las distintas formaciones, lo que venía a significar que ciertos organismos se correspondían con un determinado medio de vida en particular. En el caso de los restos orgánicos, se trataba de distinguir entre los que William Smith había denominado *fósiles organizados* para cada estrato, con los que se podían caracterizar distintas formaciones sedimentarias (Smith, 1816, 1817), de gran utilidad para el establecimiento de la edad relativa de una secuencia estratigráfica, y aquellos otros fósiles que, habiendo vivido en un medio limitado espacialmente, ayudaban a reconstruir antiguas geografías. Estos últimos son los que pasarían a llamarse *fósiles de facies*, que, con una mayor precisión, ayudan a explicar antiguos ambientes, sobre todo si todavía poseen representantes actuales. Se trata, por lo tanto, de especies que permiten realizar una aproximación más real y significativa a las condiciones ambientales. Esto está sujeto a que las especies antiguas y las actuales que se estén considerando, sean lo suficientemente cercanas como para haber tenido condiciones ambientales similares, aunque esto no deja de ser una condición necesaria, pero no suficiente. La causa de dicha diferencia en relación con los tipos de fósiles permanecía desconocida, pero se aceptaba implícitamente en la posible existencia de un principio estratigráfico que hasta esos años no se había llegado a establecer con precisión. Dicho principio suponía que las formaciones que ocupaban el mismo lugar en una secuencia continua, debían tener un aspecto que contrastaba de forma brusca con las equivalentes en otras áreas, y que dicho contraste se debía, sin

duda, a que se habían depositado simultáneamente, pero en emplazamientos distintos, bajo condiciones diferentes. Este principio acabaría, con el tiempo, imponiéndose, porque en su aplicación práctica facilitaba las observaciones y las investigaciones, y permitía explicaciones análogas ante formaciones que distaban bastante, tanto en el espacio como en el tiempo. De esta forma, al no poder carecer o prescindir de estas relaciones espaciotemporales, la Estratigrafía se convirtió en un medio para reconstruir paleogeografías y paleoambientes.

En todo este devenir de diferentes ramas de la Geología, el término *facies* sobresale unificando criterios metodológicos. En los párrafos que siguen se hará una síntesis histórica sobre cómo llegó a concretarse el concepto de *facies*.

La idea de facies: Primeras aproximaciones

A finales del siglo XVII, el médico británico John Woodward, en la disertación inicial que abre su ensayo para explicar la historia natural de la Tierra, bajo los fundamentos diluvistas del Neptunismo, ya hablaba de restos de organismos *litorales* y *pelágicos* que debían haberse originado y desarrollado en distintas zonas del mar, y que eran considerados “trofeos” de otros seres que vivieron en el pasado, y no simples piedras (Woodward, 1695: 15-33). Cincuenta años más tarde, a mediados del siglo XVIII, apareció en Ámsterdam un libro anónimo titulado *Tellamed* (1748), obra póstuma del diplomático francés Benoît de Maillet sobre sus estudios geológicos en la cuenca del Mediterráneo durante las primeras décadas de ese siglo. Maillet (1748: *première journée*), en sus investigaciones sobre los terrenos litorales, incluía la composición de los materiales y los organismos que contenían, así como su aspecto externo, en ambos casos. Siguiendo también las bases neptunistas propias de la época, planteaba que todas las características de la corteza terrestre se habían debido a la acción de las aguas del mar, con un ascenso y descenso cíclico de los niveles marinos, por avance y retroceso de estas aguas como consecuencia del aporte hídrico (por lo general catastrófico, tipo diluvio o inundación) y la evaporación. Esto implicaba que debían existir diferencias significativas en los límites mar-tierra a lo largo del espacio y del tiempo, pero también en las condiciones en las que habían ocurrido los depósitos sedimentarios. Maillet reconoció la existencia de distintos tipos de materiales de origen sedimentario (conglomerados, calizas, areniscas, mármoles, brechas...), y, al mismo tiempo, identificó diferentes restos biológicos de organismos (especialmente, conchas de moluscos, corales...), que debían haber habitado zonas litorales muy distintas. Las ideas de ambos naturalistas se podrían interpretar como un precedente de los ya citados *fósiles de facies*.

Ya en el siglo XIX, George Young y John Bird publicaron un examen geológico de la costa de Yorkshire, al norte de Inglaterra. En la tercera parte de su obra, en relación con la naturaleza de los afloramientos, señalaron que algunas partes de los estratos estaban tan interconectadas, que a menudo pasaban de una a otra, ocupando el mismo lecho sin solución de continuidad (Young y Bird, 1822: 291), pero estos autores no habían considerado globalmente el componente lítico con los restos orgánicos, lo que tampoco había sido expresado en el siglo XVII por Nicolas Steno en su principio estratigráfico sobre la *continuidad lateral de los estratos* (Steno, 1669: 30), a pesar de que alcanzaría una gran relevancia para el devenir de la Estratigrafía.

Pero ni Steno, Woodward o Maillet, así como tampoco Young y Bird, fueron más allá de estos reconocimientos, interpretaciones e inferencias. Sin duda, no fueron los únicos antecedentes cuyos escritos encierran una idea algo rudimentaria de lo que posteriormente se denominaría *facies*. En cualquier caso, este concepto no se concretaría de forma clara y explícita hasta la primera mitad del siglo XIX, sobre todo a partir de los trabajos del naturalista suizo Amanz Gressly (1814-1865) con las investigaciones que había desarrollado en la cadena montañosa del Jura, al norte de los Alpes.

La aportación de Gressly al concepto de facies

Gressly: “le géologue jurassien”

Amanz Gressly (Fig. 1) había nacido el 17 de julio de 1814, en Bärschwil (cantón Soleure [Solothurn], Suiza)¹. Descartada la carrera eclesiástica que su familia deseaba para él, había iniciado sus estudios de medicina en Estrasburgo. En esta universidad, a principios de la década de 1830, asistió a unas conferencias sobre Geognosia impartidas por el francés Phillip L. Voltz. Bajo la influencia de éste, así como del geólogo franco-suizo Jules Thurmann, Gressly abandonó la medicina en 1834 y se dedicó, con auténtica pasión y de forma autodidacta, a sus trabajos geológicos sobre el Jura suizo, estudios que ya había comenzado Thurmann unos años antes. Aquí se dieron dos circunstancias importantes para la evolución de la Geología: por un lado, fue la época en la cual se estaban definiendo las principales unidades de la columna geológica, lo que hacía imprescindible una mejora cualitativa en los argumentos empíricos. Por otro lado, ya había comenzado desde finales del siglo XVIII, pero sobre todo en los primeros años del siglo XIX, el abandono de la corriente werneriana que se dictaba en la Academia de Minas (*Bergakademie*) de Freiberg, doctrina sumida en el Neptunismo que abogaba por la universalidad de las formaciones geológicas, y la simultaneidad de los depósitos sedimentarios. Esta ruptura requería un nuevo modelo teórico para el desarrollo de la



Fig. 1.- Retrato de Amanz Gressly, en 1860. Dibujo de Hans Hasler (en Hartmann, 1868: [215]). [Dominio público].

ciencia de la Geología, un nuevo marco dentro del cual Gressly llegaría a establecer los cimientos de una nueva Estratigrafía.

En plena juventud, antes de cumplir los veinticinco años, Gressly publicó un trabajo titulado *Observations géologiques sur le Jura soleurois*, que ampliaría en los años siguientes (Gressly, 1838, [1838-1841]). A partir de entonces, se le empezó a conocer en esos medios científicos como “le géologue jurassien”. Dicha investigación, junto con una extraordinaria colección de rocas y fósiles que había ido reuniendo, llamaron la atención de su compatriota y colega Louis Agassiz, a la sazón profesor de Historia Natural en la Universidad de Neuchâtel. Agassiz se dedicaba fundamentalmente a la Glaciología, la Paleontología y la Anatomía Comparada, y lo contrató como ayudante; pero la realidad fue bien distinta a lo que se había imaginado Gressly: Agassiz se aprovechó de sus habilidades como investigador y de su colección de fósiles en su propio beneficio; tal fue así que cuando Agassiz marchó a Estados Unidos a principios de los años 1840 (donde se instalaría definitivamente al ser nombrado profesor en la Universidad de Harvard), se llevó consigo buena parte de los fósiles de Gressly, así como numerosos datos inéditos de sus investigaciones, aunque siempre hizo referencia a su ayudante en las publicaciones correspondientes, pero nunca como coautor. Este “abandono” agudizó la fuerte depresión que Gressly ya venía arrastrando, lo que le obligó desde 1845 a pasar largas temporadas en un sanatorio.

A principios de los años 1850 trabajó como geólogo para la compañía Schweizerische Centralbahn durante la construcción de varias líneas ferroviarias que atravesaban el macizo del Jura, con el fin de inspeccionar la estructura de los túneles. En 1859 estudió los litorales más recientes de la Riviera francesa, y descubrió diferentes zonas eco-

¹ Sobre la vida y la obra de Amanz Gressly, véanse, principalmente: Cross y Homewood (1997), García Cruz (2018), Hartmann (1868), Johnson (2002), Lederman (1965), Markovic (1960), Meyer (1966), Moore (1949), Nelson (1985), Rat (1978), Rudwick (2008: 457-460), Schaer (1994), Schneer (1981), Stampfli (1986), Tikhomirov (1968), Wegmann (1962-1963), Welland (2009: 186-187) y Zittel (1899: 665-667).

lógicas que ya había deducido en sus observaciones sobre el Jura durante su etapa como estudiante. A comienzos de los años 1860 participó como geólogo en dos expediciones suizas, una al Cabo Norte (Noruega) y otra a Islandia.

Tras el agravamiento de sus problemas mentales, Gressly falleció de un derrame cerebral el 13 de abril de 1865, en el Hospital Psiquiátrico de Waldau, a las afueras de Berna. Está enterrado en Verenaschlucht, cerca de Solothurn (Suiza), sepultado bajo algunas piedras de su colección, con una lápida sufragada por sus amigos que contiene un epitafio en latín:

*Gresslyus interiit lapidum consumptus amore.
Indique collectis non fuit hausta fames. Ponimus
hoc saxum. Mehercle! Totus opertus, Gresslyus hoc
saxo, nunc satiatus erit.*²

Evolución de su concepto de facies

En la primera parte de su trabajo sobre el Jura suizo de 1838 [1838-1841], Gressly no se limitó solamente a establecer las subdivisiones geológicas en vertical del Jurásico de la región, sino que consideró también las dimensiones horizontales de estas formaciones y su progresión lateral. Con esta perspectiva percibió claramente las variaciones litológicas y paleontológicas que habían quedado expuestas en los materiales, en los depósitos de dichos afloramientos de localidades adyacentes, con la misma edad geológica, donde aparecían excluidos determinados géneros y especies que, en principio, deberían haber coexistido. Fue así, a partir de la comparación de las rocas y de los fósiles exclusivos de cada terreno, cómo el naturalista suizo elaboró el concepto de *facies*, y lo introdujo como un nuevo término en el lenguaje geológico.

Expresado en sus propias palabras:

*«...d'abord il est deux faits principaux, qui caractérisent partout les ensembles de modifications que j'appelles facies ou aspects du terrain: l'un consiste en ce que tel ou tel aspect pétrographique d'un terrain quelconque suppose nécessairement, partout où il se rencontre, le même ensemble paléontologique; l'autre, en ce que tel ou tel ensemble paléontologique exclut rigoureusement des genres et de espèces de fossiles fréquents dans d'autres facies»*³ (Gressly, 1838 [1838-1841]: 11; énfasis original).

A pesar de que Gressly no especificó la etimología del término, resulta evidente que utilizó la palabra latina *facies* (de *facio*: rostro, faz, cara), con las acepciones, en

este caso, de *apariencia externa, forma, aspecto, hechura, condición*.

En relación con el componente biológico, las observaciones meticulosas del geólogo suizo concluyeron a modo de distintas leyes o reglas generales, que, en síntesis, las expresó de la siguiente forma: si, casualmente, ciertos géneros y especies propios de una facies, aparecen en otra facies distinta, estos individuos son mucho más raros, y están menos desarrollados y caracterizados que en la facies a la que pertenecen por derecho propio, y donde aparecen en mejor estado de conservación. En el caso de que dos facies presentaran características petrológicas mixtas, el conjunto paleontológico también lo sería. Es evidente que estas características coinciden con la ley que se había utilizado para establecer y definir los distintos eslabones de la columna geológica. Gressly estaba convencido de que todas las diferencias orgánicas e inorgánicas que definían una determina facies estaban sujetas a las condiciones climáticas que habían determinado, a su vez, su formación, cuyo origen se habría visto influido, además, por factores mecánicos o químicos, tal y como él había interpretado a partir de sus observaciones en el macizo del Jura.

A este respecto, Gressly levantó varios mapas y secciones del terreno (muchos de ellos coloreados) en los que reconstruía la paleogeografía y la paleoecología de la región suiza del Jura Oriental (Gressly, [1838-1841]). En la lámina VI, como ejemplo gráfico (Fig. 2), explicaba las condiciones ambientales que reinaban en los antiguos medios de sedimentación, tomando como referencia, entre otros aspectos, los bancos de esponjas, corales y moluscos fósiles pertenecientes al Jurásico Superior. En este mapa están señalados los arrecifes coralinos de aguas someras (*littorale*), y de ambientes de aguas profundas (*subpélagique*), así como antiguas zonas insulares (*Île Herzynienne*) al noreste, donde aparecen las rocas más antiguas; al sur, en la periferia, se indican varias líneas de retroceso litoral (*rivage*). Los colores representan diferentes tipos de facies: violeta, *lías*; rojo, *oolito inferior*; azul, *oxfordiano*; amarillo, *coraliano* y *portlandiano*; verde, *molasa*.

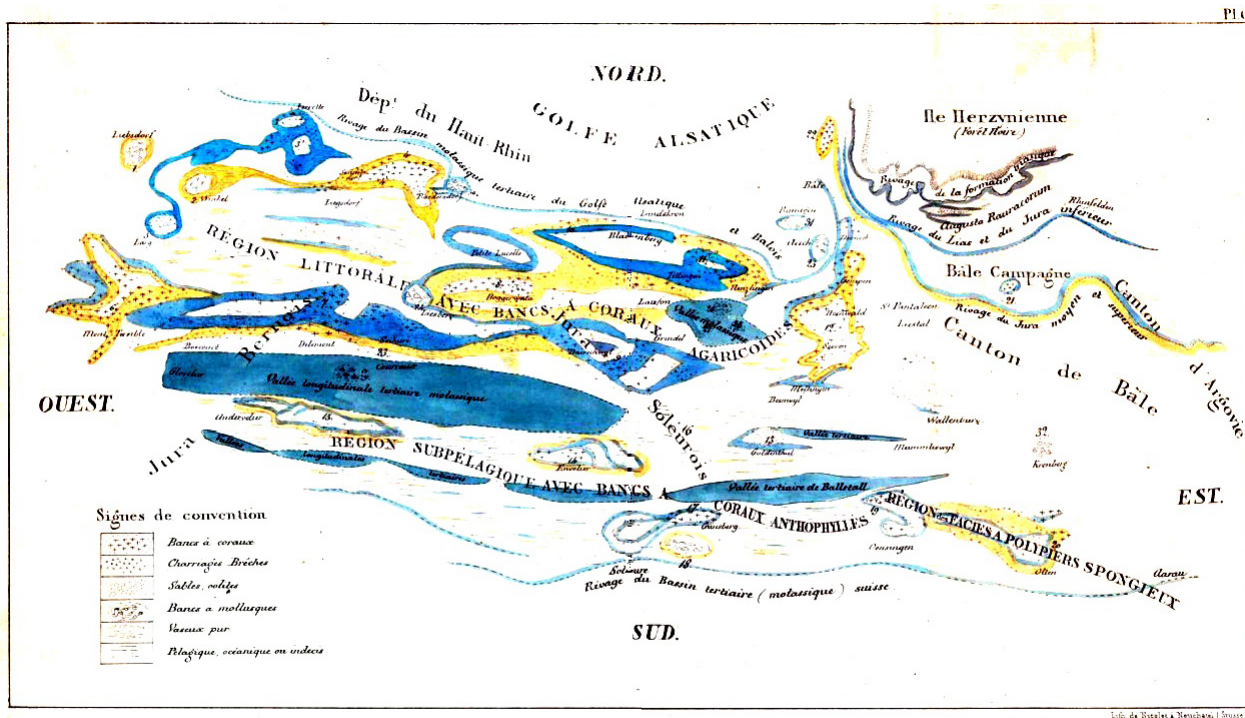
Este mapa fue uno de los primeros ejemplos de geohistoria con el máximo detalle dentro de la Estratigrafía, y se convirtió en modelo y precedente para muchos otros estudios de este mismo tipo que se harían en las décadas siguientes.

Impacto en la comunidad científica y evolución del concepto

Al final de la primera mitad del siglo XIX, el geólogo francés Constant Prévost había trabajado también sobre los mismos aspectos sedimentarios que Gressly, discutiendo las acepciones de diversos términos estratigráficos. Mediante una deducción *teórica*, racional y uniformitarista, había llegado al origen de las formaciones en relación con su edad, pero solo con los atributos físicos (Prévost, 1839, 1845). Como se ha visto, Gressly había establecido *empíricamente* la definición de facies incorporando al componente lítico el contenido paleontológico, algo que no hizo Prévost. Lo que tampoco hizo Prévost en esos trabajos fue citar a Gressly ni el término facies.

2 Gressly pereció consumido por el amor a las piedras. Las recogió de todas partes, sin aplacar su avidez. Erigimos esta roca. ¡Por Hércules! Completamente enterrado, Gressly estará ahora satisfecho con ella (traducción nuestra).

3 «...en primer lugar existen dos hechos principales, que caracterizan a todos los conjuntos de cambios que yo llamo *facies* o *aspectos del terreno*: uno consiste en que un determinado *aspecto petrográfico* de cualquier terreno supone necesariamente, en cualquier sitio donde se encuentre, el mismo conjunto paleontológico; el otro, que cualquier conjunto paleontológico excluye rigurosamente las clases y especies de fósiles comunes en otras facies» (traducción nuestra).



CARTE DES BANC A CORAUX ET A MOLLUSQUES DU JURA BERNÉS ET SOLEUROIS.

Fig. 2.- Mapa de los bancos de corales y moluscos del Jura bernés y soleurés (Gressly, [1838-1841]: lámina VI; descripción original: 235-236). [Dominio público].

El concepto de facies fue bien aceptado, en términos generales, por los naturalistas durante la segunda mitad del siglo XIX, lo que se vería reforzado a su vez por la difusión del término que hizo el geólogo alemán Johannes Walther en su monumental trabajo de 1894 *Einleitung in die Geologie als historische Wissenschaft*, reconociéndose además su ineludible importancia para la historicidad de la Geología. Por facies se entendía, según su propia apreciación y siguiendo a Gressly, las características distintivas de las rocas formadas al mismo tiempo, más aún, el conjunto de las propiedades primarias de una roca (Walther, 1894, tomo 2: 989), deduciéndose asimismo que los sedimentos contenían un registro de los climas primitivos que habrían determinado las condiciones en que se originaron (Walther, 1894, tomo 3). En ambos casos, al añadir a estos estudios el conjunto de fósiles presentes, se dotaba de una clara secuenciación a los terrenos correspondientes en tanto que iban a constituir rasgos de gran utilidad para la interpretación histórica.

Años más tarde, ya a lo largo del siglo XX, este término adquirió varios significados diferentes según fuese utilizado entre geólogos, petrólogos, paleontólogos, e incluso ecólogos, lo que provocó una cierta confusión en la definición. El concepto, sin embargo, en su significado original, permitía deducir, tal y como se ha analizado, tanto el ambiente como las condiciones de formación de las rocas sedimentarias de acuerdo con sus características petrográficas en relación con las asociaciones de grupos fósiles. De esta forma, se ha podido llevar a cabo el estudio del marco deposicional y paleogeográfico de las unidades sedimentarias. Además, esta combinación de datos litológicos y pa-

leontológicos ha contribuido a proporcionar una profunda perspectiva histórica a la Estratigrafía, perspectiva a la que hay que añadir el hecho de que los sedimentos contienen un registro de los climas primitivos que habrían determinado las condiciones en que se originaron. Como ya se ha comentado, la facies se ha convertido en uno de los pilares básicos para la interpretación de los ambientes sedimentarios así como para la comprensión del concepto de tiempo geológico, señalando el conjunto de estratos, rocas y fósiles, con mayor precisión, como si se tratara de las páginas y las palabras del Libro de la Naturaleza, con lo que le es posible al especialista leer, interpretar, comprender, y reconstruir, con un sentido histórico tanto regional como global, el pasado de la Tierra dentro de la metodología actualista y de la causalidad natural (actualmente, dentro del Neocatstrofismo)⁴.

En relación con la autoría de este término, Teichert (1958), y, a partir de él, otros autores, sostuvo que facies había sido introducido en la literatura geológica por el naturalista danés Nicolas Steno en el *Prodromus* (1669), su obra más conocida que versa sobre la geología de la Toscana. Efectivamente, el término *facies* aparece varias veces en esta pequeña obra de Steno (1669: 32, 68-71, 74), pero su significado no tiene nada que ver con el que sería utilizado por Gressly: el *Prodromus* está escrito en latín,

4 Como es de suponer, a lo largo de casi doscientos años, han surgido aproximaciones críticas en relación con el significado y alcance del término facies sedimentaria. Puesto que esto queda fuera del propósito del presente trabajo, remitimos especialmente a la excelente revisión de Feng (2019) a este respecto.

por lo que era *inevitable* que apareciese este término en un trabajo geológico sobre las zonas superficiales y cortes visibles de la Toscana; en su significado etimológico más simple, Steno lo aplicó solo al *aspecto* externo de las rocas y de las montañas, *excluyendo los fósiles*, a pesar de que el naturalista danés sí los observó y los discutió como restos de organismos que vivieron en el pasado, pero nunca los asoció como una unidad junto con las rocas. Este término no tuvo, por otro lado, en la obra de Steno ni el significado ni la relevancia históricos que se le daría a partir de los trabajos de Gressly, más de doscientos años después.

Conclusiones

1. El término *facies* fue acuñado e introducido en el lenguaje geológico en 1838 [1838-1841] por el geólogo suizo Amantz Gressly a partir de sus estudios sobre el macizo del Jura oriental.

2. Facies engloba el componente lítico, así como el contenido paleontológico de una formación.

3. El análisis apropiado de la facies de un terreno le permitió a Gressly determinar el ambiente y las condiciones en que se originaron los depósitos sedimentarios, tanto en su dimensión horizontal como vertical, lo que facilitó la reconstrucción de las paleogeografías de una región, basándose al mismo tiempo en la causalidad natural y en el actualismo.

4. Estas explicaciones novedosas le proporcionaron a la Estratigrafía un nuevo marco de referencia, fuera del Neptunismo, con un valor geohistórico del que carecía, ampliando de este modo su contribución a la elaboración de la columna geológica.

5. Facies representa las huellas que han dejado en los sedimentos los cambios experimentados por la Tierra en su devenir como planeta, por lo que constituye, junto con cambio, sucesión causal y cronología, uno de los pilares básicos para comprender la idea de tiempo geológico.

Agradecimientos y financiación

Estoy en deuda, una vez más, con Alejandro G. Francisco por su buen hacer, como siempre. También agradezco a la revisora Beatriz Bádenas Lago y un revisor anónimo, sus comentarios y observaciones. La presente investigación no ha recibido ayudas específicas provenientes de agencias del sector público, sector comercial o entidades sin ánimo de lucro.

Referencias

- Cross, T.A., Homewood, P.W., 1997. Amantz Gressly's role in founding modern stratigraphy. *Geological Society of America Bulletin*, 109(12): 1617–1630.
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1997\)109<1617:AGSRIF>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1997)109<1617:AGSRIF>2.3.CO;2)
- Feng, Z.Z., 2019. A review on the definitions of term of sedimentary facies. *Journal of Palaeogeography*, 8: 1-11.
<https://doi.org/10.1186/s42501-019-0045-3>
- García Cruz, C.M., 2018. “Aniversaries”: Facies, a geological concept (1838-2018) - 180 years ago. *International Union of Geological Sciences E-Bulletin*, No. 145, Item No. 4 (August

- 2018). [Reproducido en: *INHIGEO Annual Record*, 51: 76-77 (2019)].
- Gressly, A., 1838. Observations géologiques sur le Jura soleurois [1^{ère} partie]. *Neue Denkschriften der Allgemeinen Schweizerischen Gesellschaft für die Gesamten Naturwissenschaften*, 2: 1-112.
- Gressly, A., [1838-1841]. Observations géologiques sur le Jura soleurois (1^{ère}-4^{ème} parties). Neuchâtel, Société Helvétique des Sciences Naturelles, Nouveaux mémoires, N° 2, 349 p.+14 láminas [La primera parte se publicó también de forma independiente (referencia anterior)].
- Hartmann, A., 1868. Amantz Gressly. En: *Galerie berühmter Schweizer der Neuzeit*. F. Hasler Lithograph, Baden im Aargau, vol. 1, N° 36, p. [215-220].
- Johnson, M.E., 2002. Amantz Gressly and the concept of facies. En: *Discovering the Geology of Baja California*. University Arizona Press, Tucson (AZ), 54-58.
<https://doi.org/10.2307/j.ctv1t4m2dk>
- Ledermann, H., 1965. Die wissenschaftliche Bedeutung von Amantz Gressly. *Jurablätter*, 27: 70-72.
- Maillet, B. de, 1748. *Tellamed, ou entretiens d'un philosophe indien avec un missionnaire françois*. Che L'Honoré & Fils, Amsterdam, tomo 1, lix+208 p.
- Markovich, V.V., 1960. The concept of facies. *International Geology Review*, 2 (part 1, Introduction): 376-379.
<https://doi.org/10.1080/00206816009473574>
- Meyer, K., 1966. Amantz Gressly, ein Solothurner Geologe (1814-1865). *Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft in Solothurn*, 22: 1-79.
- Moore, R.C., 1949. Meaning of facies. *Geological Society of America, Memoir* 39: 1-34.
<https://doi.org/10.1130/MEM39-p1>
- Nelson, C., 1985. Facies in stratigraphy: from “terrains” to “terranes”. *Journal of Geological Education*, 33: 175-187.
<https://doi.org/10.5408/0022-1368-33.3.175>
- Prévost, C., 1839. Sol, roche, dépôt, formation et terrain. *Bulletin de la Société Géologique de France, série 1*(10): 340–345 (séance du 3 Juin).
- Prévost, C., 1845. Sur la chronologie des terrains et le synchronisme des formations. *Bulletin de la Société Géologique de France, série 2*(2): 366–373 (séance du 7 Avril).
- Rat, P., 1978. Sur le concept de faciès en géologie sédimentaire: faciès et environnements. En: *Documents des Laboratoires de Géologie de la Faculté des Sciences de Lyon. Hors série n° 4, Les sédiments, leur histoire, leur environnement et leur devenir* (Livre jubilaire Jacques Flandrin): 393-405.
https://www.persee.fr/doc/geoly_0245-9817_1978_hos_4_1_1481
- Rudwick, M.J.S., 2008. *Worlds before Adam. The reconstruction of Geohistory in the Age of Reform*. The Chicago University Press, Chicago (IL), xxii+648 p.
<https://doi.org/10.7208/chicago/9780226731308.001.0001>
- Schaer, J.-P., 1994. Géologues et géologie en pays neuchâtelois dans la seconde moitié du XIX^e siècle. En: *Histoire de l'Université de Neuchâtel* (G. Attinger, Ed.). Université de Neuchâtel et Éditions, Neuchâtel, vol. 2: 397–403.
- Schneer, C.J., 1981. Gressly, Amantz. En: *Dictionary of Scientific Biography*. (C.C. Gillispie, Ed.). Charles Scribner's Sons, New York (NY), vol. 5: 533-534.
- Smith, W., 1816. *Strata identified by organized fossils*. W. Arding, London, 24 p.+13 láminas.
- Smith, W., 1817. *Stratigraphical system of organized fossils*. E. Williams, London, xi+121 p.
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511702167>
- Stampfli, H.R., 1986. Amantz Gressly, 1814-1865: *Lebensbild*

- eines außerordentlichen Menschen. Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft des Kantons Solothurn, 32: 7-160 [reed. 1993, con adiciones y correcciones].
- Steno, N., 1669. De solido intra solidum naturaliter contento dissertationis prodromus. Florentiæ, Lythographia sub signo Stellæ, 78 p. [ed. bilingüe latín-inglés: Steno Geological Papers. (G. Scherz, Ed.). Odense University Press, Odense, 133-234 (1969)]. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.148841>
- Teichert, C., 1958. Concepts of facies. Bulletin of American Association of Petroleum Geologists, 42(11): 2718-2744. <https://doi.org/10.1306/0BDA5C0C-16BD-11D7-8645000102C1865D>
- Tikhomirov, V.V., 1968. Development of geological sciences during the first half of the Nineteenth Century. Proceedings of the International Geological Congress (Prague, Czechoslovakia, 7-19 August), Report of the Twenty-third session, Section 13: 319-329.
- Walther, J., 1894. Einleitung in die Geologie als historische Wissenschaft. Gustav Fischer, Jena, tomos 2 y 3, 1.055 y 1.052 p.
- Wegmann, E., 1962-1963. L'exposé original de la notion de faciès par A. Gressly (1814-1865). Sciences de la Terre, 9(1): 83-119.
- Welland, M., 2009. Sand: The never-ending story. University of California Press, Berkeley (CA), 360 p. <https://doi.org/10.1525/9780520942004>
- Woodward, J., 1695. An essay toward a natural history of the earth. R. Wilkin, London, [12]+277 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139696494>
- Young, G., Bird, J., 1822. A geological survey of the Yorkshire coast. Georg Clark, Whitby, 332 p.
- Zittel, K.A. von, 1899. Geschichte der Geologie und Paläontologie bis Ende des 19. Jahr-hunderts. R. Oldenbourg, München-Leipzig, XI+868 p. <https://doi.org/10.1515/9783486731040>
- MANUSCRITO RECIBIDO: 05-10-2023
 REVISIÓN RECIBIDA: 10-04-2024
 ACEPTACIÓN DEL MANUSCRITO REVISADO: 10-06-2024



ORIGEN Y TRAYECTORIA DEL DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA DE FUNVISIS, VENEZUELA: SUS PRIMEROS 50 AÑOS (1972-2022)

Birth and path of the FUNVISIS' Earth Sciences Department, Venezuela: Its first 50 years (1972-2022)

André Singer¹, Franck A. Audemard M.^{1*}, José Antonio Rodríguez A.¹ y Luz María Rodríguez D.¹

¹ Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas FUNVISIS, Departamento de Ciencias de la Tierra (ahora de Geología de Terremotos), Final Prolongación Calle Mara, Quinta Funvisis, El Llanito, Caracas 1070, Venezuela. singer.andre1@gmail.com, faudemard@gmail.com (*Autor de correspondencia), rodriguez.arteaga@gmail.com, lrodriguez.funvisis@gmail.com

Resumen: En el organigrama de FUNVISIS, creada como resultado benéfico del Terremoto de Caracas de 1967, el Departamento de Ciencias de la Tierra (DCT), desempeña el rol de puente entre las unidades de Sismología e Ingeniería Sísmica, cuyo desarrollo ocurrirá en 4 fases. En la inaugural (1972-1978), tal misión se efectúa sin personal especializado. Entre 1979 y 1983, se implementa el DCT a través de la cooperación científica francesa gracias a la formación “en caliente” de sus geocientíficos en sismotectónica. El DCT se consolida entre 1984 y 1996, con la ejecución de proyectos de aplicación por parte de geólogos con estudios de postgrado alcanzados en esa cooperación. La fase de expansión internacional más productiva del DCT ocurre entre 1997 y 2022. La proyección de su pericia en la región conlleva al reconocimiento de Venezuela como un país de vanguardia en geología de terremotos. Los años “dorados” del DCT se cierran abruptamente con la irrupción en Venezuela de una hiperinflación cabalgante en 2017, rematada por la pandemia del COVID 19. Tal situación económica empuja a sus jóvenes profesionales a los caminos de la diáspora, circunstancia agravada por la jubilación de sus profesionales seniors en 2020; con un futuro incierto para el DCT.

Palabras claves: Historia de las Geociencias, Cooperación Internacional, Proyección Institucional, Riesgo Sísmico, Geología de Terremotos.

Abstract: In the organizational chart of the Venezuelan Foundation for Seismological Research (FUNVISIS), which was founded as a beneficial result of the damaging Caracas 1967 earthquake, the Earth Science Department (DCT) acts as a bridge between the Seismology and Seismic Engineering units at later stages of its development, which could be subdivided in 4 major phases. Between 1972 and 1979, objectives are met without proper specialized personnel. Up to 1983, the progressive implementation of this unit occurs through an international scientific cooperation with France, resting on the training on Seismotectonics of its young professionals for applied purposes. This initial experience gives rise in 1983 to an International across-disciplines Symposium on “Seismicity, Neotectonics and Geological Risk in Venezuela and the Caribbean”. The 1984-1996 stage corresponds to the consolidation of the DCT in the execution of applied projects by the initial staff of geologists, formed abroad at the Graduate level in the frame of the 2-way beneficial cooperation. The DCT showcases its progress through the publication of the Neotectonic Map of South America (Proyecto SISRA, 1985) and the Neotectonic Map of Venezuela (1993). The most productive internationally-casted DCT expansion and projection, which spans



between 1997 and 2022, is initially naturally boosted by the study of two major devastating geological events: the Cariaco 1997 earthquake in Eastern Venezuela and the debris flows of December 1999 in the coastal State of Vargas, north of the capital Caracas. The diaspora of the DCT's young professionals, as a consequence of the unbearable economic situation, in addition to the official retirement of its most experienced and elderly scientists, leads to the current decline of the DCT, closing its most brilliant period. The early projection of the DCT to the neighbouring countries of Colombia and Trinidad to evaluate the common master faults, belonging to the larger plate-boundary zone, is expanded by a prolific international projection of its expertise, which leads to the recognition of Venezuela as a leading country in the study of Geology of Earthquakes not only in the region. The DCT shining climax is abruptly truncated by the sudden emergence of a rocketed hyperinflation, worsened by the COVID 19 pandemics. The economic crisis that is suffocating the country for several years now has pushed its younger professionals to migrate abroad, which is further boosted by the forced retirement of its more experienced professionals by the current Ministry of affiliation, with a very uncertain future for the DCT.

Keywords: History of Geosciences, International Cooperation, Institutional Projection, Seismic Risk, Earthquake Geology.

Singer, A., Audemard, F.A., Rodríguez, J.A., Rodríguez, L.M., 2024. Origen y trayectoria del Departamento de Ciencias de la Tierra de FUNVISIS, Venezuela: sus primeros 50 años (1972-2022). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, número de volumen: 10-31.

Introducción

Los orígenes del Departamento de Ciencias de la Tierra (DCT) de la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), remontan al decreto de fundación de aquella institución en el año 1972, cuya creación oficial por el Estado venezolano, es una consecuencia benéfica del Terremoto de Caracas del 29 de julio de 1967. En efecto, este evento sísmico de magnitud relativamente moderada, impactó de manera sorpresiva la consciencia del gremio profesional venezolano y la capacidad inicial de comprensión de los efectos destructores de este evento sísmico por resultar concentrados aquellos en edificaciones altas de construcción moderna, y por la localización errática en unos pocos sectores, de las edificaciones colapsadas o severamente afectadas, entre las cuales varias sedes de transnacionales petroleras. Aquella situación inesperada se debía además a la inexistencia de profesionales preparados para asumir de manera moderna e integral los problemas muy complejos de evaluación del riesgo sísmico en función del estado del arte que prevalecía en aquella época, el cual por cierto no alcanzaba todavía a dar respuesta al significado de los efectos sorpresivos de aquel terremoto; situación que conduce a convertir al terremoto de Caracas en un caso-piloto emblemático de la ingeniería sísmica pocos años más tarde gracias a las lecciones aprendidas de la investigación de este evento sísmico. Esta situación explica la orientación de las premisas en torno a la creación de FUNVISIS, como organismo oficial de investigación para evaluar el origen de los efectos lamentables de este evento sísmico, así como para prevenir situaciones adversas en caso de futuros eventos severos. Al respecto, el cumplimiento de los objetivos fundacionales de aquella organización nueva, preconiza el desarrollo en forma permanente

de investigaciones plurales de sismología, de geología e ingeniería sísmica, y la formación permanente del personal técnico y científico requerido a tal efecto. Para asegurar aquella integración de competencias, era necesario reunir bajo un mismo techo funciones tradicionales inherentes a las de un observatorio sismológico, como las que existían en el Observatorio Cagigal antes del traspaso oficial de aquellas funciones a FUNVISIS en diciembre de 1982, y funciones preventivas novedosas de alcance estratégico y de dimensión tanto ingenieril como social, atinentes a la reducción del riesgo sísmico en procura de la disminución de la vulnerabilidad de las edificaciones y de las personas ante las acciones sísmicas letales, gracias a la producción y actualización periódica de normas de construcción sismo-resistentes (Singer, 2021).

En la arquitectura organizativa de aquel organismo científico de investigación aplicada, la misión del DCT-FUNVISIS se refiere a la evaluación geológica del patrón de deformaciones tectónicas más recientes y vigentes actualmente en el margen sur de la placa del Caribe por medio de investigaciones de tectónica activa y de sismotectónica (Audemard y Singer, 1996, Audemard *et al.*, 2000a (Fig. 1); Audemard, 2015). La función de aquella base de datos es convertirse en una correa de transmisión clave entre los campos de actividad de la sismología y de la ingeniería. En efecto, se trata de esta manera de optimizar por medio de la *geología de terremotos*, la dimensión temporal de la data sísmica instrumental producida desde hace escasos decenios de años por una moderna red sismológica venezolana, a fin de satisfacer las exigencias de información a incorporar en las normativas ingenieriles de diseño y construcción de edificaciones, en función de los correspondientes períodos de retorno de los movimientos sísmicos de referencia del terreno, producidos por la acti-

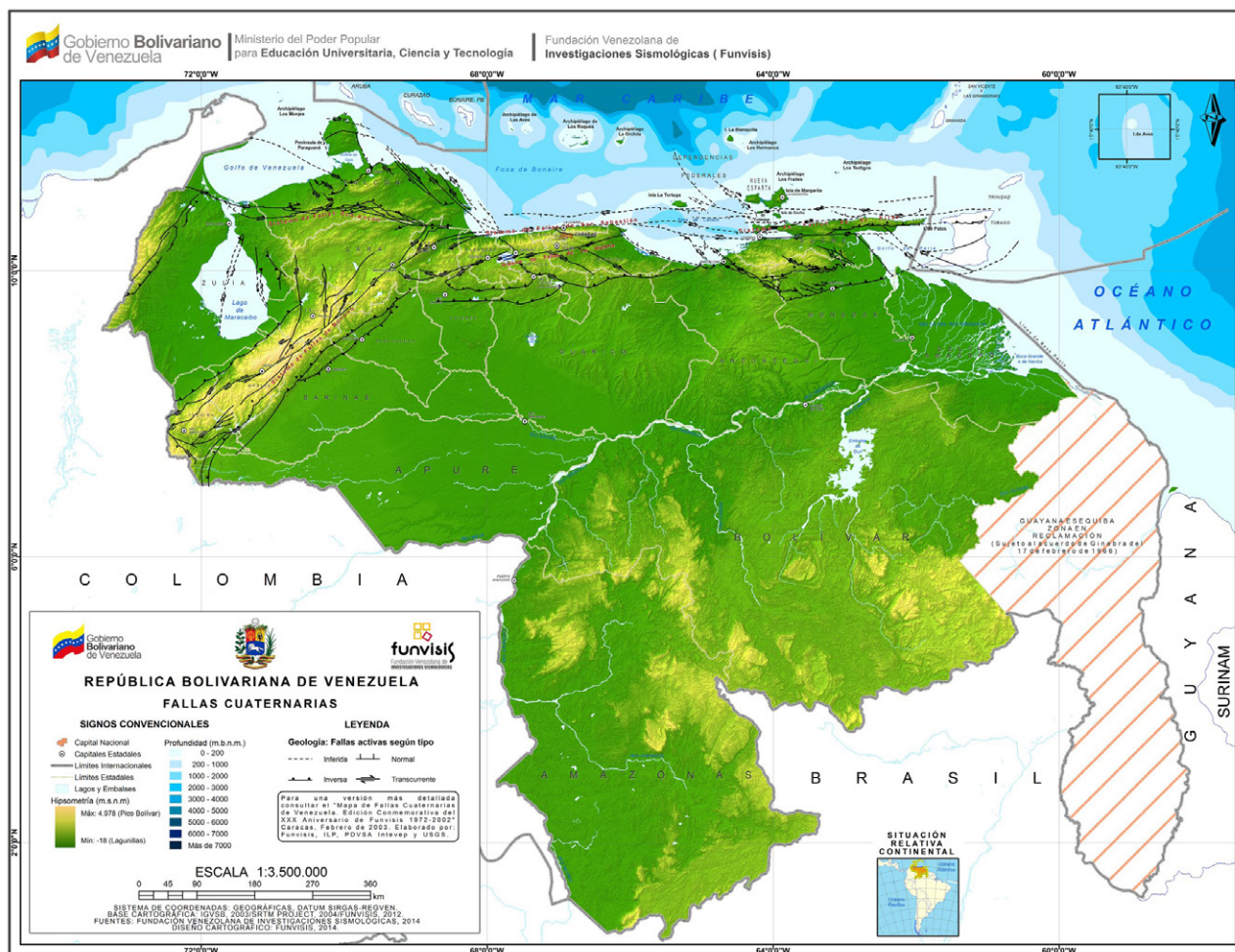


Fig. 1.- Mapa de fallas cuaternarias de Venezuela (Audemard et al., 2000a; descargable desde el portal USGS bajo el identificador USGS-OFR-2000-0018) reportado sobre modelo de elevación del terreno. Mapa reproducido como edición conmemorativa para el XXX Aniversario de FUNVISIS en el año 2002. Se aprecia la clara asociación de las fallas activas o sismo-generadoras con la “columna vertebral” montañosa presente en el oeste y norte del territorio.

vidad de los grandes sistemas de fallas del país en el ancho límite meridional de la placa Caribe.

No obstante haber sido creada por Decreto del 27 de julio de 1972 y adscrita al ex-Ministerio de Minas e Hidrocarburos (MMH), siendo el Presidente de FUNVISIS el entonces titular de la Dirección de Geología de aquel Ministerio, el geólogo Dr. Henrique Lavié, el primer presupuesto oficial y el patrimonio económico de aquella Fundación no fueron asignados por el Ejecutivo Nacional sino a partir del año 1976 (FUNVISIS, 1996); respectivamente a través de aquel Ministerio y del ex-Instituto Nacional de la Vivienda (INAVI) perteneciente al ex-Ministerio de Obras Públicas (MOP), gracias a los montos recuperados por aquel instituto a través de la administración del fondo de asistencia financiera creado por el Gobierno Nacional para atender sobre la marcha la reparación de los daños y reforzamiento de estructuras en edificios afectados por el terremoto de 1967 y de acuerdo a su evaluación por la Oficina Técnica del Estudio del Sismo (OTES), creada *ad hoc* y de inmediato. Aquellas restricciones financieras explican las dificultades iniciales de FUNVISIS para asumir la cuantía de recursos requeridos para dotarse de una in-

fraestructura de personal científico especializado y del instrumental sismológico muy costoso necesario para cumplir sus objetivos.

Los tanteos iniciales: 1972-1978

Los referidos tiempos de penuria explican los tanteos y dilaciones iniciales concernientes al diseño y puesta en funcionamiento del Departamento de Ciencias de la Tierra hasta su implementación en el año 1979. Previamente a este año, sus funciones fueron asumidas por una unidad improvisada de Sismotectónica, adscrita a la joven División de Geotecnia creada el mismo año 1972, la cual dependía de la Dirección de Geología del referido Ministerio de adscripción. Este embrión inicial del futuro DCT-FUNVISIS se encontraba integrado por un personal muy restringido de tres geólogos sin competencias particulares en neotectónica y geología de terremotos, suministrados por la División de Exploraciones Geológicas (Nelly Pimentel) y por la propia División de Geotecnia (Armando Díaz Quintero, Claudio Gallardo). La doble creación con pocos meses de diferencia, de la División de Geotecnia (en la

cual el primer autor prestó sus servicios entre el 1° de enero de 1972 hasta el 31 de diciembre de 1978) y de FUNVISIS se debe a una recomendación emanada de la *Comisión Presidencial del Sismo* por iniciativa de una Subcomisión de Geología y por lo tanto fue responsabilidad del despacho ministerial de Minas e Hidrocarburos. En la cabeza del MMH se encontraba el destacado ingeniero geotecnista Hugo Pérez La Salvia, quién había prestado su colaboración en 1967 a la Comisión Presidencial evaluadora de los edificios dañados por el terremoto, junto con expertos de California. Aquellas circunstancias explican la ubicación de aquellos dos modestos y nuevos organismos hermanos a escasa distancia de la Torre Norte del Centro Simón Bolívar, donde se alojaba entonces el Ministerio de adscripción. Ambas organizaciones incipientes fueron ubicadas en locales alquilados frente por frente en un mismo pasillo de la mezanine del edificio Gran Vía en la Esquina Cruz Verde, encima de una panadería... y frente a los Tribunales. La inexistencia de personal preparado entonces en el país en torno a la problemática del riesgo sísmico, explica la contratación del ingeniero chileno Enrique Gajardo, ex-asistente del Director del *Centro Regional de Sismología (CERESIS)* en Lima, el geofísico Dr. Alberto Giessecke, como encargado del Departamento de Sismología de FUNVISIS, y la colaboración estrecha de los ingenieros de la *Comisión Presidencial del Sismo* y de la OTES para el diseño del núcleo inicial de ingeniería sísmica de aquella Fundación. Del personal adscrito a la OTES saldrán por cierto el primer Director Ejecutivo de FUNVISIS, el Ingeniero Luis Urbina, y el encargado del Departamento de Ingeniería Sísmica, el Ingeniero Alfonso Malaver.

El llamado Terremoto de Carúpano del 12 de junio de 1974 (Arcia *et al.*, 1974; Gallardo *et al.*, 1974) y la consecutiva celebración en el mes de octubre del mismo año del *Primer Congreso Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica* constituyeron la primera oportunidad conocida para que FUNVISIS presentara su Plan Básico para las Investigaciones Sísmicas en Venezuela (FUNVISIS, 1974). En aquel mismo evento, también fueron divulgados los primeros resultados de observaciones post-sísmicas concernientes al referido terremoto sobre los daños en construcciones y observaciones geológicas realizadas simultáneamente en el campo por parte de los ingenieros de FUNVISIS y de los geólogos del núcleo de Sismotectónica adscrito a la *División de Geotecnia*. La carencia de experiencia significativa en materia de geología de terremotos de aquellos profesionales explica probablemente que la ocurrencia de rupturas de superficie, y de origen entonces indeterminado, en tres sitios diferentes mencionados en aquellos informes de campo y detectados en el ancho o vecindad de la traza activa de la falla de El Pilar en los sitios de Galerón, La Pica y del Balneario Pozo Azul, no fuese mayormente ponderada en aquella oportunidad desde el punto de vista de su posible significado sismotectónico, lo cual da cuenta de la reevaluación posterior de aquel mismo evento sísmico como Terremoto de Casanay (Grases, 2002). Al respecto y a raíz del evento sísmico destructor de Cariaco de julio 1997, nuevas rupturas de superficie fueron cartografiadas en detalle por el DCT en la cercanía de los sitios de rupturas de junio

1974 (Audemard, 2006), así como resultó identificada dicha ruptura de superficie de 1974 en una trinchera paleosísmica excavada a través de la traza activa de la falla de El Pilar en la falda norte del cerro Guarapiche y en cuya expresión geológica observada en el subsuelo se hallaron restos de bolsas plásticas, evidencia cuya modernidad podría confirmar una aparente vinculación cosísmica del referido sismo con aquella falla (Audemard, 2011). No obstante, la carencia de especialización del personal de geólogos nacionales de la *Dirección de Geología* del MMH en materia de geología de fallas activas, programas de investigación fueron acometidos sin resultados conocidos en particular por parte de la *División de Exploraciones Geológicas* y de la *División de Geotecnia* para la evaluación de la actividad sismotectónica de las fallas de Boconó y de La Victoria, desde campamentos *ad hoc* cercanos instalados respectivamente en Boconó y Mariara. Adicionalmente y en relación con la firma y próxima implementación de un convenio de cooperación en geología entre aquella *Dirección de Geología* del MMH y la universidad francesa de Montpellier, una misión exploratoria de tres semanas fue realizada en julio de 1974 por parte del geólogo neotectonista y microtectonista Hervé Philip de aquella universidad. Aquella misión contempló un reconocimiento de campo preliminar de la falla activa de Boconó y de las fases de deformación cortical de la región central cordillerana (Philip, 1974), con la participación del núcleo de geólogos sismotectonistas de la *División de Geotecnia* y del primero de los autores. En este mismo *Congreso de Sismología e Ingeniería Sísmica* de octubre 1974, aquel último profesional presentó un resumen de los primeros datos de campo obtenidos durante el año 1972 sobre los depósitos aluviales convulsivos y de edad pre-hispánica observados tanto en la superficie como en las excavaciones de edificios en construcción en el Valle de Caracas. Aquellos depósitos presentan una extensión y profundidad llamativa en la depresión subsidente de Los Palos Grandes, particularmente afectada por el terremoto de 1967 (Singer, 1974). La discusión del significado genético de estos depósitos convulsivos fue presentada e ilustrada en campo para la consideración de los participantes al Seminario Internacional sobre Riesgo Geológico realizado en Caracas por iniciativa de FUNVISIS y auspiciado por la *Organización de Estados Americanos (O.E.A.)* en julio de 1977 (Singer, 1977; Muñoz y Singer, 1977). El interés de aquellos resultados para la geología sísmica del valle de Caracas ameritó la comunicación de comentarios muy favorables por parte de geólogos del *US Geological Survey (USGS)* en Denver, que participaron en la evaluación en Caracas de los efectos destructores de aquel terremoto (Espinosa, A.F., comunicación escrita a A. Singer del 20-04-1977). Como prolongación de las inquietudes sembradas por aquella primera reunión científica realizada en el país sobre el referido tema de interés, el DCT acometerá la publicación de un *Inventario Nacional de Riesgos Geológicos* (Singer *et al.*, 1983; Fig. 2) en ocasión de un nuevo evento internacional concerniente a aquella preocupación y efectuado por iniciativa de aquel departamento de FUNVISIS en Caracas a final de 1983.

En febrero de 1978, el primero de los autores fue designado asesor *ad honorem* de FUNVISIS por decisión

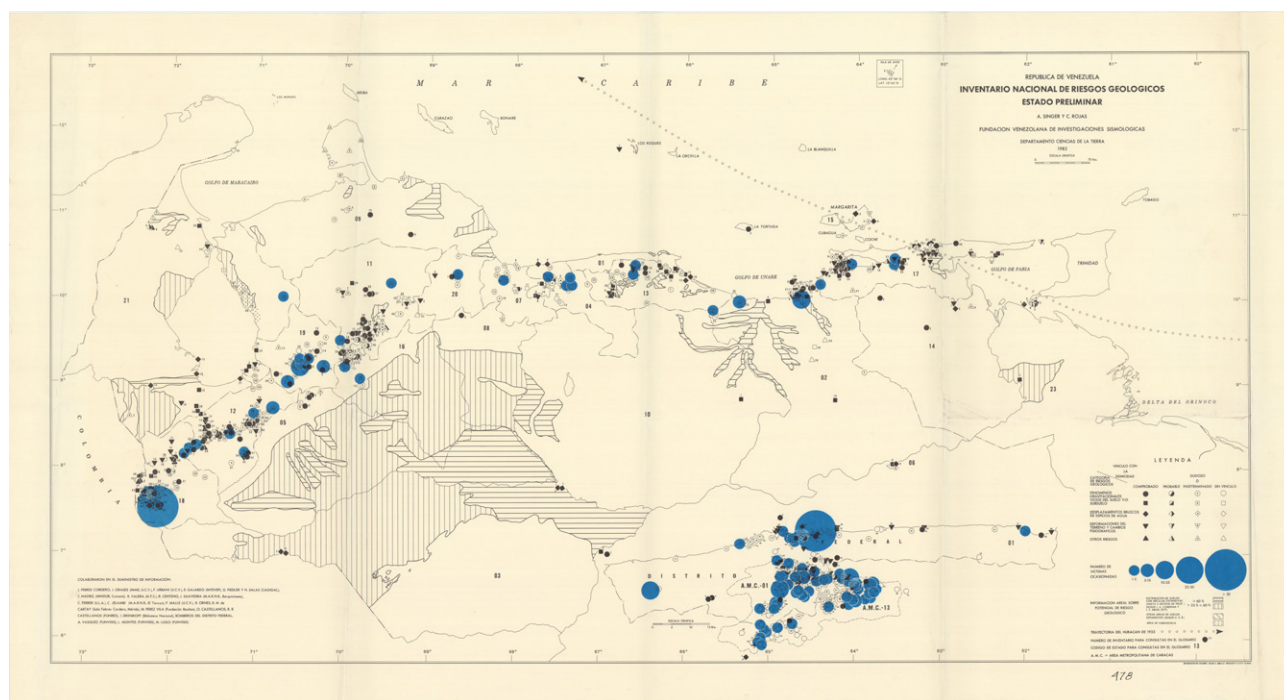


Fig. 2.- Mapa que acompaña el Inventario Nacional de Riesgo Geológico (versión preliminar; Singer *et al.*, 1983), en el cual se aprecia, por comparación con la figura 1, que los procesos geológicos riesgosos están asociados al relieve montañoso, que a su vez está vinculado con la tectónica activa imperante en el margen meridional del Caribe, a lo largo de la interacción de las placas Caribe y Sudamericana. Agentes detonantes hidro-meteorológicos como sísmicos convergen en estas regiones montañosas. Accesible desde <http://saber.ucv.ve/handle/10872/8687> (última consulta en marzo de 2024).

de su Consejo Directivo y comunicación oficial del Dr. Henrique Lavié, Director de Geología del MMH y a la vez Presidente de aquella fundación, con el propósito de adelantar gestiones internacionales tendientes a la creación de un equipo de personal especializado para la puesta en operación del próximo *Departamento de Ciencias de la Tierra (DCT)* de la referida institución, cuyo núcleo inicial se encontraba coordinado por el geólogo Claudio Gallardo desde su ingreso en 1974 en la *División de Geotecnia* del referido ministerio. Al respecto, y con base en el convenio firmado entre la geología francesa y la *Dirección de Geología* del MMH (Singer 2022), se propuso al Consejo Directivo de FUNVISIS la contratación de un experto de la Cooperación Técnica francesa, el geólogo Dr. Jean-Pierre Soulas, especialista en neotectónica y microtectónica de la Universidad de Montpellier (Francia) para la formación en Venezuela y en equipo con un especialista en geomorfología, de la infraestructura inicial de personal joven nacional en los aspectos relevantes de aquellas pericias para los estudios de amenaza y riesgo sísmico. Dicha contratación fue aprobada por el *Consejo Directivo* de FUNVISIS, previa recomendación favorable obtenida por el Ing. Luis Urbina, director ejecutivo de FUNVISIS, del sismólogo peruano Leonidas Ocola del Instituto Geofísico del Perú (IGP) en Lima, organismo con el cual el Dr. Soulas había cooperado previamente a través del Instituto Francés de Estudios Andinos (IFEA). Esa fórmula, combinando pericias concernientes a la evaluación desde la superficie y en el subsuelo de fallas activas, respondía al estado del arte de las investigaciones de geología de terremotos desarrolladas en California para fines de aplicación a la in-

geniería sísmica, conforme a las orientaciones recibidas al respecto por la *Comisión Presidencial del Sismo* por parte de la prestigiosa empresa *Woodward & Clyde* de Oakland, para la creación de un organismo como FUNVISIS, como parte de la evaluación del terremoto de Caracas de 1967 (Woodward-Clyde-Sherard y Associates, 1967). Aquella decisión del Consejo Directivo de FUNVISIS motivó además la contratación del primero de los autores por parte de este organismo a contar del 1º de enero de 1979 para hacer equipo con el Dr. J.P. Soulas en el recién creado Departamento de Ciencias de la Tierra y asumir su dirección a partir de 1980 en la nueva sede de FUNVISIS ubicada en la Quinta Francinette, alquilada en la entrada del Hotel Ávila en San Bernardino y a escasa distancia del escarpe de falla del Ávila orillado por la Avenida Cota Mil, y luego en la sede propia de aquella institución en los Altos de El Llanito, previamente a su nombramiento el 8 de mayo de 1996 como Presidente de aquella Fundación hasta enero del 2000, al resultar candidatizado al referido cargo por la comunidad técnica y científica de FUNVISIS en febrero 1995, candidatura ratificada y elevada ante el Ministerio de adscripción mediante su aprobación por el Consejo Directivo de la institución (Fig. 3).

El arranque: 1979-1983

El arranque de las actividades de esta unidad científica de FUNVISIS recién creada, pero sin recursos presupuestarios, fue posible gracias a la obtención de un financiamiento por dos años de un proyecto de investigaciones en neotectónica de la región nor-oriental del país con una prolongación en



Fig. 3.- Reconocimiento público con placa al Dr. André Singer, por sus compañeros del DCT, en el marco de las *III Jornadas Venezolanas de Sismología Histórica*, realizadas en Caracas en las instalaciones del *Instituto de Previsión del Profesorado UCV*, en julio de 2002. El expresidente de FUNVISIS para el periodo 1996-2000 está flanqueado por los jefes del DCT, Ing. José Antonio Rodríguez (período 2010-2021) y Dr. Franck Audemard (período 1998-2010), en los extremos izquierdo y derecho de la fotografía, respectivamente. Fotografía cortesía de autor anónimo.

Trinidad por parte del *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas (CONICIT)*, lo cual permitió el ingreso a FUNVISIS del joven geólogo venezolano, Carlos Giraldo, recién graduado de la *Universidad Central de Venezuela (UCV)* y del geógrafo-foto-intérprete Leandro Montes de aquella misma universidad, para prestar servicios en dicho proyecto a través del Departamento de Ciencias de la Tierra, el cual contaba además con el geólogo chileno Claudio Gallardo y la geofísica argentina Carlota Gershanik. Esa misma fuente de financiamiento permitió la consecución indirecta de un vehículo de doble tracción Toyota necesario para acometer este proyecto, y por canje institucional de un equipo sismológico de precio equivalente entonces a un vehículo rústico, equipo adquirido a través de dicho proyecto y entregado por CONICIT a FUNVISIS contra la adquisición por la institución del referido vehículo, en vista de que el CONICIT no financiaba este tipo de adquisición. La culminación de tal proyecto de investigaciones, iniciado en agosto 1980, sufrirá varias demoras, aceptadas por el CONICIT, debido a los compromisos oficiales adquiridos paralelamente por FUNVISIS y el DCT en actividades de servicio contratadas por organismos gubernamentales nacionales (Giraldo y Beltrán, 1988).

Por su estatuto legal de fundación, FUNVISIS se encontraba en posibilidad de efectuar contratos de servicios y de estudios con empresas públicas del Estado y con el sector privado tanto nacional como del extranjero, lo que permite recibir aportes económicos tanto en efectivo como de otra naturaleza como instrumental y equipos científicos. Esa facilidad y la imagen profesional favorable proyectada por el DCT, permitieron que sus servicios fuesen solicitados tempranamente por los sectores más dinámicos de la economía del país, requeridos de insumos de información técnica por exigencia de las compañías internacionales de reaseguro, concerniente a la seguridad de instalaciones de

carácter estratégico ante pérdidas materiales y de vidas humanas por concepto de terremotos. De esta manera y a partir del año 1980, los investigadores del DCT dedicaron la mayor parte de su tiempo a satisfacer los requerimientos de un mercado de estudios cubierto anteriormente por empresas especializadas del extranjero, como ocurre con la empresa *Woodward & Clyde* de California para el dique de la COLM en Lagunillas (Estado Zulia), la presa Dos Cerritos en El Tocuyo y la de Yacambú en el Estado Lara, y concerniente a la realización de actividades de servicio contratadas para la evaluación de fallas activas en el marco de estudios de amenaza sísmica y riesgo sísmico para grandes obras de infraestructura proyectadas o ya construidas. Tal es el caso del muelle marítimo del complejo industrial petrolero de Jose, de las presas del complejo hidroeléctrico del Uribante-Caparo, y de los proyectos del Ferrocarril Caracas-La Guaira y del Puente del continente a la isla de Margarita, cuyos estudios ocuparon a tiempo completo el primer quinquenio de actividades profesionales de servicio desarrolladas por el referido Departamento de investigaciones científicas de FUNVISIS. Lo novedoso y la calidad de la información básica obtenida por medio de la referida actividad de servicio contratada conducen este departamento a organizar y presentar en Caracas y en octubre 1983, parte de los resultados de investigación obtenidos en aquella primera etapa en un Simposio sobre el tema integrador “*Sismicidad, Neotectónica y Riesgo Geológico en Venezuela y en el Caribe*” auspiciado por organizaciones internacionales como la *Comisión de Neotectónica* de la *International Union for Quaternary Research (INQUA)* y la *International Commission of the Lithosphere (ICL)* pertenecientes a las uniones internacionales de Ciencias Geológicas y Geofísicas (*IUGG* e *IUGS*) y de las cuales varios investigadores del referido DCT-FUNVISIS fueron coparticipes. Contactos beneficiosos establecidos en esta reunión conducen el DCT a asesorar a la Universidad de Los Andes y el Instituto Nacional de Investigaciones Geológico-Mineras (INGEOMINAS) de Bogotá para el adiestramiento de colegas colombianos en neotectónica por medio de trabajos de campo a través de la participación de FUNVISIS al proyecto geofísico del Norte-Santander, integrado además por los Institutos de Física del Globo de París y Estrasburgo. Adicionalmente, y poniendo a provecho los primeros insumos de información en tectónica activa obtenidos en el Oriente del país desde 1980, el DCT prestó su colaboración para la elaboración de una propuesta de investigaciones dirigida por FUNVISIS en 1983 a la Comisión Internacional de trabajo de IASPEI-UNESCO sobre “*Sitios experimentales para el desarrollo de investigaciones de predicción sísmica*” y concerniente a la escogencia de la falla de El Pilar como sitio-piloto a tal efecto, así como a la realización en 1984 de una misión de evaluación en el campo de aquella falla por parte de expertos internacionales de la UNESCO a los fines indicados (Sheperd *et al.*, 1984). Como resultado de esa misión, la referida Comisión *ad-hoc* de trabajo, recomendó aquella falla sísmógena maestra del Oriente de Venezuela como la candidata técnica- y científicamente más favorable, junto con la falla de Anatolia en Turquía, para la conducción exitosa de dicho

programa de investigaciones, el cual lamentablemente no se pudo llevar a cabo por carencia del correspondiente financiamiento por parte de la *Organización de las Naciones Unidas (ONU)*. En el marco de los estudios de amenaza y riesgo sísmico del Proyecto Ferrocarril Caracas-La Guaira pre-citado, se ejecuta el primer *Trabajo Especial de Grado (TEG)* en la UCV, de nivel pregrado, en el tema de la neotectónica venezolana, entre fines de 1982 y de 1984; trabajo titulado “*Evaluación Geológica de la Cuenca del Tuy para fines de Investigaciones Neotectónicas*” (Audemard, 1984). Este joven profesional, segundo autor de este escrito, engrosará las filas del DCT sólo a partir de 1986, porque FUNVISIS atravesaba un proceso de intervención financiera al momento de su graduación (a inicios del año 1985), bajo la interventoría de su presidente, el Ing. César Hernández.

La consolidación 1984-1996

La experiencia científica adquirida en caliente por los profesionales jóvenes del DCT en proyectos de aplicación, se completa oportunamente con la realización de estudios de postgrado en el extranjero a nivel de Maestría y Doctorado, en particular por intermedio de las facilidades de becas otorgadas por el gobierno francés en el marco de las relaciones de cooperación establecidas entre Francia y Venezuela, en particular con las Universidades de Montpellier y Grenoble, y por medio de la realización en contraparte de estadías postdoctorales en este Departamento de jóvenes doctores franceses en geología neotectónica, para aprovechar las oportunidades excepcionales de perfeccionamiento en actividades científicas integradas de paleosismología, sismología histórica y de amenaza sísmica (Audemard y Singer, 1996; Singer y Audemard, 1997), experiencia que no era de práctica corriente todavía en Francia. Este es el caso de la ejecución de investigaciones de geología de terremotos por medio de trincheras de exploración excavadas con bulldozer a través de la traza de fallas activas en relación con la evaluación del período de retorno de terremotos de magnitud superior a 5,5, generados por la actividad cosísmica de fallas corticales cuaternarias de mediana a larga longitud como las fallas del sistema Uribante-Caparo, Urica, Valera, Oca-Ancón, Boconó o El Pilar. De regreso en su país de origen con la experiencia novedosa obtenida en Venezuela por esos jóvenes geólogos franceses, la misma fue retroalimentada en organismos públicos de investigación interesados en los servicios de aquellos, como es el caso de Bernard Sauret por parte de la *Antena de Sismotectónica y Sismicidad Histórica* en Marseille-Luminy del Servicio Geológico de Francia (*Bureau de Recherches Géologiques et Minières –BRGM*), lo cual ilustra los alcances bilaterales beneficiosos de aquel genuino sistema de relaciones de cooperación de país a país.

Ese período de consolidación de la planta fija de personal del DCT hasta contar con una docena de profesionales, se debe a la ampliación y diversificación de sus actividades hacia los aspectos estrechamente integrados, además de los campos ya trillados de la sismotectónica y de la sismicidad histórica, de los temas nuevos de la sismogeotecnica y del

seguimiento instrumental *in situ* o a distancia de fenómenos peligrosos de inestabilidad de los terrenos para la prevención de su impacto destructivo en ambiente social de barriadas populares, en particular en el sector caraqueño de Nueva Tacagua, utilizado como sitio prototipo para el desarrollo de una experiencia duradera y muy enriquecedora de trabajo con las comunidades entre 1990 y 1996 (De Santis, Coord. *et al.*, 1992; De Santis *et al.*, 1993). La misma fue auspiciada por el Plan Presidencial de “*Eficiencia Social Nueva Tacagua*” y la Embajada de Francia en coordinación con FUNVISIS, y contratada por el INAVI. La dimensión vivencial de esta experiencia, junto con la adquirida en encuestas de campo evaluadoras del nivel de preparación de la población a raíz del terremoto de Cariaco de 1997, resultaron ser determinantes en los años subsiguientes para la creación y orientación del *Aula Sísmica* de FUNVISIS durante su vigencia operativa hasta el año 2018, en su condición de laboratorio social institucional de reencuentro de los imaginarios populares y científicos de la cultura sísmica. En aquellos 20 años de actividad experimental, aquella antena social de FUNVISIS se dedicará a generar experiencias de aprendizaje piloto como insumos de conocimiento para fortalecer los programas de capacitación en materia de auto-protección colectiva e individual de los segmentos de población más vulnerables del país ante la amenaza de terremoto (Quarantelli, 1998; Pulido de Briceño, 1998; Guzmán, 1999; Marín *et al.*, 2005; Ferrer de Singer, 2007; Murria, 2008; Singer, 2008; Dasco *et al.*, 2013; Quintero, 2015). Aplicaciones industriales de la referida pericia obtenida en Nueva Tacagua en materia de control instrumental de sitios de geología inestable, dieron lugar a la contratación por filiales de Petróleos de Venezuela S.A. -PDVSA- de campañas de mediciones para el seguimiento preventivo *in situ* de deformaciones significativas del terreno, en particular en el edificio-sede Guaraguao de CORPOVEN-PDVSA en Puerto La Cruz, y por vía telemétrica en la Planta de tanques de combustible de LAGOVEN-PDVSA en Cantinas en continuidad de los estudios de microzonificación sísmica iniciados en la década del 90 en Caracas y en el interior del país con la asesoría del *Laboratorio Central de Puentes y Carreteras (LCPC)* de París (Ehrlich *et al.*, 1997) y del *CETE-Méditerranée* de Niza (J.-P. Méneroud, A.-M. Duval, P.Y. Bard). En relación con dicha problemática social o industrial de la prevención de situaciones de emergencia debido a efectos geológicos locales peligrosos del suelo, provocados tanto bajo carga sísmica como en condiciones ordinarias sin condicionante (“*input*”) sísmico y por la utilidad que la misma presenta en los protocolos de retorno de experiencia, en particular para los ejercicios de simulacro en escenarios de inestabilidad del terreno anticipados bajo la acción de condiciones cosísmicas reales, servicios de asesoría fueron solicitados a FUNVISIS para fines de gestión de riesgo a través del Aula Sísmica y/o del DCT por empresas privadas o públicas interesadas en la seguridad de su personal o de usuarios (Metro de Caracas, etc.). Aquella experiencia fue solicitada además en el marco de la elaboración de planes de contingencia para casos de emergencia geotécnica y/o sísmica en infraestructuras industriales estratégicas y su

entorno urbano, como las del Dique de protección lacustre de Lagunillas (Zulia) a solicitud de INTEVEP y MARAVEN-PDVSA (Plan Costa Oriental del Lago de Maracaibo o COLM) y en urbanizaciones construidas en terrenos con suelos de condiciones geotécnicas conflictivas como las de La Punta y Mata Redonda (Maracay, Aragua) en la orilla oriental del Lago de Valencia.

En el año 1986, la invitación en FUNVISIS y consulta del conocido sismólogo del *US Geological Survey*, James W. Dewey, con motivo de la actividad sísmica recurrente registrada entre los meses de junio y agosto en la región central, permite al referido experto de apreciar el nivel de excelencia alcanzado en materia de geología de fallas activas por el DCT, del cual deja constancia en su respectivo informe de misión (Dewey, 1986). Años más tarde, la ocurrencia de la crisis sísmica que sacude en abril-mayo 1989 durante dos meses a los sedimentos fluvio-marinos de origen reciente en la costa nororiental de Falcón y que ocasiona fenómenos espectaculares de licuación de suelos en Boca de Tocuyo, es la oportunidad para la investigación en perfiles de calicatas de los mecanismos y estructuras de sifonamiento y eyección de arenas licuadas desde el subsuelo hacia la superficie, por medio de la aplicación, novedosa entonces a nivel mundial, de técnicas de exploración utilizadas desde los años 1980 por el DCT por medio de la excavación de trincheras en la traza de fallas activas (Audemard y De Santis, 1991). Durante aquel mismo período, la experticia del Departamento es solicitada por PDVSA para la evaluación de la amenaza sísmica planteada por fallas de importancia regional o de sitio, como las del sistema Oca-Ancón, Valera, Mene Grande, Burbusay, Boconó, Burro Negro, Piedemonte Norandino, y Río Seco, para la seguridad del dique de protección de la COLM, así como de varios poliductos proyectados por PDVSA como los de SUFAZ (Suministro Falcón-Zulia) y SUMANDES I y II (Suministro Norandino). Durante aquel lapso, el DCT continuó proyectando su actividad científica tanto a nivel nacional como internacional, en particular por medio de la publicación de un Mapa Neotectónico del país y áreas limítrofes (Beltrán, 1993), así como por su participación en la elaboración del *Mapa Neotectónico de Suramérica* (Proyecto SISRA, 1981-1985) a cargo del CERESIS (*Centro Regional de Sismología para Suramérica*). El DCT contribuye además al dictado de los cursos internacionales intensivos sobre “*Teledetección Aplicada a los Estudios de Neotectónica*” en Bogotá auspiciados por el ITC (*International Training Center for Aerospace and Earth Science Surveys*) de Enschede (Países Bajos) respectivamente en el CIAF (*Centro Interamericano de Fotointerpretación*) en 1986 y en el IGAC (*Instituto Geográfico Agustín Codazzi*) en 1989, y de un curso de postgrado sobre “*Métodos de estudio y prevención de riesgos geológicos*”, dictado en la Universidad de Zaragoza, España, en 1993, con énfasis en criterios de evaluación de fallas activas y en la metodología de la cartografía geotécnica, a título de reciprocidad de una pasantía postdoctoral en el campo de la tectónica activa y sismotectónica, efectuada previamente en FUNVISIS por un geólogo de aquella casa de estudios ibérica, el Dr. Antonio Casas Sainz (1991). De igual manera, direc-

tamente en campo, en el piedemonte llanero colombiano, el DCT asesorará al geógrafo Kim Roberston del IGAC en el año 1994, en el marco de su tesis doctoral dedicada a los sistemas de fallamiento activo, algunos ciegos, de tal frente montañoso de la Cordillera Oriental colombiana (Audemard, 1994; Audemard y Robertson, 1996). Como prolongación de un proyecto experimental de microzonificación sísmica contratado por el Instituto Tecnológico Venezolano del Petróleo (INTEVEP, S.A.) en la costa oriental del Lago de Maracaibo (COLM) y ejecutado con la asesoría de la cooperación técnica francesa, el DCT estimula además la realización en el país de los dos primeros coloquios internacionales de Microzonificación Sísmica en Punta Cardón, Falcón, en 1993 y Cumaná, Sucre, en 1995 y de las *Primeras Jornadas de Sismicidad Histórica* en Venezuela en Trujillo (1997), especialidad criolla trillada gracias al incentivo de las investigaciones de larga data del ingeniero universitario y académico José Grases tanto en Venezuela como en los demás países del Caribe al respecto (Grases, 1977). Una continuidad de interés sobre este tema es asegurada gracias a la actividad de un grupo de trabajo en sismología histórica en el seno del DCT desde los años 1980 (Singer y Soulas, 1979; Lugo, 1982; Singer y Lugo, 1982; Mocquet *et al.*, 1996; Audemard, 1998, 2007; Rodríguez, 1998; Rodríguez y Leal, 2012; Leal, 2015; Audemard y Leal, 2017; Rodríguez *et al.*, 2017b), así como por medio de la realización de media docena de nuevas Jorna-

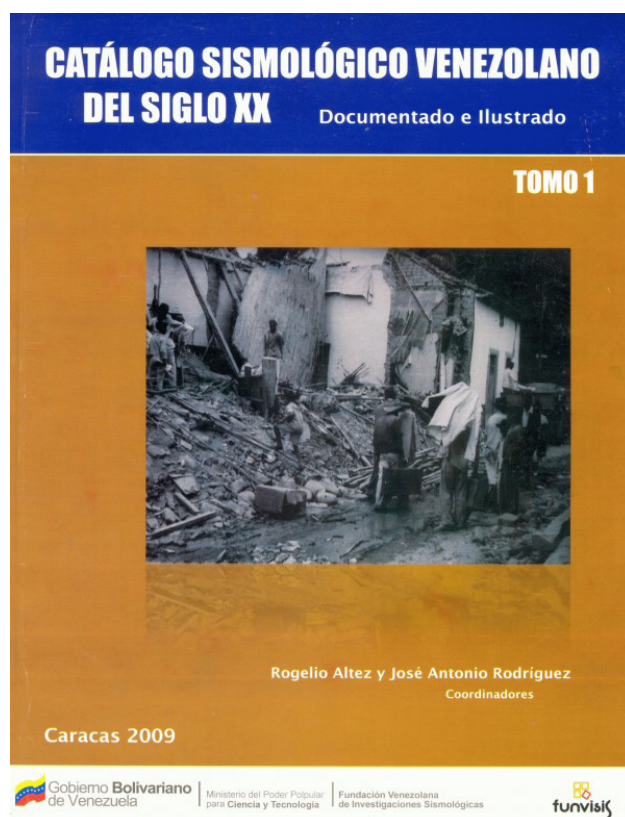


Fig. 4.- Catálogo Sismológico Ilustrado del siglo XX, compendiado desde el DCT en el año 2009. Portada del catálogo. Disponible en: <http://sibucv.ucv.ve/cgi-bin/koha/opac-imageviewer.pl?biblionumber=242795> (última revisión en diciembre de 2023).

das dedicadas a éste tópico y por medio de la publicación por FUNVISIS de un Catálogo Sismológico Venezolano del siglo XX, profusamente documentado e ilustrado (Altez y Rodríguez, 2009; Fig. 4). Con base en los insumos del Proyecto SISRA, en particular en Colombia y Venezuela, y bajo la inspiración del Proyecto UNESCO de reducción del riesgo sísmico en los Balcanes después del terremoto destructor y de modesta magnitud (5,8; 2000 muertos) de Skopje (1963) en Macedonia del Norte, y con motivo de la Conmemoración internacional de los 500 años del Descubrimiento (1984-1992), un proyecto multinacional de evaluación y mitigación de riesgos naturales mayores en el Caribe, impulsado por el Dr. José Grases y el DCT, destinado a poner a contribución los acervos documentales históricos de los países de la región sobre sus amenazas naturales, es aprobado técnicamente por la UNESCO, contando con la evaluación técnica previa favorable del experto Dr. Vit Karnik, coautor de la conocida y utilizada escala de intensidades sísmicas MSK, durante una misión *ad-hoc* efectuada en FUNVISIS en junio 1985, pero sin poder concretarse su realización por falta del correspondiente financiamiento por parte de la UNESCO y del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD; UNESCO, 1987).

Expansión internacional y culminación: 1997 a 2022

El inicio de la última fase de desarrollo del DCT coincide con la ocurrencia de dos infaustos y magnos eventos naturales de origen diferente: el primero, perteneciente al dominio cortical, y el segundo al dominio supra-cortical epidérmico. Se trata por un lado del terremoto destructor de Cariaco (Mw 6,9) que sacude al Estado Sucre el 9 de julio de 1997, y por otro lado, la crisis de deslaves y aludes torrenciales de diciembre 1999 que devastaron el litoral de Vargas. La confrontación “en caliente” de ambos eventos geológicos pone a prueba la capacidad técnica y respectivas pericias científicas del DCT en condiciones reales y ya no en la fría aplicación de conocimientos académicos para fines de prevención sísmica a futuro. Esa oportunidad concierne al registro objetivo y evaluación de los datos de campo más significativos sobre aquellas manifestaciones geodinámicas vivas, las cuales, en determinadas circunstancias adversas, suelen combinar sus efectos destructores, como ha ocurrido durante diversos eventos sísmicos en Venezuela como el terremoto emblemático del 3 de febrero de 1610 (Singer, 2019), o el terremoto del Perú de mayo de 1970 o de Guatemala de febrero de 1976. De esta manera, aquella coyuntura excepcional se convierte en una oportunidad insustituible para la generación de conocimientos científicos nuevos de la realidad geológica nacional por parte de los investigadores del DCT, además de un motivo de crecimiento institucional, y de proyección internacional, en particular durante la gestión del colega Franck Audemard (1998-2010) y en los años posteriores.

El impacto de los deslaves de Vargas se traduce por profusos fenómenos de denudación que escarificaron las laderas del macizo cordillerano de la serranía litoral durante la segunda quincena del mes de diciembre de 1999.



Fig. 5.- Acto de imposición del Doctorado *Honoris causa* de la UCV al Geóm. André Singer, acompañado de sus testigos, Drs. Franck Audemard (izq.) y Franco Urbani (der.), en abril de 2011. El Dr. Urbani, profesor titular jubilado de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica (EGMyG) de la UCV, fue contratado por FUNVISIS para aprovechar la exposición del substrato de la Cordillera de la Costa a consecuencia de los deslaves de Vargas de diciembre de 1999. Fotografía cortesía de autor anónimo.

Aquella circunstancia fue propicia para la generación de una multitud de afloramientos de las rocas del subsuelo geológico, los cuales ofrecen posibilidades nuevas de investigación de la geología de superficie de las unidades metamórficas de aquel macizo montañoso. Para aprovechar aquella inesperada oportunidad de mejora del conocimiento de la geología de la serranía del Ávila, se procedió a la contratación y adscripción en el DCT, de uno de los mejores conocedores de la geología cordillerana, el profesor Franco Urbani de la *Universidad Central de Venezuela (UCV)* a contar del año 2000 (Fig. 5). En equipo con geólogos del DCT y del Instituto Nacional de Geología y Minería (INGEOMIN) de Venezuela, y con una dedicación más particular del colega José Antonio Rodríguez del DCT y de tesis de fin de carrera del *Departamento de Geología* de la *Escuela de Geología, Minas y Geofísica* de la UCV (Urbani, 2000). Urbani desplegará una intensa actividad de trabajos de campo y compilación cartográfica para dar lugar a la publicación del *Atlas Geológico de la Cordillera de la Costa* (Urbani y Rodríguez, 2004), basado en un ensamblaje de 147 hojas geológicas en escala 1:25.000, trabajo inicial prolongado hacia el resto del macizo montañoso de los estados occidentales y orientales del país en las dos décadas siguientes (Urbani, 2015; Urbani y Gómez, 2015). Por otra parte, y a pocas horas de ocurrir esa infausta catástrofe, una cartografía preliminar generada desde helicóptero y efectuada en la Serranía del Litoral en escala 1:100.000 entre el 26 de diciembre 1999 y el 5 de enero 2000, es producida por el DCT gracias al oportuno apoyo recibido del Vice-Ministro de Energía y Minas, el Dr. Víctor Poleo, quién facilitó la obtención por parte de la *Corporación Venezolana de Guayana (CVG)* del soporte logístico y pericia de vuelo acorde con el trabajo de observación en zonas montañosas con aproximaciones a laderas escarpadas de gran desnivel. Este documento de trabajo, comu-

nicado en coyuntura de emergencia por FUNVISIS a los diversos entes ministeriales abocados a la evaluación del desastre de Vargas y quedado inédito, destaca la distribución cartográfica en tres pisos bioclimáticos altitudinales sucesivos escalonados entre el nivel del mar y más de 2000 metros, de las correspondientes manifestaciones de deslaves y flujos torrenciales reconocidas en función de su respectivo impacto dinámico destructor, e ilustra la contribución respectiva de aquellos pisos en el origen de la referida tragedia (Singer, 2000; Richard y Usselman, 2006). Igualmente, y no menos importante, la vertiente sur del Macizo del Ávila seguirá el mismo tratamiento técnico, a razón de preocupación bien fundada, con base en las evidencias superficiales de cicatrices de deslaves bajo bosque poco visibles y en etapas iniciales de desarrollo, a potenciales desencadenamientos futuros similares pero esta vez hacia el casco de la ciudad capital (Audemard *et al.*, 2000b; Basabe *et al.*, 2001). Por otra parte, y en calidad de insumo para fines de gestión de riesgo al nivel nacional, el mismo DCT acomete un inventario estado por estado, concerniente a las manifestaciones de aludes torrenciales más importantes arqueadas en toda la extensión del país montañoso para dar a conocer aquella realidad geológica dinámica, tomando en cuenta que aquellos fenómenos geofísicos eran tan desconocidos en 1999 por parte de la comunidad ingenieril del país y de los protocolos de gestión de riesgo, como sucedió con el terremoto en 1967 (Singer, 2010). Como consecuencia de este desconocimiento patético y notorio, Audemard (2000) lanza un llamado de atención a la comunidad profesional venezolana basado sobre soportes históricos bien documentados. De manera análoga con la castigada vertiente caribe, la vulnerabilidad del faldeo montañoso meridional de la serranía litoral ante flujos torrenciales originados por deslaves, había sido ya puesta en evidencia con motivo de los aludes torrenciales destructores del río Limón evaluados en campo por los geocientíficos del DCT al norte de Maracay en septiembre 1987 (Audemard *et al.*, 1989; Audemard y Singer, 2002). Previamente, evidencias recurrentes de aludes torrenciales fueron detectadas en la estratigrafía del propio relleno aluvial pleistoceno y holoceno del Valle de Caracas (Singer, 1974, 1977; Singer *et al.*, 2007). El periodo de retorno histórico estimado de 500 años para los depósitos geológicamente más recientes de ese valle y acotado por medio de datos arqueogeológicos (Singer *et al.*, 2010), ofrece un análogo paleo-geodinámico comparable a los eventos de diciembre 1999 en la vertiente caribe de la serranía litoral. Si bien es cierto que aquellos eventos responsables de la devastación del litoral de Vargas de manera masiva y como ninguna otra región suramericana hasta la fecha, y que por la misma razón ameritaron en los 20 años siguientes la realización de un seguimiento regular de las medidas estructurales y no estructurales desarrolladas para mitigar los efectos de nuevos eventos a futuro (López, 2010, 2021), no debe olvidarse que este género de manifestaciones exogeodinámicas telúricas representa el mecanismo evolutivo endémico más común de las laderas de nuestras montañas tropicales (e.g., Audemard, 2003), como lo ilustra la ocurrencia recurrente de eventos proporcionalmente tan devas-

tadores como el de Vargas en otras regiones olvidadas de la espina dorsal cordillerana del país. Aquellas regiones conciernen en particular al piedemonte de la serranía tachirense de Bramón en dirección a Rubio, la depresión sucrense de Cumanacoa al pie del Turimiquire y el valle del río Mocotíes al pie del páramo de Mariño en el Estado Mérida (Singer, 2010), y sin menoscabo de la vulnerabilidad de los flancos de tepuyes de Guayana ante colapsos gravitacionales de farallones rocosos y avalanchas torrenciales de escombros detríticos (Lara *et al.*, 2011). Por lo tanto, se debe evitar desmejorar la seguridad colectiva de las poblaciones de las regiones del país expuestas ante aquellos eventos de magno impacto destructor, por maximizar la atención preventiva y la reducción del correspondiente riesgo en una sola y única región sensible como el Estado Vargas. Al respecto, la puesta en práctica de aquel principio básico de gestión objetiva del riesgo-país, vuelve a ser reivindicada por los investigadores del DCT con la reciente evaluación de nuevos aludes torrenciales de impacto letal en la cuenca de Choroni de conocida atracción turística de fin de semana, pero huérfana de medidas de prevención y seguridad como el señalamiento de pasos a riesgo en los cruces de quebradas como la de Romerito, pese a lo escabroso de la vía que da acceso al litoral a través de la prolongación aragüeña de la serranía de Vargas, de manera de evitar tragedias como la ocurrida en el referido sitio durante los picos de precipitaciones de agosto-septiembre 2017 (Parra *et al.*, 2021) y no obstante las enseñanzas previas obtenidas en la vía paralela de alto riesgo hacia Ocumare de la Costa durante los funestos sucesos de El Limón en 1987 (Audemard *et al.*, 1989). El reconocimiento “en caliente” de aquellos eventos trágicos de deslaves de 1987 y 2017 es propicio para recordar la vulnerabilidad del macizo montañoso del Parque Nacional Henri Pittier y del piedemonte meridional de aquella mole neotectónica, controlada por las fallas activas de Las Trincheras y de La Victoria, en el tramo ubicado entre Bárbula desde la entrada oeste de Valencia y Guayas en su extremidad este, ante manifestaciones recurrentes de “lavas” torrenciales. Evidencias prehistóricas de estos “aluviones” se evidencian en los saques de granzón excavados en el cordón continuo de abanicos aluviales explayados en el tramo piemontino señalado, durante el Pleistoceno superior y el Holoceno, e interfieren con la traza de las referidas fallas (Singer *et al.*, 2014). La vulnerabilidad histórica de aquel corredor piemontino es ilustrada por los eventos torrenciales destructores de Taborda (1951) y Las Trincheras (1927, 1951), Cagua (1693, 1933, 1943), Turmero (1974, 1993), El Limón (1914, 1975, 1980, 1987), El Castaño (2022), La Victoria (1978), San Mateo (1976, 1979), El Consejo (1993) y Tejerías (1993, 2022) extraídos de la versión ampliada y actualizada en preparación del *Inventario Nacional de Riesgos Geológicos* de FUNVISIS, y compromete la seguridad de las poblaciones establecidas a lo largo de la antigua ruta colonial confinada a lo largo de aquel piedemonte para evitar la amenaza anual de las inundaciones de las vegas pantanosas del Lago de Valencia y del valle drenado por los “realengos” ríos Aragua y Tuy.

El impacto del terremoto de Cariaco en la comuni-

dad científica internacional abrirá oportunidades nuevas de desarrollo para el DCT, coincidente con el inicio de la gestión científica del colega Franck Audemard (1998-2010) a la cabeza de ese departamento de FUNVISIS y en su condición de jefe de fila de la Sección de Neotectónica de aquella unidad de investigación desde 1994, al haber obtenido el Doctorado en dicha especialidad en Francia el año anterior. Luego de un breve periodo cubierto por el Ing. José Antonio Rodríguez de manera interina, durante los primeros dos años de la gestión en la Presidencia de la institución del primer autor de esta nota (1996-1998), Audemard asumirá la jefatura del DCT. Previamente, había sido ampliamente formado de manera formal en las filas del DCT desde fines de 1982 inicialmente con una tesis de pregrado en la UCV pionera en el tema de la neotectónica venezolana (Audemard, 1984), asesorada por FUNVISIS en el marco de los estudios de amenaza y riesgo sísmico del Proyecto Ferrocarril Caracas-La Guaira, y posteriormente como becario del gobierno francés para realizar estudios de maestría y doctorado en la *Université de Montpellier* (1988-1993). La realización de su tesis de doctorado formará parte de otras actividades científicas institucionales de servicio contratadas por el Estado o el sector privado, de las cuales es copartícipe activo en la fase de consolidación del DCT como coordinador y/o ejecutante de los mismos. A título ilustrativo, el cuerpo medular de aquella tesis integrará los resultados científicos de 4 contratos de servicios correspondientes al noroeste venezolano entre 1989 y 1992 y ejecutados a solicitud de distintas filiales petroleras (Proyectos SUFAZ (Suministro Falcón-Zulia) para MARAVEN S.A., Licuefacción en Boca de Tocuyo de 1988 para INTEVEP S.A., Licuación Planta Olefinas del Tablazo para PEQUIVEN S.A. y Tectónica cuaternaria de Falcón oriental para INTEVEP S.A.). El levantamiento de la infor-

mación macrosísmica de un sismo moderado ocurrido en Churuguara (Falcón central) en 1990, conformará el quinto y último elemento constitutivo de su tesis doctoral. Por lo extenso de las distintas actividades de campo dedicadas a estos proyectos en Venezuela e interrumpidas por estadias académicas fuera del país, este geólogo permanecerá sólo 2 años en Francia con respecto a la duración nominal de 5 años de la beca otorgada por el gobierno francés para la realización de los referidos estudios de postgrado. Audemard asume la jefatura del DCT el 15 de julio de 1998, a más de un año de transcurrido el sismo de Cariaco del 9 de julio de 1997. Anecdóticamente, en ese transitar y a consecuencia de las políticas laborales y salariales públicas imperantes en el país, el plantel profesional del DCT llegará a su mínima expresión en el transcurso de los años 1998 a 1999 con la permanencia de Audemard en el mismo, después de una era dorada que contó hasta una docena de profesionales fijos. Posteriormente, el DCT conocerá un nuevo florecimiento en la primera década del siglo XXI (Fig. 6), para volver a una nueva lamentable contracción como consecuencia de la hiperinflación vivida por la economía nacional a partir de 2017, de la cual el DCT aún no se recupera. En la oportunidad del terremoto de Cariaco y al inicio del año 1998, Audemard dispondrá solamente del apoyo del geógrafo Rogelio González para la ejecución y evaluación de 4 trincheras de exploración paleosísmica excavadas en la ruptura de superficie cosísmica del referido evento sísmico (Audemard, 2011).

Además de constituir una experiencia de campo única para un geólogo estructuralista y sismotectonista, el sismo de Cariaco (Mw 6,9) se convertirá en un detonante para la expansión de nuevas líneas de investigación del DCT y de sus socios científicos nacionales e internacionales. Peculiaridades geológicas de este sismo, evidenciadas y enumeradas por Audemard (2019b, pág.901-905) lo llevarán a visitar 6 institutos franceses a fines de 1999, en misión institucional con miras a ampliar la cooperación internacional con este país en el desarrollo de otras e innovadoras técnicas y líneas de investigación complementarias a las ya desarrolladas en FUNVISIS en el genuino ámbito de la geología de terremotos. Una de aquellas peculiaridades –la del tsunami asociado a ese sismo, aunque muy modesto por su poca altura de olas (de apenas 1 m de alto)-, llevará Audemard a pregonar que desde entonces “...le daría la espalda a tierra para empezar a mirar al mar...”. De dicha misión nacerá una significativa y duradera cooperación simbiótica de casi 20 años de duración, en términos muy cordiales, pero igualmente muy profesionales, con la Universidad de Saboya (Chambery, Francia), con quienes se desarrollará desde el mismo año 2000, distintas líneas de investigación como: a) el estudio de los lagos (particularmente los de origen glaciar en los Andes venezolanos; Fig. 7) como registradores continuos de las deformaciones de paleo-terremotos en el archivo geológico de sus sedimentos de fondo (Carrillo *et al.*, 2009; Beck *et al.*, 2019); b) la ocurrencia de grandes deslizamientos profundos lentos en los Andes de Mérida (Audemard *et al.*, 2010); c) el análisis de la cinemática de los grandes accidentes tectónicos del país, a partir de la instalación y ejecución de campañas



Fig. 6.- Reflorecimiento del DCT para inicios del siglo XXI (fotografía en fecha 07 de marzo de 2012), bajo la jefatura del Ing. José Antonio Rodríguez. De izq. der.: Geól. Maxlimer Vallée*(†), Antrop. Alejandra Leal Guzmán, Ing. Geól. Franck Audemard (jefe DCT 1998-2010; asesor desde 01/01/2020), Téc. Geól. Parrondo, Ing. Geól. José Antonio Rodríguez (jefe DCT 2010-2021; asesor desde 2022), Geom. André Singer (jefe DCT 1979-1997; presidente FVIS 1996-2000; asesor desde 2004), Ing. Geol. Walter Reategui*, Ing. Geól. Luz María Rodríguez Dávila (jefe DCT 2022-presente), Ing. Geól. Andrei Ichaso*, Ing. Geól. Javier Oropeza*. Dib. Marina Peña, Geóg. Victoria Leal*. El asterisco (*) identifica quienes posteriormente formarán parte de la diáspora profesional venezolana. Fotografía cortesía de autor anónimo.

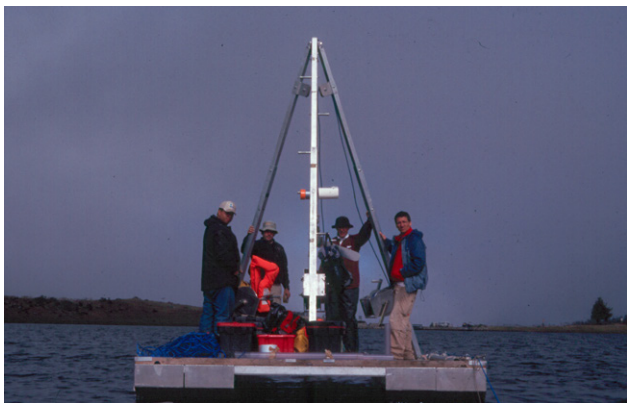


Fig. 7.- Balsa para el tomado de núcleos continuos de 3 m de longitud, perteneciente a la Université de Savoie e importada temporalmente por FUNVISIS a tal fin a fines del 2002, en la laguna periglacial de Mucubají a más de 3500 m de altitud, estado Mérida. El Dr. Christian Beck de la Univ. de Savoie está secundado a su derecha por el tesista Ing. Geol. Eduardo Carrillo (doctorado en 2006; cotutela Beck-Audemard) y por los Ing. Geól. Víctor Cano y Raymi Castilla* ambos, adscritos al DCT-FUNVISIS, a los extremos izquierdo y derecho de la fotografía, respectivamente. Fotografía cortesía de F. Audemard y tomada desde un bote dinghy inflable.

de monitoreo de redes geodésicas, proyecto iniciado en el Oriente venezolano desde el año 2003 (Fig. 8) y expandido al occidente del país desde el 2011 (Audemard *et al.*, 2020) y nunca concluido como consecuencia directa de la hiperinflación sufrida por el país en tiempos pre-pandemia COVID-19, quedando aún pendiente la instalación y seguimiento de la red central, pese a que la misma había sido contemplada entre los objetivos prioritarios del Proyecto FONACIT 2013-000361; d) la datación de depósitos cuaternarios glaciares y fluviales de los Andes de Mérida con la técnica de los nucleidos cosmogénicos (Ángel *et al.*, 2013; Guzmán *et al.*, 2013; Fig. 9); e) la adquisición de sísmica somera de alta resolución marina de las áreas costeras venezolanas en el Caribe, más precisamente en la región central y oriental, con el concurso del *Renard Centre of Marine Geology (RCMG)* de la *Universidad de Gante* en Bélgica (Van Daele *et al.*, 2011; Colón *et al.*, 2021); f) la revisión geológica sistemática de las lagunas costeras activas del oriente venezolano, entre Cabo Codera (estado Miranda) y el Morro de Chacopata en la costa suculense de la península de Araya (Audemard, 2019a, 2019b), cuyos primeros resultados promisorios conllevarían a considerar aquellas investigaciones como uno de los objetivos centrales del proyecto FONACIT 2013-000361 previamente citado; y g) la formación en paralelo de recurso humano al nivel de maestría y doctorado, entre 2002 y 2018. Al respecto, se dirigirán 20 tesis de maestría y doctorado, 10 en cada nivel, de las cuales 9 de maestría nacional y 1 extranjera (Colombia) y 7 de doctorado internacional y 3 al nivel nacional. El conjunto de siete tesis de doctorado internacional (Eduardo Carrillo Perera-2006, Oswaldo Guzmán-2013, Carlos Reinoza Gómez-2014, Iliana Aguilar-2016, Isandra Ángel Ceballos-2016, Lea Pousse-Beltrán-2017 y Sirel Colón Useche-2018) se codirigieron con colegas de las universidades de Saboya y Grenoble, hoy agrupadas en

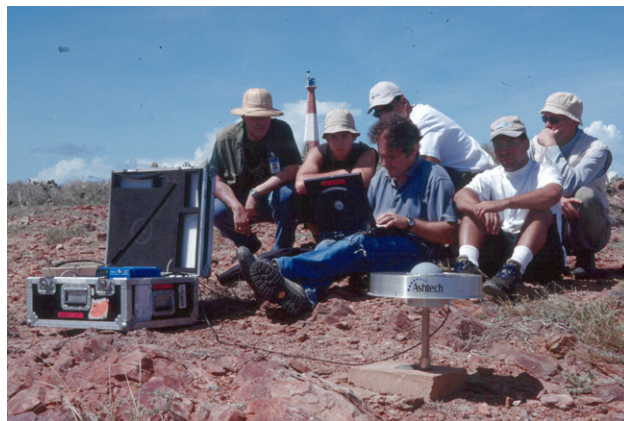


Fig. 8.- Transferencia tecnológica en el manejo de equipos GPS portátiles, entre personal de la Université de Savoie (US) y FUNVISIS, en el marco de la primera campaña de medición de diciembre 2003 de la red de 36 puntos diseminados en el oriente venezolano. En esta cooperación, se sembraron "spits" o bases de centrado forzado, como sobre el cual está instalada una antena GPS tipo choke ring de la empresa Ashtech™ por intermedio de una extensión de bronce (en primer plano), al cual se conecta un GPS Ashtech™ ZXtrem (elemento azul en caja metálica), alimentado por un panel solar (no visible). De izquierda a derecha: Ing. José Antonio Rodríguez, Peter Kantak (pasante alemán de FUNVISIS, responsable de la integración geológica de perforaciones geotécnicas del subsuelo de Caracas, a fines de microzonificación sísmica), Dr. Francois Jouanne (especialista GPS US), Ing. Víctor Cano, Ing. Reinaldo Ollarves* y Dr. Chrisitan Beck (US). Fotografía cortesía de F. Audemard (diciembre de 2003).

la *Universidad Savoie-Mont Blanc (USMB)*. Sólo tres de aquellas tesis (Reinoza, Aguilar y Colón) fueron realizadas por geólogos de FUNVISIS, y lastimosamente dos de ellos ya forman parte de la diáspora profesional venezolana desde 2018. La formación de recursos humanos de cuarto y quinto nivel en otras instituciones venezolanas en el marco de esta cooperación, además de FUNVISIS, no resultó ser casual y tenía el propósito de constituir grupos integrados

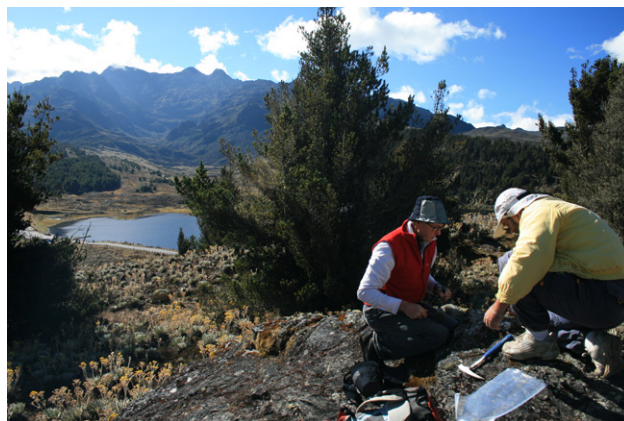


Fig. 9.- Toma de muestras "películas" ricas en cuarzo, para su datación por el método de los radio-nucleidos cosmogénicos ^{10}Be , de geoformas glaciares y periglaciares de los Andes de Mérida. Los Drs Beck (US) y Audemard aplican el muestreo en un megabloque ígneo de las morrenas del último interglaciario, que represa la laguna de Mucubají (edo. Mérida). Fotografía cortesía de E. Carrillo (diciembre de 2009).

de profesionales adscritos a varios centros de educación o investigación nacionales (por ejemplo, entre el DCT y el Instituto de Ciencias de la Tierra de la UCV, la Universidad de Los Andes y la Universidad Simón Bolívar), conforme a los objetivos estatutarios de FUNVISIS como organismo facilitador y coordinador de investigaciones sismológicas al nivel nacional, además de permitir optar por recursos de financiamiento del Estado más consecuentes, convocados u ofertados por FONACIT, bajo el formato de proyectos científicos multi-institucionales, como la *Agenda Gestión de Riesgos* abierta en 2001. Aquella fórmula era la modalidad de financiamiento científico implementada entonces por el Estado venezolano, a la que tendrá que acudir y ceñirse FUNVISIS para poder hacer ciencia y completar el presupuesto anual asignado por el Estado para simultáneamente cubrir los gastos de funcionamiento de la organización. Como elocuente ilustración de esta situación, amerita destacarse que los recursos de inversión necesarios para asegurar el mantenimiento regular de la moderna red sismológica satelital venezolana de 35 estaciones adquiridas e instaladas a contar del año 2000, gracias a los montos requeridos por FUNVISIS y otorgados a título de la ejecución de las Leyes Paraguas 1998, 1999 y 2000 y a un aporte semillero obtenido de la filial LAGOVEN de PDVSA a raíz del terremoto de Cariaco, debían correr la misma suerte año tras año. A título ilustrativo de aquella fórmula híbrida, un proyecto perteneciente a la agenda antes mencionada y coordinado por Audemard, logró ampliarse para ejecutar estudios paleosísmicos a lo largo de la falla de Boconó, para paliar las limitaciones financieras señaladas. En efecto, fuera de las 4 trincheras de exploración paleosismológica excavadas en dicha falla maestra hasta el año 2001 en los sitios de La Grita (1986), Mis Delirios (1987) en el Táchira, Buena Vista (1987) al sur de Barquisimeto y Morro de los Hoyos (1999) en los Andes de Mérida, se llegó a excavar 7 trincheras adicionales (Audemard, 2014). Amerita destacarse que la trinchera paleosísmica de Morro de Los Hoyos fue excavada gracias a fondos provenientes de la Comunidad Europea, como parte de un Curso práctico dirigido a la comunidad profesional regional a través del Proyecto PILOTO, *South American Workshop on Paleoseismology –SAWOP 97–*, dictado por instructores nacionales, latinoamericanos e internacionales (Audemard *et al.*, 1999; Fig. 10). Así mismo, ese proyecto de la *Agenda Gestión de Riesgos* del FONACIT se convertiría en la “caja chica” inicial para apuntalar nuevamente la cooperación científica franco-venezolana, previamente a contar con los recursos de 2 proyectos FONACIT-ECOS Nord (PI-2003000090 entre 2004 y 2007 y PI-2009000818 entre 2010 y 2013), que oportunamente reforzaron aquella cooperación, particularmente en lo referente a la formación de recursos humanos en Francia.

En paralelo con las investigaciones realizadas a nivel nacional, el “*savoir faire*” del DCT en los aspectos de la tectónica activa y de la paleosismología, más comúnmente agrupados bajo el término “*geología de terremotos*”, es tempranamente exportado a Colombia para asesorar a un colega del IGAC, en procura del diagnóstico de la actividad neotectónica a lo largo del frente inverso pedemon-



Fig. 10.- Excavación paleosísmica de Morro de Los Hoyos, a través de la traza activa norte de la falla de Boconó, en el páramo de Mucubají (edo. Mérida), estudiada durante el SAWOP en marzo de 1997, en el marco del proyecto PILOTO de la UE. A solicitud de los propietarios del terreno, la excavación fue reutilizada como aljibe. Audemard, en el marco del Curso “*Geodinámica y Neotectónica. Andes de Mérida*” de 2008, impartido a estudiantes y profesores de la Universidad de Los Andes –ULA–, muestra a los estudiantes las deformaciones introducidas por la falla de Boconó, la cual es muy visible en el contraste de colores de los sedimentos expuestos en la pared, a la vertical de un pequeño contra-escarpe asociado a un lomo de obturación presente en topografía. Fotografía cortesía de autor desconocido (mayo de 2008).

tano llanero de la Cordillera Oriental de Colombia, entre las poblaciones de Villavicencio y Yopal. La ocurrencia del sismo destructor de Armenia el 25 de enero de 1999, abrirá las puertas de la cooperación internacional del DCT con el hermano país vecino de manera amplia. Se excavará entonces una trinchera en la falla de Armenia, en el Departamento del Quindío en 2001 a raíz del dictado de una primera versión del curso de *Neotectónica y Paleosismología* ofrecido en el 2000, pero cuyos resultados nunca vieron la luz pública. En cambio, el estudio paleosismológico ejecutado en el año 2002 en Los Gomos sobre la falla de Ibagué con los colegas del INGEOMINAS (actual *Servicio Geológico Colombiano*) y en plan de adiestramiento práctico en paleosismología de trinchera de aquellos geólogos, será divulgado por medio de una *Publicación Geológica Especial* del otrora INGEOMINAS, siendo aún la misma una referencia latinoamericana en la especialidad (Osorio *et al.*, 2008). Es entonces, cuando la geóloga colombiana Myriam Carlota López-Cardona se convierte en la primera estudiante de maestría de Audemard en un tema de tectónica activa concerniente al valle del Cauca, cerca de la ciudad de Cali, y cuya tesis es defendida ante la Universidad EAFIT de Medellín en el año 2006. Aquella actividad de cooperación de Audemard en Colombia, lo llevará a ser conferencista invitado en una media docena de oportunidades entre 2010 y 2020 en torno a la *Gestión de Riesgos en el Piedemonte Llanero*, evento tecno-científico con tendencia a periodicidad bienal, así como instructor de cursos en varias ocasiones y para diversas universidades (Universidad de Colombia, EAFIT, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, entre otras). Estos vínculos de

cooperación se estrecharán aún más con la implementación de estudios de GPS, gracias a los cuales Audemard aportará su concurso a los colegas del proyecto *GeoRED* (“Implementación de la Red Nacional de Estaciones Geodésicas Satelitales GPS con propósitos geodinámicos”) del *Servicio Geológico Colombiano (SGC)* gracias a su participación entre 2011 y 2016, en el proyecto *COCOnet* (*Continuously Operating Caribbean GPS Observational Network*) liderado por UNAVCO y financiado por la *National Science Foundation (NSF)* de Estados Unidos. Mediante ese proyecto, Venezuela recibirá en comodato a través de FUNVISIS, seis estaciones GPS permanentes (2 en tierra firme y 4 instaladas por personal entrenado de FUNVISIS en territorio insular en la isla de Aves, Margarita (Cerro Copey), La Blanquilla, y Los Roques), como parte de la red de 57 nuevas estaciones diseminadas por el Consorcio UNAVCO en el Caribe. La tradicional relación de cooperación fronteriza establecida tempranamente entre FUNVISIS y los colegas colombianos de la ingeniería y de la geología en referencia a la región limítrofe del Norte Santander y del Táchira, en particular en torno a la unificación de las normas sísmicas en ambos lados de la frontera y a la evaluación de la trayectoria de las fallas sismogénicas transfronterizas más importantes de esta común comarca tectónica, será la justificación para la colega del DCT Luz María Rodríguez Dávila para dedicar el cuerpo central de su tesis de Doctorado defendida ante la *Universidad Central de Venezuela* (Rodríguez Dávila, 2017) a investigar la prolongación colombiana de las fallas de Boconó y de Aguas Calientes, en su condición de potenciales fallas-fuente del terremoto destructor de Cúcuta por medio de reconocimientos geológicos de campo, así como por medio de dos trincheras paleosimológicas excavadas junto con colegas del proyecto *GeoRED* del *Servicio Geológico Colombiano (SGC)* en cercanías a la ciudad de Cúcuta en dos de los ramales de la falla de Aguas Calientes (trincheras de La Casona y El Resumen; Rodríguez *et al.*, 2017a). En el lado venezolano de la frontera, se complementará con 2 trincheras de exploración paleosísmica en el tramo venezolano del segmento transfronterizo COLVEN de la falla de Boconó (trincheras El Paraizo y el Zumbador; Rodríguez *et al.*, 2017a). El DCT exportará también su pericia hacia América Central con la asesoría docente en Costa Rica del prestigioso curso itinerante auspiciado por la *Universidad de Ginebra* en 2001, conocido bajo el acrónimo *CERG* (*Certificat d’Études en Risques Géologiques*). De aquella iniciativa de cooperación con el referido curso, se beneficiarán como futuros becados una media docena de geólogos del DCT, así como profesionales de otros departamentos de FUNVISIS. A raíz del sismo de Arequipa, Perú, de junio de 2001 ocurrido unos días antes de este curso, el DCT será conducido a evaluar los efectos geológicos de dicho sismo en la región costera del centro y sur del Perú entre Lima y Tacna (Gómez *et al.*, 2002; Audemard *et al.*, 2005).

La dimensión internacional alcanzada por FUNVISIS en paleosismología, será reconocida de manera pública en el *XIV Congreso INQUA* de Berlín en 1995, cuando Audemard pasa a integrar la coordinación junto con el Dr. Ales-

sandro Michetti, de la *Universidad de la Insubria* (Como, Italia), de la recién creada *Subcomisión de Paleosismología en el seno de la Comisión de Neotectónica del INQUA* (*International Union for Quaternary Research*). Ese grupo de trabajo es ascendido a Comisión apenas 4 años más tarde en el año 1999 en el *XV Congreso* de Durban, previamente a cesar sus funciones en 2003 en el *XVI Congreso* de Reno (Nevada) por mandato re-organizacional del *Comité Ejecutivo del INQUA* liderado por el renombrado Sir Dr. Nick Shackleton. Sin embargo, aquella preocupación sigue vigente en el seno del INQUA hoy en día a cargo de un grupo de trabajo muy activo dentro de la Comisión *Procesos Terrestres*. Las credenciales de FUNVISIS tanto en las especialidades del Cuaternario y de la Geomorfología como en las de la Neotectónica y de la Paleosismología, tendrán una de sus mayores expresiones y reconocimiento oficial con el nombramiento de Audemard en la Vice-Presidencia de la *IAG* (*International Association for Geomorphology*) para el periodo 2005-2009 y en la del *INQUA* en dos periodos consecutivos (2011-2015 y 2015-2019).

Después de la acogida recibida por el curso sobre *Neotectónica y Paleosismología* dispensado en 2000 y 2001 en Colombia, una nueva edición del mismo será ofrecida por Audemard a solicitud de las universidades argentinas de Buenos Aires (UBA) y San Juan (UNSJ) a fines de 2007; y nuevamente en la UNSJ bajo la denominación “Geología de terremotos” en 2016. De aquella cooperación académica surgirá un mutuo interés en torno a la evaluación geológica de los frentes activos de deformación cuaternaria de la Pre-cordillera Oriental de Argentina entre Mendoza y San Juan. Este tema de investigación logra concretarse gracias a dos financiamientos semillero del *Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH)* en 2010 y 2018 (proyectos IPGH GEOF 03-2010 y 02-2018). La cooperación científica con los colegas de la *Universidad de San Juan* liderados por la Dra. Laura Perucca, sigue vigente actualmente, y ha dado lugar a varias publicaciones científicas (e.g., Perucca *et al.*, 2013; Audemard *et al.*, 2016; Tejada *et al.*, 2021), en particular gracias a la asesoría en trabajos de campo de jóvenes tesis doctorales argentinos. Toda esta actividad internacional se hará sin menoscabar la formación al nivel nacional, como lo evidencia la realización del Curso de “Neotectónica y Paleosismología”, impartido por los Drs. Hans Diederix (jubilado del ITC y asesor del SGC), André Singer y Franck Audemard, en las instalaciones de FUNVISIS en 2007 (Fig. 11), así como el dictado de reiterados cursos en universidades nacionales (*Universidad de Los Andes –ULA–* y *Universidad de Oriente –UDO–*) a lo largo de los años.

En el año 2016, FUNVISIS es invitado a participar en el proyecto GARANTI (*Geodynamical conditions for Aves Ridge and the lesser ANTILLES arc splitting; Condiciones geodinámicas para la separación del Alto de Aves y el arco de las Antillas Menores*), liderado por los Dr. Jean-Frédéric Lebrun (Profesor de la *Universidad de las Antillas*) y Serge Lallemand (Director de Investigación del CNRS, *Universidad de Montpellier*), ambos miembros del *Laboratorio de Géosciences Montpellier*, al aprovecharse los nexos académicos conservados por Audemard con aquella univer-



Fig. 11.- Instructores del curso internacional impartido en las instalaciones de FUNVISIS en marzo de 2007, titulado “Neotectónica: Análisis morfoestructural del terreno para estudios de la tectónica reciente”, flanqueando al presidente (2004-2008) de FUNVISIS, Dr. Gustavo Malavé Bucce, y la colega estudiante Ing. Geól. Luz María Rodríguez: Drs André Singer, Hans Diederix (jubilado ITC-Paises Bajos; asesor INGEOMINAS/actual SGC) y Franck Audemard, de izquierda a derecha. Fotografía cortesía de la Oficina de Prensa de FUNVISIS (marzo de 2007).

sidad desde sus estudios de doctorado en la misma. El objetivo central de este proyecto, era la adquisición de sismica marina multi-trazas del fondo oceánico de la región oriental de la placa Caribe, desde el Alto de Aves al oeste hasta el arco de las Antillas menores al este, así como la recolección de muestras geológicas de rocas del fondo oceánico (Fig. 12). La incorporación de Venezuela al proyecto se debía al hecho que el Alto de Aves es parte de la Zona Económica Exclusiva (ZEE) del país, por lo cual era necesaria la autorización del Gobierno venezolano para proceder a su realización por surcar aguas territoriales venezolanas. Sin embargo, la misma fue negada por las autoridades militares venezolanas por razones estratégicas de soberanía del país sobre su espacio marítimo y la exploración de los recursos de su subsuelo. Al respecto, es oportuno recordar que, después de gestiones oficiales realizadas por FUNVISIS durante cerca de una dé-



Fig. 12.- Reunión de trabajo del staff científico a bordo del B/O Atalante, del IFREMER y de bandera francesa, en la sala científica, liderada por los PIs Drs. Jean-Frédéric Lebrun y Serge Lallemand, ambos de Geosciences Montpellier. Fotografía cortesía de Leo Pierre, comunicador social de la misión (mayo de 2017).

cada, el *Ministerio de la Defensa* de Venezuela dio su visto bueno en 1992 para el desarrollo de un estudio de factibilidad destinado a la instalación de una estación sismológica en la Isla de Aves en cooperación con el *Observatorio Vulcanológico y Sismológico de La Guadalupe (OVSG; French West Indies –FWI-)* (Feuillard, 1985), para mejorar el conocimiento instrumental de la actividad sísmica en la parte oriental de la placa Caribe y como contribución al *Decenio Internacional para la Reducción de Desastres Naturales (DIRDN; 1990-1999)*.

En prolongación científica natural del proyecto GA-RANTI, el DCT pasó igualmente a formar parte del Proyecto ANR (*Agence Nationale pour la Recherche* de Francia) GAARanti (acrónimo de *Pont terrestre «GAARlandia» vs voies de dispersion à travers les Petites Antilles –Couplage entre dynamique de la subduction et processus d'évolution des espèces dans le domaine des Caraïbes-*), liderado por el Dr. Philippe Münch, también del Laboratorio *Geosciences Montpellier*. La referida participación en este par de proyectos costa afuera e insular en el Caribe, se refleja en una coautoría de al menos siete publicaciones internacionales. Al respecto, la cooperación con Francia desde el año 2000 se traducirá por unas 42 publicaciones arbitradas en las seis líneas temáticas o investigativas antes mencionadas, de las cuales sólo 7 en revistas indexadas nacionales. Últimamente, esta cooperación ha llevado a iniciar un registro sistemático de los tsunamis que afectaron las costas de las islas caribeñas francesas de ultramar, comenzando por la isla de Martinica en 2022, en el marco del proyecto francés INTERREG Caraïbes PREST (*Plateforme Régionale de Surveillance Tellurique*). Dicha actividad se está realizando en el marco de un posdoctorado de la colega del DCT, Dra. Sirel Colón Useche, domiciliado en el Laboratorio *Géosciences et Environnement de Toulouse (GET)*, y conduce a inventariar la existencia y evaluar la extensión regional hasta impactar las costas venezolanas, de potenciales eventos sísmicos tsunamigénicos (Fig. 13). Un primer artículo ha sido publicado recientemente sobre el modelaje numérico de los sismos históricos tsunamigénicos más importantes y relacionados con la subducción de las Antillas menores en las costas martiniqueñas (Colón *et al.*, 2022).



Fig. 13.- Toma de testigo para la identificación y caracterización de (paleo-) tsunamis en las costas de la isla francesa de Martinica, en proximidad del Estadio de entrenamiento La Gauloise Rugby, al SE de La Trinité, en marzo de 2022, en el marco del post-doctorado en el GET de Tolosa de la colega Ing. Geól. Sirel Colón Useche. Fotografía cortesía de F. Audemard.

Por otra parte, el DCT ha aportado su contribución al Dpto. de Sismología, y luego al de Geofísica de más reciente creación, para generar los insumos geológicos indispensables para la realización de estudios de microzonificación sísmica de las principales ciudades del país, además de continuar profundizando la cartografía neotectónica del territorio nacional iniciada en 1979 y la caracterización sismogénica de las fallas activas del país por medio de la evaluación de la actividad paleosísmica de aquellas y de sus efectos geológicos, así como gracias a la instalación y monitoreo desde 2003 de redes geodésicas satelitales (GPS diferencial). Dicha colaboración interdepartamental ha comenzado por Caracas, por resultar aquella capital huérfana hasta hace unos 15 años atrás, de perforaciones alcanzando el basamento geológico en los depocentros aluviales más profundos y sísmicamente vulnerables de Los Palos Grandes y San Bernardino, pese a las recomendaciones hechas por FUNVISIS a raíz del terremoto de 1967 sobre la trascendencia de dicha información para la microzonificación sísmica de la ciudad (FUNVISIS, 1974; Singer, 2015a). En efecto, y con base en la experiencia ingenieril obtenida del terremoto de Caracas como uno de los primeros eventos de referencia mundial concernientes a la amplificación peligrosa del nivel de intensidad sísmica asociado con la profundización local del suelo, el DCT ha invertido esfuerzos significativos en torno a la importancia de la geología urbana dentro del perímetro de las ciudades del país, en particular por las carencias de cartografía geológica convencional en el asiento de las mayores concentraciones de población, como las de particular exposición ante la amenaza de terremotos (Singer, 2015b). Al respecto, la evaluación de las correspondientes fuentes y niveles de amenaza sísmica tanto regional como local en torno a aquellos polos urbanos de riesgo, ha sido el genuino objeto de las preocupaciones del DCT desde sus inicios en beneficio del conocimiento de los parámetros sismogénicos requeridos para la caracterización de la actividad de las fallas activas en toda la extensión del país sísmico, donde se ubica la mayoría de las capitales regionales, además de la capital nacional (e.g., Audemard *et al.*, 2000a; Figs. 1 y 2). En relación con la evaluación de fuentes sísmicas, de particular interés ha sido la dedicación del DCT en torno a la evaluación temprana de depresiones tectónicas de origen geológico reciente sometidas a crecientes presiones de urbanismo, por medio de varias tesis de grado asesoradas en la UCV (Barlovento por Espinola y Ollarves, 2002 y Hernández y Rojas, 2002; Quibor-Tocuyo-Yay por Álvarez, 2006; Monay por Montenegro y Ojeda, 2008) y ULA también (La González por Santiago y Santos, 2008 y Muñoz y Ruiz, 2008; Tocuyo por Colón, 2009), después de la tesis pionera sobre la neotectónica de la cuenca del Tuy medio (Cúa-Charrallave; Audemard, 1984) y hasta la tesis más reciente sobre la cuenca de Santa-Inés-Moroturo (Alarcón, 2014; Alarcón *et al.*, 2015). Entre esas depresiones tectónicas, el valle de Caracas ha constituido una prioridad para el DCT en materia de microzonificación sísmica desde la década del 90 en cooperación con el CETE-Méditerranée de Niza-LCPC-Université de Grenoble en Francia (Duval *et al.*, 1998, 2001), así como bajo la coordinación del Departamento de Geofísica (FUNVISIS) en cooperación con universidades del Japón,

y luego en prolongación de los estudios de multi-amenazas y en particular de diversos escenarios de desastres cosísmicos planteados en Caracas por la Columbia University Graduate School of Architecture, Planning & Preservation-Lamont-Doherty Earth Observatory (2001) y por JICA (2005) en asociación con contrapartes nacionales como la de FUNVISIS (Schmitz *et al.*, 2000; 2008; 2020; Kantak *et al.*, 2005; Oropeza y Zambrano, 2007; Singer *et al.*, 2007; Oropeza y Singer, 2011; Goyo y Grillet, 2014; Osorio, 2014) y en la antenna capitalina de Guarenas-Guatire (Miró y Viete, 2009). Tal preocupación es dirigida también hacia capitales regionales como las de Barquisimeto-Cabudare (Rodríguez, 2008), Cumaná (Olivier, 2009), Mérida gracias al apoyo de tesis de grados de la ULA, así como las conurbaciones de Valencia-Maracay y de Barcelona-Puerto La Cruz, aprovechando el valioso acervo de información proporcionado por los colegas agrónomos del ex-MOP recabada desde la década del 70 sobre la cartografía de los suelos aluviales de aquellas planicies fluvio-lacustres y fluvio-marinas cuaternarias. De la misma manera que en otros temas de investigaciones trillados por el DCT, la experiencia obtenida a nivel nacional sobre el tema geológico de la microzonificación sísmica desembocará en una misión de asesoría contratada por iniciativa del colega Michael Schmitz, Jefe del Departamento de Geofísica, a través de la *Escuela Politécnica Nacional (EPN)* de Quito, con motivo de los trabajos de campo en geología de fallas activas y geología urbana requeridos para la microzonificación sísmica de la ciudad ecuatoriana de Portoviejo a raíz del terremoto destructor de abril 2016, que sacude severamente las edificaciones y los suelos geotécnicamente muy conflictivos de la paleo-ría fluvio-marina de origen reciente, donde se encuentra asentada aquella capital regional de la provincia de Manabí (Singer *et al.*, 2017; Schmitz *et al.*, 2019).

Conclusiones

Al cabo de este recorrido retrospectivo por la trayectoria trillada por el DCT en aquel primero medio centenar de años de su existencia, amerita extraerse unas enseñanzas útiles a futuro de aquella dilatada experiencia profesional, ilustrada últimamente en un Atlas Sismológico de Venezuela (1972-2022) en preparación en FUNVISIS bajo la coordinación de Luz María Rodríguez como actual cabeza del DCT. Al respecto, y en primer lugar, se debe insistir en las bondades de las actividades de servicio profesional prestadas en proyectos de investigación contratados para la generación de bases de información científica relevantes, a través de oportunidades de trabajo y financiamiento como las evocadas. En efecto, tales facilidades permitieron la excavación de varias decenas de trincheras de exploración paleosísmica con maquinaria pesada contratada, la datación geocronológica de numerosas muestras de suelo enviadas a laboratorios del extranjero a tal efecto, y de efectuar reconocimientos geológicos por helicóptero de fallas activas en zonas remotas o de difícil acceso del país, además de constituir aquellos insumos la materia prima de varias tesis de doctorado de integrantes del DCT en las especialidades correspondientes al estado del arte de la geología de terremotos. Desde el inicio de sus acti-

vidades en 1980, el DCT tuvo acceso a dichas posibilidades de investigación por interés de los sectores más dinámicos de la economía venezolana, como la industria petrolera en procura de asegurar la integridad de sus instalaciones ante la amenaza sísmica, y por exigencia de las compañías internacionales de reaseguro. La segunda enseñanza, se refiere a las bondades de la concepción integrada de la estructura técnica y científica de FUNVISIS, la cual por cierto se anticipa al modelo preconizado por la UNESCO en 1976 para los países en vía de desarrollo con respecto a la prevención y mitigación del riesgo sísmico, al asegurar FUNVISIS la unión bajo un mismo techo de la ciencia y de la ingeniería en función de su genuina misión preventiva, concerniente a la preservación de las vidas y bienes ante los embates telúricos de la naturaleza. Aquella visión a futuro acertada de los ingenieros del país, que tuvieron la responsabilidad de diseñar la estructura funcional de FUNVISIS con un estatuto legal oportuno de “fundación” a raíz del terremoto de Caracas en 1967, ha potenciado la capacidad de servicio del DCT en proyectos de investigación contratados de amenaza y riesgo sísmico; dominio complejo exigiendo la integración de una pluralidad de pericias básicas en particular en geología y geomorfología estructural aplicadas a la neotectónica, en geología y geomorfología de fallas activas, en paleosismología y sismología histórica, en geodesia satelital y en sismo-geotecnia. En consecuencia, resulta imprescindible para el Estado venezolano, más allá del mantenimiento de la mera función rutinaria de observatorio sismológico que era la del Observatorio Cagigal cuando el sorpresivo impacto destructor del terremoto de 1967 y antes de ser transferida aquella función a FUNVISIS, de preservar la dimensión plural de la capacidad de servicio de la institución y la correspondiente retroalimentación de la experiencia de nivel internacional acrisolada en actividades de proyecto por sus profesionales de mayor proyección, en aras de la formación continua de generaciones de relevo conforme a una de las metas estatutarias de FUNVISIS, exigencia que supo asegurar el DCT durante su derrotero por medio de aquella fórmula dinámica de trabajo en beneficio de la construcción sostenible del país.

Agradecimientos y financiación

Queremos sinceramente agradecer a la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) por permitirnos expresar los conceptos aquí plasmados, así como acogernos en su seno, donde todos los autores desarrollamos una parte muy importante de nuestras carreras profesionales por al menos 2 décadas. Esperamos que haya sido una relación simbiótica muy provechosa a lo largo de varias décadas. En el caso particular de FAM, agradezco la libertad de pensamiento y acción disfrutada por más de 35 años para desarrollar, inventar e innovar en el estudio por vía geológica de las fallas sismo-generadoras; por facilitarnos hacer patria, así como salvar vidas humanas y bienes. De igual manera, deseamos precisar que la presente investigación no ha recibido ayudas específicas provenientes de agencias del sector público, sector comercial o entidades sin fines de lucro. Queremos expresar nuestro agradecimiento a dos ávidos lectores y revisores, los Drs. Isabel

Rábano y Héctor Mora Páez (jubilado del SGC, con quien cooperamos ampliamente por 3 décadas, y actualmente consultor independiente), así como de la Editora, Dra. Nieves López-González, cuyos comentarios y observaciones ayudaron a pulir esta contribución.

Contribución de autores/as

Idea original, J.A.R. y A.S.; concepción y estructuración de la publicación, A.S.; coordinación, F.A.M.; redacción del manuscrito, A.S. y F.A.M.; figuras, F.A.M.; revisión del manuscrito, F.A.M., J.A.R. y L.M.R.

Referencias

- Alarcón, E., 2014. Neotectónica de la cuenca Santa Inés-Moroturo, estado Lara. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Universidad Central de Venezuela, 195 p. <http://hdl.handle.net/10872/14318>
- Alarcón, E., Audemard, F.A., Singer, A., 2015. Evidencias geomorfológicas de deformación neotectónica en la Depresión de Santa Inés, Venezuela. *Revista de la Facultad de Ingeniería*, 30 (4): 25-34.
- Altez, R., Rodríguez J.A., 2009. Catálogo Sismológico Venezolano del Siglo XX, documentado e ilustrado, 2 tomos; Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), Caracas, 822 p.
- Álvarez, M., 2006. Estudio Neotectónico de las cuencas El Tucuyo, Quibor y Yay, estado Lara. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Universidad Central de Venezuela, 225 p. <http://hdl.handle.net/10872/14781>
- Ángel, I., Carrillo, E., Carcaillet, J., Audemard, F.A., Beck, C., 2013. Geocronología con el isótopo cosmogénico ¹⁰Be, aplicación para el estudio de la dinámica glacial cuaternaria en la región central de los Andes de Mérida. *GEOS*, 44: 73-82.
- Arcia, J., Malaver, A., Ruiz, A., Alonso, J.L., 1974. Estudio de intensidad del temblor de Carúpano del 12 de junio de 1974. 1er Congreso Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica, Caracas, 1 al 5-10-1974.
- Audemard, F.A., 1984. Evaluación Geológica de la Cuenca del Tuy para fines de Investigaciones Neotectónicas. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela. 2 vol., 226 p + anexos.
- Audemard, F.A., 1998. Contribuciones de la paleosismología a la sismicidad histórica. Los terremotos de 1610 y 1894 en los Andes venezolanos meridionales. *Revista Geográfica Venezolana*, Mérida, 39 (1 y 2): 87-105.
- Audemard, F.A., 1994. Asesoría técnica en neotectónica para la tesis doctoral del Geog. Kim Robertson del IGAC-Santafé de Bogotá: informe de actividades. FUNVISIS, 8 p.
- Audemard, F.A., 2000. Aludes torrenciales en los sistemas montañosos de Venezuela: ¿Imprevisibles? X Congreso Venezolano de Geofísica, Caracas, Venezuela (Formato CD-Rom). También en *GEOS* 35 (versión electrónica).
- Audemard, F.A., 2003. Geomorphic and geologic evidence of ongoing uplift and deformation in the Mérida Andes, Venezuela. *Quaternary International*, 101-102C: 43-65. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(02\)00128-3](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(02)00128-3)
- Audemard, F.A., 2006. Surface rupture of the Cariaco July 09, 1997 earthquake on the Pilar fault, northeastern Venezuela; *Tectonophysics*, 424: 19-39. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2006.04.018>
- Audemard, F.A., 2007. Revised seismic history of El Pilar Fault, Northeastern Venezuela, from the Cariaco 1997 Earthquake

- and recent preliminary paleoseismic results. *Journal of Seismology*, 11(3): 311-326.
<https://doi.org/10.1007/s10950-007-9054-2>
- Audemard, F.A., 2011. Multiple trench investigation across the newly ruptured segment of the El Pilar fault in northeastern Venezuela, after the Cariaco 1997 earthquake. En: Audemard, F.A., Michetti, A.M., McCalpin, J. (Eds.): *Geological criteria for evaluating seismicity revisited: 40 years of paleoseismic investigations and the natural record of past earthquakes*, GSA Special papers N° 479, Boulder. 133-157.
[https://doi.org/10.1130/2011.2479\(06\)](https://doi.org/10.1130/2011.2479(06))
- Audemard, F.A., 2014. Segmentación sismogénica de la falla de Boconó a partir de investigaciones paleosísmicas por trincheras, Venezuela occidental: ¿Migración de la ruptura hacia el noreste en tiempos históricos? *Revista Asociación Geológica Argentina*, 71(2): 247-259.
<https://revista.geologica.org.ar/raga/article/view/424>
- Audemard, F.A., 2015. Active block tectonics in and around the Caribbean: a review. En: Schmitz, M., Audemard, F.A. Urbani, F. (Eds.): *El límite noreste de la Placa Suramericana. Estructuras litosféricas de la superficie al manto*; Universidad Central de Venezuela y Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, Editorial Innovación Tecnológica, Caracas, 377: 29-77.
- Audemard, F.A., 2019a. Cinco décadas de búsqueda de la huella geológica de los sismos pre-históricos en Venezuela: una actualización. *Revista Facultad Ingeniería, UCV*, 34 (1):
http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_fiucv/article/view/19295
- Audemard, F.A., 2019b. Investigaciones Marinas y Costeras Desarrolladas por Funvisis a fin de Mejorar la Estimación de la Amenaza por Sismos y Tsunamis; *Boletín de la Academia de la Ingeniería y el Hábitat*, Caracas, Venezuela, 42: 893-930.
- Audemard, F.A., De Santis, F., 1991. Survey of liquefaction structures induced by recent moderate earthquakes. *Bulletin IAEG/AIGI*, 44: 5-16. <https://doi.org/10.1007/BF02602705>
- Audemard, F.A., Leal, A., 2017. Reliability of first-hand accounts on the study of historical tsunamis in northeastern Venezuela (southeastern Caribbean Sea). *Annals of Geophysics*, 60 (6).
<https://doi.org/10.4401/ag-7437>
- Audemard, F.A., Robertson, K., 1996. Quaternary Tectonic Activity of the Llanos Foothills Thrust System, Eastern Cordillera of Colombia: Geomorphological and Geological evidences from La Florida Anticline, Between the Upía and Cusiana Rivers. 3rd International Symposium on Andean Geodynamics, Saint-Malo, France, 137-140 (Extended Abstract).
- Audemard, F.A., Singer, A., 1996. Active fault recognition in northwestern Venezuela and its seismogenic characterization: neotectonic and paleoseismic approach. *Geofísica Internacional*, 35(3): 245-255.
<https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.1996.35.3.460>
- Audemard, F.A., Singer, A., 2002. El alud torrencial del 6-09-1987 en la cuenca del río Limón al norte de Maracay septentrional. En: Lugo, J. Inbar, M. (Eds.) *Desastres en América Latina*, Fondo de Cultura Económica, México, 409-412.
- Audemard, F.A., Beck, C., Carrillo, E., 2010. Deep-seated gravitational slope deformations along the active Boconó fault in the central portion of the Mérida Andes, western Venezuela. *Geomorphology*, 124: 164-177.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.04.020>
- Audemard, F.A., Gómez, J.C., Tavera, H., Orihuela, N., 2005. Soil liquefaction during the Arequipa Mw 8.4 June 23 2001 earthquake, southern Peru. *Engineering Geology*, 78: 237-255. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.12.007>
- Audemard, F.A., Rodríguez, J.A., Singer, A., Stockhausen, H., 2000b. Evaluación cartográfica preliminar de las inestabilidades de ladera en la vertiente sur del Ávila, ocasionadas por las lluvias anómalas de diciembre de 1999. Informe Inédito de FUNVISIS para Ministerio de Ciencia y Tecnología. 5 p.
- Audemard, F.A., De Santis, F., Montes, L., Lugo, M., Singer, A., 1989. El alud torrencial del 06-09-1987 en el Río Limón, Estado Aragua, Venezuela; *Memorias 50º Aniversario de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica 1938-1988*, UCV-GEOS, Caracas, 29: 250-260.
- Audemard, F.A., Machette, M., Cox, J., Hart, R., Haller, K. (Comp.), 2000a. Map and database of Quaternary faults in Venezuela and its offshore regions. Open-File Reports, OFR-00-0018, US Geological Survey, Reston, VA, United States.
<https://doi.org/10.3133/ofr0018>
- Audemard, F.A., Reinoza, C., López, R., Feaux, K., Jouanne, F., 2020. Instalación de estaciones geodésicas de monitoreo continuo para fines geocientíficos en el margen Caribe sureste. *Boletín de Geología*, 42(2).
<https://doi.org/10.18273/revbol.v42n2-2020001>
- Audemard, F.A., Perucca, L.P., Pantano, A., Avila, C., Onorato, M.R., Vargas, H. N., Alvarado, P., Viete, H., 2016. Holocene compression in the Acequión valley (Andes Precordillera, San Juan Province, Argentina): Geomorphic, tectonic, and paleoseismic evidence. *J. South American Earth Sciences* 67: 140-157. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.02.005>
- Audemard, F.A., Pantosti, D., Machette, M., Costa, C., Okumura, K., Cowan, H., Diederix, H., Ferrer, C., SAWOP Participants, 1999. Trench investigation along the Merida section of the Boconó fault (central Venezuelan Andes), Venezuela. En : Pavlides, S., Pantosti, D., Peizhen, Z. (Eds.): *Earthquakes, Paleoseismology and Active Tectonics. Selected papers to 29th General Assembly of the Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior (IASPEI)*, Thessaloniki, Greece, agosto 1997. *Tectonophysics*, 308: 1-21.
[https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00085-2](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00085-2)
- Basabe, P., Neumann, H., Singer, A., 2001. Proyecto PREVENI. Aporte a la prevención de desastres naturales en Venezuela; *Cooperación Venezuela-Suiza y PNUD 2000-2001*, Caracas, 239 p.
- Beck, C., Carrillo, E., Audemard, F.A., Van Welden, A., Disnar, J.-R., 2019. Tentative integration of paleoseismic data from lake sediments and from nearby trenches: The central section of the Boconó Fault (northern Venezuela). *Journal of South American Earth Sciences*.
<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.03.028>
- Beltrán, C. (Comp.), 1993. Mapa neotectónico de Venezuela en escala 1:2.000.000. Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS).
- Carrillo, E., Beck, C., Audemard, F.A., 2009. La paleosismología lacustre: Una nueva herramienta en la evaluación del peligro sísmico en Venezuela. *Boletín de la Academia de las Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales*, 64(1): 9-20.
- Casas Sainz, A., 1991. Estudio sismotectónico del valle del Yaracuy. Informe FUNVISIS y Cooperación del Ministerio de Educación y Ciencia del Gobierno español por intermedio de la Universidad de Zaragoza, 120 p + un mapa anexo 1:100.000.
- Colón, S., 2009. Estudio Geológico integrado de la cuenca de El Tocuyo - Estado Lara, con fines de microzonificación sísmica. Trabajo especial de grado, Universidad de Los Andes, Mérida, 155 p.
- Colón-Useche, S., Audemard M., F.A., Christian Beck, C., Padrón, C., De Batist, M., 2021. Margen norte costa afuera de Venezuela: sísmica marina de alta resolución entre Golfo Triste y Cabo Codera. En: Perucca, L. Audemard M., F.A. (Eds.), *De la falla activa a la amenaza sísmica en América*

- latina y el Caribe, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 73 (2), A060121.
<https://doi.org/10.18268/BSGM2021v73n2a060121>
- Colón, S., Clouard, V., Ioualalen, M., Audemard, F. A. Monfret, T., 2022. Mapping of the tsunami inundation in the island of La Martinique due to the local seismicity. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 113, 252-267.
<https://doi.org/10.1785/0120220093>
- Columbia University Graduate School of Architecture, Planning and Preservation-Lamont-Doherty Earth Observatory, 2001. Disaster Resistant Caracas. Urban Planning Studio 2001, 126 p.
- Dasco, A., Rodríguez, L.M., Singer, A., Quintero, B., 2013. El caso Cubiro: una experiencia de gestión de riesgo compartida en una población del interior de Venezuela afectada por deslizamientos de tierra. 4to Coloquio Meso-Americano en Gestión de Riesgo, Desastres y Cambio climático, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México, 8 p.
- Dewey, J.W., 1986. Report of trip to Caracas, Venezuela, to evaluate the significance of recent moderate earthquakes at various locations to northern Venezuela, submitted to Dave Russ, Office of Earthquakes, Volcanoes and Engineering, US Geological Survey.
- De Santis, F. (Coord.), Rodríguez, J.A., Chacín, C., Adrianza, A., 1992. Resultados del programa de control instrumental preventivo de movimientos del terreno en la Urbanización Nueva Tacagua (noviembre 1990 a septiembre 1992). Informe FUNVISIS, Dpto. Ciencias de la tierra, Caracas, 129 p + anexos.
- De Santis, F., Sève, G., Pouget, P., Singer, A., Durville, J.-L., 1993. Suivi instrumental rustique des glissements de terrain dans les zones marginales de Caracas: le cas de Nueva Tacagua; PANGAEA, Centre International pour la Formation et les Échanges Géologiques (CIFEG), París, 19: 8-15.
- Duval, A.-M., Méneroud, J.-P., Vidal, S., Singer, A., 1998. Relation between curves obtained from microtremor and site effects observed after Caracas 1967 earthquake. 11th European Conference on Earthquake Engineering, Balkema, Rotterdam, 9p.
- Duval, A.-M., Vidal, S., Méneroud, J.-P., Singer, A., De Santis, F., Ramos, C., Romero, G., Rodríguez, R., Pernía, A., Reyes, N., Grimán, C., 2001. Caracas, Venezuela, site effect determination with microtremor. *Pure Applied Geophysics (PA-GEOPH.)*, 2513-2523.
https://doi.org/10.1007/978-3-0348-8177-7_14
- Ehrlich, J., De Santis, F., Sève, G., Pouget, P., Hernández, C., Singer, A., 1997. Monitoring experience by mean of a telemetric system in a vital structure, Caracas, Venezuela. 2nd Panamerican Symposium on Landslides, II PSL/COBRAE Proceedings, Río de Janeiro, 10 al 14/11/1997.
- Espínola, E., Ollarves, R., 2002. Estudio tectono-estratigráfico de la margen septentrional de la cuenca de Barlovento: implicaciones neotectónicas. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Universidad Central de Venezuela, 244 p. <http://hdl.handle.net/10872/126>
- Feuillard, M., 1985. Note sur l'opportunité d'une station de détection sismique sur l'île de Aves (Vénézuéla); Observatoire Sismologique et Volcanologique de La Soufrière, Saint-Claude, Guadeloupe (FWI), mars 1985. 11 p.
- Ferrer de Singer, F., 2007. Hacia la construcción de una nueva cultura de riesgo... De Adela, damnificada y vecina de Nueva Tacagua a la maestra "Made" de Cariaco. Antecedentes del Aula Sísmica "Madeilis Guzmán". Libro editado en homenaje a la profesora Flor Ferrer de Singer, fundadora ad honorem del Aula Sísmica de FUNVISIS, Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), Caracas, Serie Técnica 01, Mayo 2007, 82 p.
- FUNVISIS, 1974. Plan básico para las investigaciones sismológicas en Venezuela. Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), Caracas, 166 p y anexos.
- FUNVISIS, 1996. Origen y evolución de la asignación patrimonial realizada por el Ejecutivo a FUNVISIS, con fundamento en la ley mediante la cual se transfiere al Instituto Nacional de la Vivienda, la administración del fondo de asistencia financiera creado para atender las necesidades del sismo de 1967. Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), Caracas.
- Gallardo, C., Díaz Quintero, A., Pimentel, N., 1974. Observaciones geológicas sobre el sismo del 12 de junio de 1974 en Carúpano. 1er Congreso Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica, Caracas, 1 al 5-10-1974.
- Giraldo, C., Beltrán, C., 1988. Evaluación del campo de esfuerzos durante el Cuaternario en la región nororiental de Venezuela. Proyecto CONICIT S1-1161. Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), 68 p + 8 anexos.
- Gómez, J.C., Audemard, F.A., Quijano, J., 2002. Efectos geológicos asociados al sismo del 23 de junio del 2001 en el sur del Perú. Instituto Geofísico del Perú, 159-174 (en CD).
- Goyo, F., Grillet, J., 2014. Evaluación de los efectos locales de origen geológico que incidieron en los daños ocasionados por el terremoto de Caracas de 1967; Trabajo Especial de Grado, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Universidad Central de Venezuela, Caracas, 118 p.
- Grases, J., 1977. Introducción al estudio sobre los sismos históricos destructores del Caribe. *Interciencia*, Caracas, 2(4): 222-229.
- Grases, J., 2002. Introducción a la evaluación de la amenaza sísmica en Venezuela. Acciones De Mitigación. Fondo Pedro Grases, Caracas, 249 p.
- Guzmán, J.L., 1999. El Aula Sísmica y el diseño de estrategias pedagógicas dirigidas a comunidades vulnerables ante riesgos naturales de origen geofísico. Jornadas Antillanas Franco-Venezolanas sobre Vulnerabilidad de las Comunidades ante Riesgos Naturales de Origen Geofísico, Aula Sísmica "Madeilis Guzmán", Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), El Llanito, Caracas, 29 de noviembre al 8 de diciembre de 1999.
- Guzmán, O., Vassallo, R., Audemard, F.A., Mugnier, J.-L., Oropeza, J., Yepez, S., Carcaillet, J., Alvarado, M., Carrillo, E., 2013. ¹⁰Be dating of river terraces of Santo Domingo River, on Southeastern flank of the Mérida Andes, Venezuela: tectonic and climatic implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 48: 85-96.
<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2013.09.004>
- Hernández, J., Rojas, E., 2002. Estudio tectono-estratigráfico de la margen meridional de la cuenca de Barlovento: implicaciones neotectónicas. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Universidad Central de Venezuela, 200 p. <http://hdl.handle.net/10872/14969>
- JICA, 2005. Plan Básico de Prevención de Desastres en el Distrito Metropolitano de Caracas. Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), 5 Volúmenes.
- Kantak, P., Schmitz, M., Audemard, F.A., 2005. Sediment thickness and a west-east geologic cross section in the Caracas valley. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela*, 20(4): 43-56.
- Lara, S., González, L., Suárez, C., 2011. Depósitos fluviotorrenciales en la construcción del cono de deyección de Kavak, SE del Auyantepui, Estado Bolívar, Venezuela. *Acta Científica Venezolana*, 62 (1-2): 5-18.
- Leal, A., 2015. Las "casas contra temblores". Un aporte al estudio de la ingeniería sismorresistente en Venezuela, Siglo XIX. X

- Congreso Venezolano de Sismología e Ingeniería sísmica, Cumaná, 28 al 30 de octubre de 2015.
- López, J.L. (Ed.), 2010. Lecciones aprendidas del desastre de Vargas. Apuntes científico-tecnológicos y experiencias en el campo de la prevención y mitigación de riesgos. IMF-UCV y Empresas Polar, Caracas, 808 p.
- López, J.L. (Ed.), 2021. Los aludes torrenciales de 1999 en Vargas, 20 años después. IMF-UCV y Academia Nacional de la Ingeniería y del Hábitat, Caracas, 709 p (en digital).
- Lugo, M., 1982. Sismicidad histórica del suroeste de los Andes venezolanos. XXXII Convención Anual de la Asociación Venezolana para el Avance de la Ciencia (AsoVAC), Caracas, Acta Científica Venezolana, 33 (1): 212 (resumen).
- Marín, W., Guzmán, J.L., Aguilar, A., 2005. El Aula Sísmica Madeleilis Guzmán. Una contribución a la gestión de riesgos en Venezuela. Memorias IV Coloquio sobre Microzonificación Sísmica, Barquisimeto, Fundación Venezolana de Investigaciones sismológicas (FUNVISIS), Serie Técnica 01-2005: 174-177.
- Miró, C., Viete, H., 2009. Estudio neotectónico de la cuenca Guaranas-Guatire, estado Miranda; Trabajo Especial de Grado, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Universidad Central de Venezuela, 210 p. <http://hdl.handle.net/10872/14521>
- Mocquet, A., Beltrán, C., Lugo, M., Rodríguez, J.A., Singer, A., 1996. Seismological interpretation of the historical data related to the 1929 Cumana Earthquake, Venezuela. Proceedings Third ISAG, Saint-Malo, France, 17-19/09/1996: 203-206.
- Montenegro, R., Ojeda, J., 2008. Estudio neotectónico de la cuenca de Monay, estado Trujillo. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Universidad Central de Venezuela, 226 p, <http://hdl.handle.net/10872/14591>
- Muñoz Santiago, M.A., Ruíz Pernía, E.B., 2008. Caracterización estratigráfica de la cuenca "La González", en su sección de la quebrada Casés, e implicaciones neotectónicas, estado Mérida. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Geología, Universidad de Los Andes, 356 p.
- Muñoz, N.G., Singer, A., 1977. Varvas lacustres pre-holocenas con índices de asentamientos y deformaciones tectónicas recientes en la parte occidental del Valle de Caracas. Seminario Internacional sobre Riesgo Geológico, Caracas, OEA-FUNVISIS-UCV-CIV, Boletín Técnico del IMME (Instituto de Materiales y Modelos Estructurales), Universidad Central de Venezuela, Caracas, 57-58: 3-9.
- Murria, J., 2008. El papel de los medios de comunicación en la reducción del riesgo de desastres. Algunos problemas prioritarios y posibles estrategias para resolverlos. En: Altez, R., Barrientos, Y. (Coords.), Perspectivas venezolanas sobre riesgos: reflexiones y experiencias, Volumen 1, Universidad Pedagógica Experimental Libertador (UPEL), Instituto Pedagógico de Caracas, Núcleo de Investigación del Medio Físico Venezolano, 450 p: 425-439.
- Olivier, M., 2009. Evaluation of the Liquefaction Potential of the City of Cumana, Venezuela. Internship Report 2009, École Polytechnique de l'Université Joseph Fourier de Grenoble, 49 p.
- Oropeza, J., Singer, A., 2011. Propuesta geológica de microzonas sísmicas para la ciudad de Caracas. Revista de la Facultad de Ingeniería, UCV, Caracas, 26 (2): 129-140.
- Oropeza, J., Zambrano, A., 2007. Elaboración de una base de datos de geología urbana para fines de microzonificación sísmica para la ciudad de Caracas. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Universidad Central de Venezuela, Caracas. 246 p.
- Osorio, I., 2014. Evaluación geológica a escala 1:5.000 de las áreas de relleno artificial en las colinas del sureste de Caracas en su condición de vicio potencial de subsuelo. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Universidad Central de Venezuela, Caracas, 137 p.
- Osorio, J., Montes, N., Velandia, F., Acosta, J., Romero, J., Diederix, H., Audemard, F.A., Núñez, A., 2008. Paleosismología de la Falla de Ibagué. Publicaciones Geológicas Especiales, INGEOMINAS, Bogotá, Colombia, 29, 240 p. <https://doi.org/10.32685/9789589789674>
- Parra, J., Linares, M.E., Contreras, F., Singer, A., 2021. Los aludes torrenciales de agosto de 2017 en la cuenca de Choroni: una contribución al conocimiento de deslaves destructores en la prolongación aragüeña de la Serranía litoral. En: López, J.L. (Ed.), Los aludes torrenciales de 1999 en Vargas, 20 años después; IMF-UCV y Academia Nacional de la Ingeniería y del Hábitat, Caracas, 709 p: 188-203.
- Perucca L., Audemard, F.A., Pantano, A., Ávila, C.R., Onorato, M.R., Vargas, H.N., 2013. Fallas cuaternarias con vergencias opuestas entre Precordillera Central y Oriental, Provincia de San Juan. Revista Asociación Geológica Argentina, 70(1): 291-302.
- Philip, H., 1974. Compte-rendu de la mission effectuée par Hervé Philip au titre de la coopération scientifique entre le Ministère des Mines et Hydrocarbures (MMH) et le Service Français des Affaires Scientifiques du Ministère des Affaires Étrangères, Paris.
- Proyecto SISRA, 1985. Programa para la mitigación de los efectos de los terremotos en la región andina; Volumen 11: Mapa Neotectónico preliminar para América del Sur. Centro Regional de Sismología para América del Sur (CERESIS), Lima, Perú, 110 p.
- Pulido de Briceño, M., 1998. Aula Sísmica. La naturaleza puede aliarse con el conocimiento. Revista SIC, Caracas, 606: 254-257.
- Quarantelli, E.L., 1998. Textos de Cuatro Conferencias y de un Seminario a cargo del Dr. E.L. Quarantelli, Conferencista invitado del Centro de Investigación de Desastres, Universidad de Delaware (Newark, Estados Unidos). En: Murria, J. Ferrer de Singer, F. (Eds), Primeras Jornadas "Sociedad y Desastres" organizadas por el Aula Sísmica "Madeleilis Guzmán" de la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), 07 al 14 de junio de 1998, El Llanito, y Universidad Pedagógica Experimental Libertador, Instituto Pedagógico de Caracas, El Paraíso, Aula Sísmica, FUNVISIS.
- Quintero, B., 2015. Preparación comunitaria para la mitigación del riesgo de tsunami para la población de los Municipios Maracaibo, Mara, Almirante Padilla, Miranda y Lagunillas del Estado Zulia en el Ejercicio "Caribbean Wave, 2015". X Congreso Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica, Cumaná, 28 al 30 de octubre de 2015.
- Richard, D., Usselman, P., 2006. Is the Vargas 1999 event repeatable? En: López, J.L. García, R. (Eds.), Los aludes torrenciales de diciembre 1999 en Venezuela, Editorial Gráficas Lauki, Caracas, 1055 p: 58-67.
- Rodríguez, J.A., 1998. De la sismicidad histórica a la sismicidad instrumental: el terremoto de Cumaná de 1929; Revista Geográfica Venezolana, Mérida, 39 (1 y 2): 189-201.
- Rodríguez, J.A., Leal, A., 2012. Catálogos sismológicos venezolanos. Estado del arte. En: Lertora Mendoza (Coord.), Territorio, recursos naturales y ambiente: hacia una historia comparada, Geonaturalia, Ed. F.E.P.A.I., Buenos Aires, 485 p: 279-311.
- Rodríguez D., L.M., 2008. Evaluación de geoamenazas con fines de microzonificación sísmica en las ciudades de Barquisimeto y Cabudare, estado Lara; Tesis de Maestría, Universidad Simón Bolívar, Caracas, 111 p.

- Rodríguez D., L.M., 2017. Neotectónica y paleosismología en los Andes de Mérida, en la zona limítrofe colombo-venezolana: con énfasis en las fallas de Boconó y Aguas Calientes. Tesis doctoral, Doctorado individualizado del postgrado Ciencias de la Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, 2 tomos, 256 p + 213 p.
- Rodríguez D., L.M., Diederix, H., Torres, E., Audemard M., F.A., Mora, H., Aray, J., Bohórquez, O., Hernández, C., 2017a. Sistemas de fallas de Boconó y Aguas Calientes entre La Grita (edo. Táchira) y Chinácota (dpto. Norte de Santander): resultados de estudios neotectónicos, paleosísmicos y de sismicidad histórica. XI CONVESIS, Caracas, Venezuela, 17-19/07/2017.
- Rodríguez D., L.M., Diederix, H., Torres, E., Audemard, F.A., Hernández, C., Singer, A., Bohórquez, O., Yépez, S., 2017b. Identification of the seismogenic source of the 1875 Cucuta earthquake on the basis of a combination of neotectonic, paleoseismologic and historic seismicity studies. *Journal of South American Earth Sciences*.
<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.09.019>
- Santiago, F., Santos, M.A., 2008. Lito- y crono-estratigrafía de la cuenca La González, estado Mérida, en su sección de la quebrada El Barro. Implicaciones neotectónicas. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Geología, Universidad de Los Andes, 352 p.
- Schmitz, M., Enomoto, T., Abeki, N., Rocabado, V., Kantak, P., Matsuda, I., Masaki, K., Audemard, F.A., Malavé, G., Navarro, M., Delgado, J., 2000. Fundamental periods of soil and geological characteristics of Caracas valley and Vargas state. *Proceedings Sixth International Conference on Seismic Zonation*.
- Schmitz, M., Hernández, J.J., Morales, C., Molina, D., Vallée, M., Domínguez, J., Delavaud, E., Singer, A., González, M., Leal, V., el Grupo de Trabajo del Proyecto de Microzonificación Sísmica de Caracas, 2008. Resultados principales del Proyecto de Microzonificación Sísmica en Caracas. *Memorias Conferencia 50 Aniversario de la Sociedad Venezolana de Geotecnia*, 6 al 9-11-2008, Caracas, 11 p.
- Schmitz, M., Hernández, J.J., Rocabado, V., Domínguez, J., Morales, C., Vallée, M., García, K., Sánchez, J., Singer, A., Oropeza, J., Coronel, G., Flores, A., the Caracas Seismic Microzoning Project working Group, 2020. The Caracas, Venezuela, Seismic Microzoning Project: Methodology, results and implementation for Seismic Risk Reduction. *Progress in Disaster, Science* 5.
<https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2019.100060>
- Schmitz, M., Yepes, H., Hernández, J.J., Koch, J., Palacios, P., Marrero, J.M., Singer, A., Marcial, D., Sánchez, J., García, K., Rocabado, V., Yegres, L., Osorio, I., Parra, J., Cárdenas D., The Portoviejo Seismic Microzoning Working Group, 2019. Seismic Microzoning evaluation of Portoviejo City, Ecuador. 8th International Symposium on Andean Geodynamics -8th ISAG-, 24 to 26-09-2019, Quito, Ecuador.
- Sheperd, J.B., Sébrier, M., Aggarwal, Y., 1984. Investigation of the El Pilar Fault Zone of Venezuela as an Experimental Site for Research on Earthquake Prediction. A report to CERESIS for Evaluation to the UNESCO Ad-hoc Working Group on International Experimental Sites for Earthquake Prediction. 14 p, 4 figs. (Incluye un mapa tectónico de la traza de las fallas activas de El Pilar y de otras zonas de fallas orientales).
- Singer, A., 1974. Acumulaciones holocenas torrenciales catastróficas, de posible origen sísmico, y movimientos neotectónicos de subsidencia en la parte oriental del Valle de Caracas. 1er Congreso Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica, Caracas, 1 al 5-10-1974.
- Singer, A., 1977. Tectónica reciente, morfogénesis sísmica y riesgo geológico en el graben de Caracas. Seminario Internacional sobre Riesgo Geológico, Caracas, OEA-FUNVISIS-UCV-CIV, 25 al 30 de julio de 1977.
- Singer, A., 2000. Reconocimiento por helicóptero de las áreas-fuente, trayectorias y sectores de expansión de los aludes torrenciales del 15 y 16-12-1999. En: Singer, A., Rodríguez, J.A., Evaluación cartográfica de las áreas-fuente, trayectorias y sectores de expansión de los aludes torrenciales ocurridos en el litoral central los días 15 y 16 de diciembre de 1999, Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), Ministerio de Ciencia y Tecnología, Caracas, 5 p + un mapa de deslaves y "lavas" torrenciales en escala 1:100.000 en el tramo cordillerano ubicado entre el gran deslizamiento costero y actividad recurrente de Las Salinas (Taguao) al oeste y los deslaves de Osma al este.
- Singer, A., 2008. Urbanismo, vulnerabilidad y gestión de riesgo. ¿Cómo devolver a las comunidades vulnerables el rol que les corresponde como componente fundamental de las políticas públicas de reducción del riesgo a nivel local? En: Altez, R., Barrientos, Y. (Coords.), *Perspectivas venezolanas sobre riesgos: reflexiones y experiencias*, Volumen 1, Universidad Pedagógica Experimental Libertador (UPEL), Instituto Pedagógico de Caracas, Núcleo de Investigación del Medio Físico Venezolano, 450 p: 171-186.
- Singer, A., 2010. Los aludes torrenciales en Venezuela: antecedentes. En: López, J.L. (Ed.), *Lecciones aprendidas de Vargas*. Apuntes científico-tecnológicos y experiencias nacionales en el campo de la prevención y mitigación de riesgos, IMF-UCV y Empresas Polar, Caracas, 808 p: 66-80.
- Singer, A., 2015a. Antecedentes históricos sobre microzonificación sísmica en Caracas. En: Schmitz, M., Singer, A. (Eds.), *Microzonificación sísmica de Caracas*, Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) y Alcaldía de Chacao (Caracas), 177 p.
- Singer, A., 2015b. Geología urbana en Venezuela; pasado, presente y futuro. *Boletín de la Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales*, Caracas, LXXV (4): 55-74.
- Singer, A., 2019. Introducción a la morfogénesis sísmica de los Andes Venezolanos: perspectiva regional y casos cosísmicos particulares. *Revista de la Facultad de Ingeniería*, Universidad Central de Venezuela, Caracas, 34(4).
- Singer, A., 2021. El amanecer de FUNVISIS hace medio siglo o el derecho de nacer de la "vacuna" sismorresistente venezolana. *Boletín de Historia de las Geociencias en Venezuela*, Caracas, 136: 170-174.
- Singer, A., 2022. Mis recuerdos y contribución en torno al desarrollo de relaciones de cooperación en geología entre Francia y Venezuela. *Boletín de Historia de las Geociencias en Venezuela*, 138: 44-92.
- Singer, A., Audemard, F.A., 1997. Aportes de Funvisis al desarrollo de la geología de fallas activas y de la paleosismología para los estudios de amenaza y riesgo sísmico. En: Grases, J. (Ed.), *Diseño sismorresistente. Especificaciones y Criterios empleados en Venezuela*, Publicación Especial Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales, 33: 25-38.
- Singer, A., Lugo, M., 1982. El alud sísmico del 3 de febrero de 1610 en el valle del Mocotíes (Andes venezolanos). *Confrontación de los testimonios del Siglo XVII y de las evidencias actuales de campo*. XXXII Convención Anual AsoVAC, Caracas, Acta Científica Venezolana, 33 (1): 214 (resumen).
- Singer, A., Soulas, J.P., 1979. Lugar y trascendencia de Nueva Cádiz de Cubagua en el historial de las primeras catástrofes naturales del país. Proyecto "Arqueología de Nueva Cádiz", Ministerio de la Juventud y Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), Caracas, 3 p.

- Singer, A., Rodríguez D., L.M., Colón, S., 2017. Evaluación de geoamenazas para la microzonificación sísmica de Portoviejo, Ecuador. En: Yepes, H., Schmitz, M. (Coord.), Estudio de microzonificación sísmica de la ciudad y del Cantón de Portoviejo, Manabí (Ecuador), Escuela Politécnica Nacional (EPN) de Quito, Ecuador, Informe inédito, 20 p.
- Singer, A., Rojas, C., Lugo, M., 1983. Inventario Nacional de Riesgos Geológicos. Estado preliminar. Mapa, Glosario y Comentarios. Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), Caracas, Serie Técnica 03-83, 126 p.
- Singer, A., Nevado, F., Gómez, A. Rodríguez D., L.M., 2014. Evidencias de actividad tectónica reciente en la falla de Las Trincheras. VI Coloquio de Microzonificación Sísmica, 30 y 31 de octubre de 2014, Valencia, Venezuela, 6 p.
- Singer, A., Rodríguez D., L.M., Audemard, F.A., Ollarves, R., 2010. Estimación del período de retorno de manifestaciones de aludes torrenciales en la Serranía del Litoral por medio de dataciones C14 obtenidas en trinchera al pie del Ávila y por vía arqueogeológica en las formaciones aluviales del Valle de Caracas. En: López, J. L. (Ed.), Lecciones aprendidas de Vargas. Apuntes científico-tecnológicos y experiencias nacionales en el campo de la prevención y mitigación de riesgos, IMF-UCV y Empresas Polar, Caracas, 808 p: 115-125.
- Singer, A., Zambrano, A., Oropeza, J., Tagliaferro, M., 2007. Cartografía de las unidades geológicas cuaternarias del Valle de Caracas en escala 1:25.000. Memorias IX Congreso Geológico Venezolano, GEOS-UCV, Caracas, 39: 13 p (en DVD).
- Tejada, F., Rothlis, M., Onorato, M.R., Blanc, P.A., Perucca, L., Vargas, H.N., Audemard, F.A., 2021. Análisis combinado geodésico, neotectónico y paleosísmico de la falla Loma Negra Oriental, frente orogénico de Precordillera Central, Argentina. En: Perucca, L., Audemard, F. A. (Eds.), De la falla activa a la amenaza sísmica en América latina y el Caribe, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 73 (2), A080121. <https://doi.org/10.18268/BSGM2021v73n2a080121>
- UNESCO, 1987. Reduction of Catastrophic Earthquake Risk in the Caribbean Area. Intercountry project of the government of Venezuela, Colombia, Costa Rica, Panama, Cuba, Nicaragua, Jamaica, Dominican Republic, Trinidad, Guatemala, Guadeloupe-Martinique (FWI), as a contribution to the 500 Anniversary of the Discovery of America. United Nation Development Programme, Regional Latin American Programme, Executing Agency UNESCO, Earth Sciences Division, Paris, 26 p.
- Urbani, F., 2000. Revisión de las unidades de rocas ígneas y metamórficas de la Cordillera de la Costa, Venezuela. GEOS, UCV, Caracas, 33: 1-170.
- Urbani, F., 2015. Terrane distribution in north-Central Venezuela. En: Schmitz, M., Audemard, F.A., Urbani, F. (Eds.), El límite Noreste de la Placa Suramericana. Estructuras litosféricas de la superficie al manto, Universidad Central de Venezuela (Facultad de Ingeniería) y Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, Editorial Innovación Tecnológica, Caracas, 377 p: 79-102.
- Urbani, F., Gómez, A., 2015. Contribuciones del Proyecto GEODINOS a la cartografía geológica del norte de Venezuela. En: Schmitz, M., Audemard, F.A., Urbani, F. (Eds.), El límite Noreste de la Placa Suramericana. Estructuras litosféricas de la superficie al manto, Universidad Central de Venezuela y Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, Editorial Innovación Tecnológica, Caracas, 377 p: 363-376.
- Urbani, F., Rodríguez, J.A., 2004. Atlas geológico de la Cordillera de la Costa, Venezuela. Fundación Geos-UCV-FUNVISIS, xii + 147 hojas geológicas.
- Van Daele, M., Van Welden, A., Moernaut, J., Beck, C., Audemard, F.A., Sanchez, J., Jouanne, F., Carrillo, E., Malavé, G., Lemus, A., De Batist, M., 2011. Reconstruction of Late Quaternary sea- and lake-level changes in a tectonically active marginal basin using seismic stratigraphy: the Gulf of Cariaco, NE Venezuela. Marine Geology, 279: 37-51. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2010.10.011>
- Woodward-Clyde-Sherard & Associates Consulting Engineers and Geologists, 1967. Estudio propuesto para la prevención de daños. Terremoto del 29 de julio de 1967, Caracas, Venezuela. Presentado el 18 de septiembre de 1967 al Comité Presidencial para el Estudio del Terremoto de Caracas, Oakland, 10 p.

MANUSCRITO RECIBIDO: 18-12-2023

REVISIÓN RECIBIDA: 11-3-2024

ACEPTACIÓN DEL MANUSCRITO REVISADO: 3-4-2024



CHECKLIST OF CUBAN METEOR-WRONGS

Listado de pseudometeoritos cubanos

Yasmani Ceballos Izquierdo¹, Johanset Orihuela², Carlos Rafael Borges-Sellén³

¹ calle 40 #2702 e/27 y 29, Madruga, Cuba. yasmaniceballos@gmail.com

² Earth and Environment (Geosciences), Florida International University, Miami, Florida, 33199, USA.

Jorih003@fiu.edu

³ Sociedad Cubana de Geología, Cienfuegos, Cuba. carlosrafaelborgessellen@gmail.com

Abstract: This research addresses the prevalent issue of misidentifying terrestrial rocks and man-made materials as meteorites in Cuba, a region with rich geological diversity that complicates such distinctions. The objective is to systematically differentiate true meteorites from pseudometeorites, or “meteor-wrongs”, through an analysis of collected specimens across the island. Employing a multifaceted methodology, including macroscopic examination, basic magnetism testing, density measurement, and advanced analytical techniques like X-ray fluorescence (XRF) and Scanning Electron Microscopy/Energy Dispersive Spectroscopy (SEM/EDS), this study elucidates the distinguishing features of meteoritic versus non-meteoritic materials. Our findings reveal a predominance of igneous rocks, particularly basalt, and ferrosilicon alloys misidentified as meteorites. This work emphasizes the importance of curatorial documentation and accessibility of problematic specimens for scientific investigation, advocating for a culture of precision and curiosity in geoscientific research.

Keywords: Cuba, pseudometeorites

Resumen: Esta investigación aborda el problema de la identificación errónea de rocas terrestres y producidas por humanos como meteoritos en Cuba, una región con una rica diversidad geológica que complica tales distinciones. El objetivo es diferenciar sistemáticamente los verdaderos meteoritos de los pseudometeoritos, o “meteor-wrongs”, a través de un análisis de ejemplares provenientes de la isla. Empleando una metodología que incluye examen macroscópico, pruebas básicas de magnetismo, medición de densidad y técnicas analíticas avanzadas como la fluorescencia de rayos X (XRF) y la microscopía electrónica de barrido/espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (SEM/EDS), este estudio aclara las características distintivas de los materiales meteoríticos respecto de los no meteoríticos. Nuestros hallazgos revelan una predominancia de rocas ígneas, particularmente basalto, y aleaciones de ferrosilicio identificadas erróneamente como meteoritos. Este trabajo enfatiza la importancia de una documentación curatorial y la accesibilidad de ejemplares en discusión para la investigación científica, abogando por una cultura de precisión y curiosidad en la investigación geocientífica.

Palabras clave: Cuba, pseudometeoritos

Ceballos Izquierdo, Y., Orihuela, J., Borges-Sellén, C.R., 2024. Checklist of cuban meteor-wrongs. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 37 (1): 32-44.

Introduction

The study of meteorites offers a unique window into the cosmic processes that have shaped our solar system. However, amidst genuine meteoritic discoveries, a significant number of terrestrial rocks and man-made objects are often misidentified as meteorites. These are commonly referred to as pseudometeorites or “meteor-wrongs” (Ceballos-Izquierdo *et al.*, 2024; Notkin, 2011; Senesi *et al.*, 2018).

In Cuba, the task of distinguishing meteorites from meteor-wrongs has been a daunting one. Over the years, several terrestrial rocks or man-made objects have been repeatedly identified as meteorites, some of them lacking comprehensive analysis or were based on anecdotal evidence/historical records. This has led to a mix of confirmed meteorites and a larger number of questionable or unverified specimens (Ceballos-Izquierdo, 2019, 2022; Ceballos-Izquierdo *et al.*, 2021). This aspect reflects a broader pattern seen worldwide, where enthusiasm and public engagement often intersect with scientific research.

The purpose of this paper is to provide a checklist to the most significantly encountered pseudometeorites in Cuba. By examining the properties of these specimens, this paper seeks to elucidate some key differences between meteorites and their terrestrial counterparts, thereby aiding both amateur enthusiasts and professional geologists in accurate identification. The focus on Cuba is particularly pertinent due to its diverse geological landscape, which, due to the variety of rocks, can contribute to the misidentification of native rocks as extraterrestrial. The island comprises a series of tectonic terrains that include igneous, metamorphic, and sedimentary rocks dating from the Jurassic to the Quaternary. In western Cuba, limestone formations and carbonate rocks predominate, while in the central and eastern parts of the island, metamorphic and ultramafic complexes are found, along with basalts and other volcanic rocks. A synthesis of Cuban geology can be found in Iturralde-Vinent *et al.* (2016).

Materials and methods

A comprehensive collection of rock samples commonly mistaken for meteorites was gathered from literature and collections (Table 1), representing various regions across Cuba (Fig 1.). These samples were primarily sourced from locations with a history of reported meteorite finds or areas with geological features conducive to such misidentifications. Each sample, when available, underwent a detailed macroscopic examination for features typically associated with meteorites. This included assessments of physical characteristics such as size, weight, color, texture, and the presence of key features like fusion crusts or regmaglypts (Norton and Chitwood, 2008). Initial assessments of the specimens involved basic magnetism tests to check for the presence of magnetic minerals by attraction to a magnet, aiming to distinguish meteoritic material from terrestrial rocks at a preliminary stage (since most meteorites contain appreciable elemental iron) (Norton and Chitwood, 2008). The density values for the Mango Jobo and Cuba specimens were derived from existing literature, while the density for MNHNCu specimen was determined using the water displacement method. These measurements were systematically compared with established density ranges for both meteorites and common terrestrial rocks to assess their probable origins (Henderson and Perry, 1954; Britt and Consolmagno, 2003; Norton and Chitwood, 2008; Scott, 2020).

In more challenging cases, where the nature of the samples could not be determined through macroscopic examination alone, X-ray fluorescence (XRF) analysis and SEM/EDS (Scanning Electron Microscopy/Energy Dispersive Spectroscopy) was employed. For instance, the MNCN No. 17294 specimen was subjected to a comprehensive chemical and morphological examination using an FEI InspectTM SEM equipped with Secondary Electron (SE), Backscattered Electron (BSE), Cathodoluminescen-

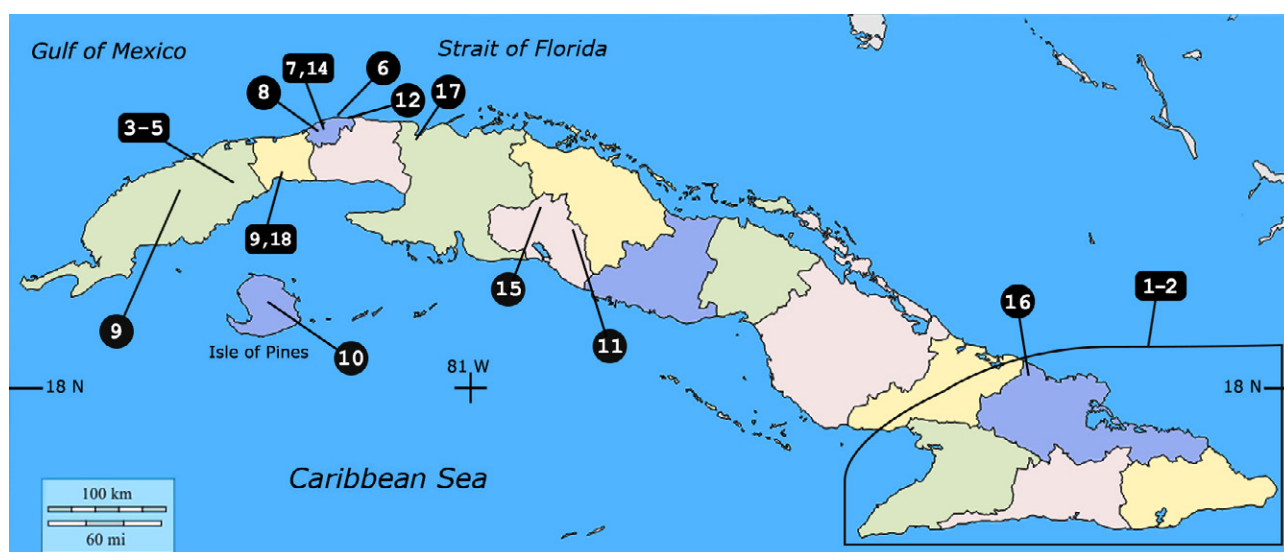


Fig. 1.- Generalized map with the location of the Cuban meteor-wrongs mentioned in this paper (the numbers correspond to those in Table 1). The locality of the “Cuba” meteor-wrong (1-2) is reported as the “Eastern Department” that includes the current provinces of Holguín, Guantánamo, Granma, and Santiago de Cuba. Scale = 100 km.

	Meteor-wrong	Date	Repository	Mass (g)	Reference
1	Cuba	1871	MNCN	~1327 g	Ceballos-Izquierdo <i>et al.</i> (2024)
2	Cuba (6 fragments)	?	FMNH	?	Ceballos-Izquierdo <i>et al.</i> (2024)
3	Mango Jobo	1938	IGA	1099	Pérez-Doval (1996)
4	Mango Jobo II	1938	IGA?	344	Pérez-Doval (1996)
5	Mango Jobo III	1938	IGA?	162	Pérez-Doval (1996)
6	Bacuranao	1974	?	?	Segura-Soto (1983)
7	Boyerros	1996	IGA?	117.5, 14.9	Jaimez-Salgado <i>et al.</i> (2001)
8	Balcón de La Lisa	2001	?	4.44	Jaimez-Salgado <i>et al.</i> (2007)
9	Guira de Melena	2001	**	194.9	Jaimez-Salgado <i>et al.</i> (2007)
10	Isla de la Juventud	?	?	?	CIPIMM (2003)
11	Cruces	?	?	?	CIPIMM (2003)
12	Guanabo	?	?	?	CIPIMM (2003)
13	Número 6	?	?	?	CIPIMM (2003)
14	Boyerros (CENHICA)	2006	IGA?	~200 g	Ceballos-Izquierdo (2016)
15	Rodas (Fca. Castellanos)	2011	**	?	This paper
16	Gibara	2013	?	114 g	This paper
17	Cueva del Gato Gíbaro	?	MNHNCu	40.6 g	Ceballos-Izquierdo <i>et al.</i> (2024)
18	Guira de Melena II	2023	**	?	This paper

Table 1.- List of Cuban specimens investigated in this paper. A (**) refers to material in private collections, (?) data is unknown. Acronyms of collections and institutions of specimens or material mentioned: Museum of Natural Sciences in Madrid, Spain (MNCN), Field Museum of Natural History, Chicago, United States (FMNH), Institute of Geophysics and Astronomy of Cuba (IGA), National Museum of Natural History of Cuba (MNHNCu), Centro de Investigaciones para la Industria Minero-Metalúrgica (CIPIMM).

ce (CL), and an Oxford Instruments INCA EDS system for elemental analysis. Given its historical significance, only non-destructive surface examinations were initially conducted under specific parameters (30 kV, 13.7 mm wor-

king distance, in a low vacuum environment). Oxalic acid was cautiously applied for surface cleaning, preserving the specimen's integrity. Subsequent investigations involved a detailed examination of a small fragment to unveil the

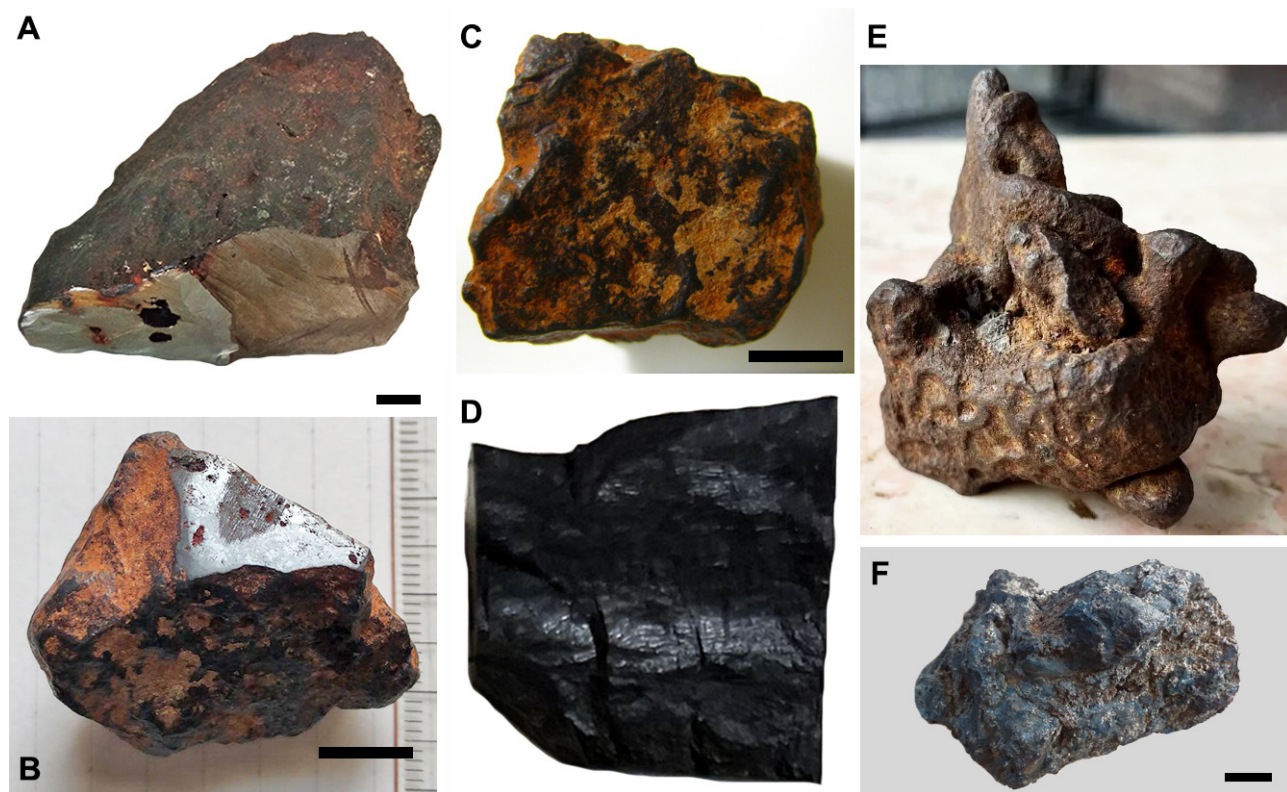


Fig. 2.- Some of the Cuban meteor-wrongs mentioned in this paper. A) Cuba (MNCN No.17294), B-C) Cueva del Gato Gíbaro, D) Bacuranao (modified from Rochette *et al.*, 2023), E) Mango Jobo II (modified from Rochette *et al.*, 2023), F) Guira de Melena II. Scale = 1 cm.

internal matrix structure. Moreover, the Metallurgy Department at the Technical School of Industrial Engineers in Madrid contributed to this analysis, employing nitric acid treatments and advanced microscopy techniques to further characterize the specimen. The MNHNCu specimen underwent SEM/EDS analysis at Florida International University, Miami. This was facilitated using a JEOL JSM 5900LV microscope, which provided high-resolution imaging capabilities (up to 3 nm) at selected focal points. XRF analysis of the specimens mentioned in Jaimez-Salgado *et al.* (2001, 2007) were evaluated from Test Certificate #2 (CIPIMM, 2003).

Results and discussion

Meteorites are characterized by distinctive features such as density ranges from 3.0 to 8.0 g/cm³, depending on type, and nickel content between 5-30%, rarely found in terrestrial rocks (Britt and Consolmagno, 2003; Norton and Chitwood, 2008). They typically lack quartz and have mi-

nerals like kamacite, schreibersite, olivine, pyroxene, and plagioclase feldspar, with chondrules being a hallmark in the case of chondritic meteorites. SEM and XRF analyses often reveal iron-nickel alloys and sulfides, distinct from terrestrial compositions. The frequent misidentification of terrestrial rocks as meteorites in Cuba underscores the need to employ these diagnostic features and conduct comprehensive testing for accurate identification. This approach fosters a culture of scientific curiosity and rigor.

The present study identified a wide range of pseudo-meteorites across Cuba (Table 1). Many of the investigated samples comprised igneous rocks, predominantly basalt and similar types. Other specimens (e.g. 7-9 in Table 1), likely ferrosilicons, were also misidentified, despite their typically non-meteoritic composition. Basic magnetic testing revealed that a significant portion of the samples exhibited magnetic attraction, but it is not a distinctive feature of meteorites (Norton and Chitwood, 2008). Density measurements further aided in distinguishing pseudometeorites, with samples (e.g. 3-5 and 17 in Table 1) falling outside

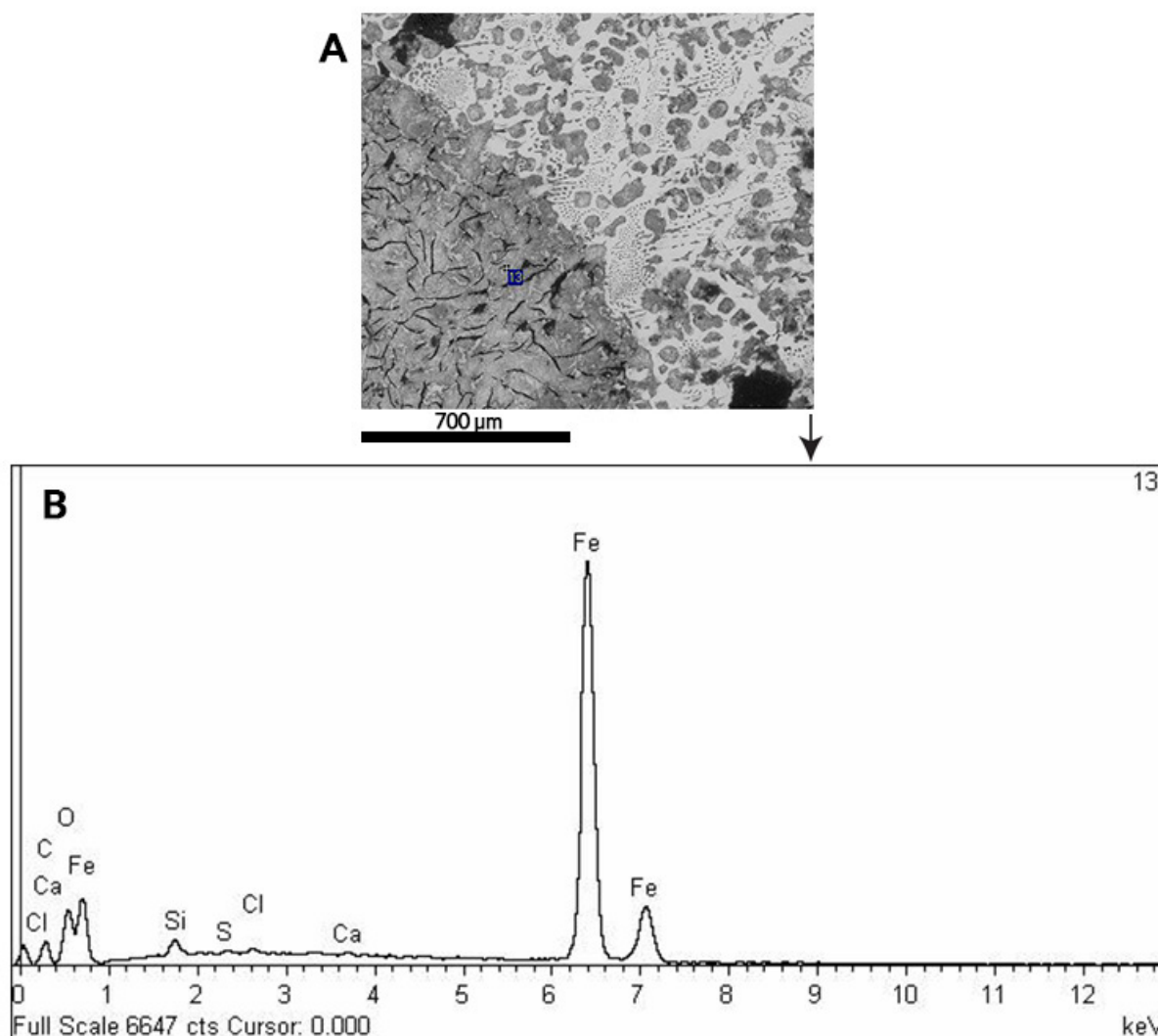


Fig. 3.- A) Backscattered electron image of one of the investigated areas of MNCN No.17294. B) EDS spectrum corresponding to the sample's area showing no detectable amounts of Ni.

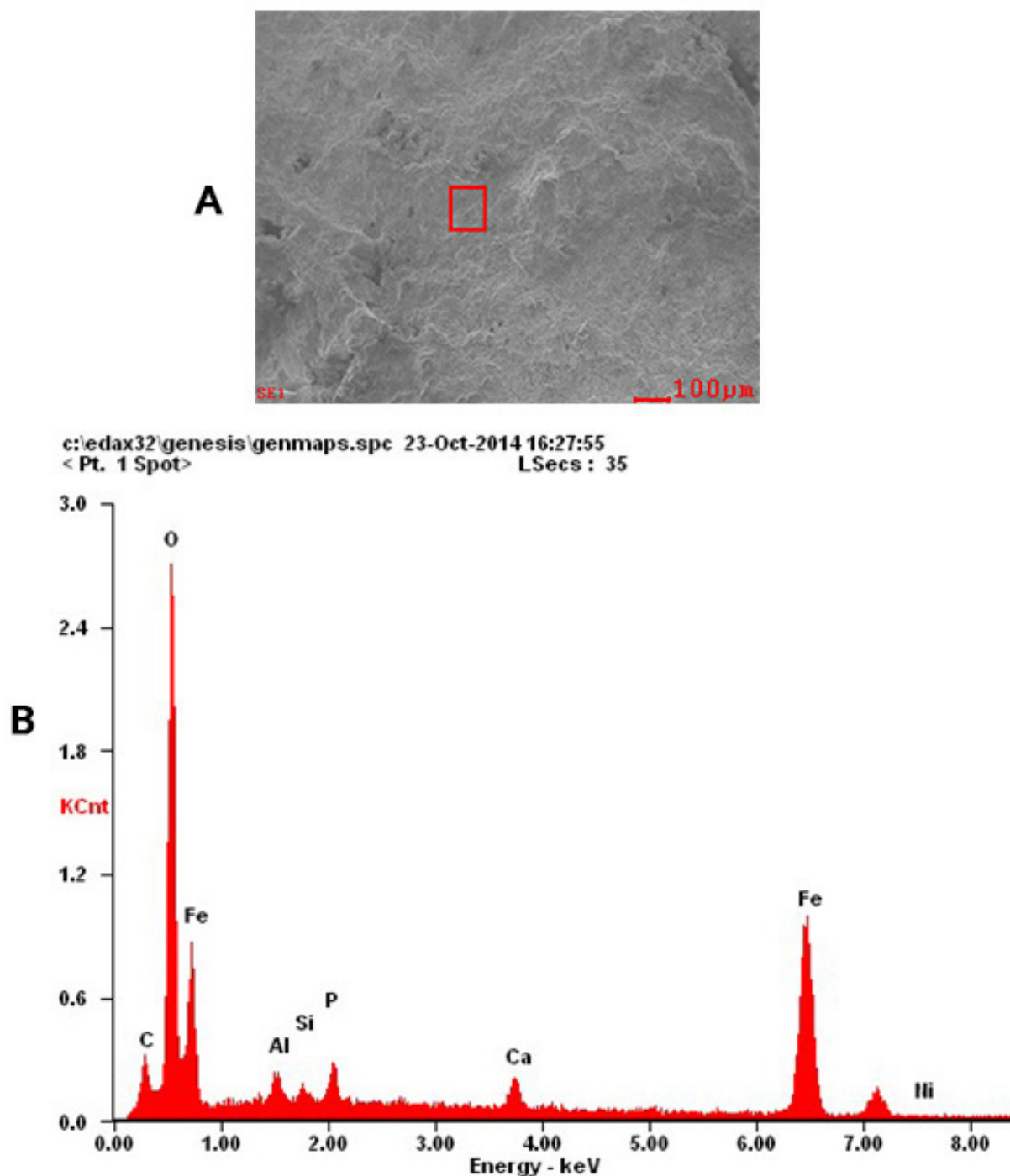


Fig. 4.- A) Backscattered electron image and B) EDS analysis spectra of the corresponding area in the MNHNCu specimen from Cueva del Gato Jíbaro, Matanzas, western Cuba. The EDS spectra show peaks for iron (Fe) with lower nickel (Ni) and aluminum (Al) contents. Note the incidence of phosphate-calcium peaks, both common aggregates of sedimentary rocks.

the typical density range of known meteorites (Henderson and Perry, 1954; Britt and Consolmagno, 2003; Norton and Chitwood, 2008). In some problematic cases, XRF and/or SEM analysis further confirmed the terrestrial origin, showing a composition inconsistent with meteoritic material (e.g., absence of Nickel, lack of meteoritic minerals, presence of quartz) (Ceballos-Izquierdo *et al.* 2024; Solano y Eulate, 1872). Microscopic examination provided additional insights, revealing mineralogical structures and tex-

tures not found in meteorites (e.g., quartz, high concentrations of metallic silicon). These results were instrumental in confirming the terrestrial origin of the samples, which are discussed in the following paragraphs.

The first specimen of concern is the object known as the “Cuba” meteorite, cataloged under MNCN No. 17294 in the Museum of Natural Sciences in Madrid, Spain (Fig. 2A). It has been historically recognized as an official meteorite in the Meteoritical Society’s online database. Howe-

ver, inconsistencies, particularly in historical records, density, anomalous composition, and the notable absence of Widmanstätten patterns, collectively provide evidence that casts doubt on this specimen. These factors led Ceballos-Izquierdo *et al.* (2024) to reevaluate it as a non-meteorite. Advanced analytical methods, such as SEM-EDS, were instrumental in proving the absence of detectable amounts of nickel (Ni) which confirmed the specimen's terrestrial origin (Fig. 3). Another problematic iron-like metallic object (MNHNCu specimen) of 40.6 g was also subjected to SEM-EDS analysis. This suspected meteorite was found within an archaeological site from Cueva del Gato Gíbaro, Matanzas province, western Cuba (Fig. 2B-C). The specimen was directly associated with an indigenous female burial (Mesolithic-hunter-gathered cultural affiliation) at this location (Arencibia and Delgado, 1984; Villegas, 1984), now dated to 1255-984 14C cal BP (Orihuela *et al.*, 2020). Initially, based only on visual inspection, the fragment was believed to be an iron meteorite, but its composition was unknown. However, the test results revealed a remarkably low nickel content of about 0.031 wt% (Fig. 4). Additionally, a cut made on the object surface failed to unveil the Widmanstätten pattern and instead displayed visible cavities within the polished section (Fig. 2B). Based on its EDS spectra, thin-section, low density (4.06 g/cm^3) and other

analyses, the Cueva del Gato Gíbaro specimen is now considered a meteor-wrong.

The three pieces of Mango Jobo (Fig. 5) originally belonged to the collection of the renowned Cuban naturalist Dr. René Herrera Fritot, who was not only an archaeologist but also a mineralogist. Therefore, it is strange that he did not analyze them. The fragments (1099, 344, and 162 grams, respectively) were in the Department of Archaeology of the former Academy of Sciences of Cuba and later became part of the collection of the Institute of Geophysics and Astronomy since June 1987. Notably, two fragments were displayed at the Havana Planetarium until their removal during the preparation of the publication by Ceballos-Izquierdo *et al.* (2021) that declared it a non-meteorite. It is unclear how one of these fragments was facilitated to the National Museum of Natural History of Havana for exhibition and study (Rochette *et al.*, 2023). Currently, the repository of the three fragments is unclear, and whether they are available for new research.

The initial report on the Mango Jobo specimen by Pérez-Doval (1996, p. 101) suggested that it might have fallen in 1938 near Mango Jobo, in the province of Pinar del Río, and mentioned that one of the fragments was sliced to examine for Widmanstätten patterns. However, as first noted by Ceballos-Izquierdo (2022), this account lacks clarity regar-

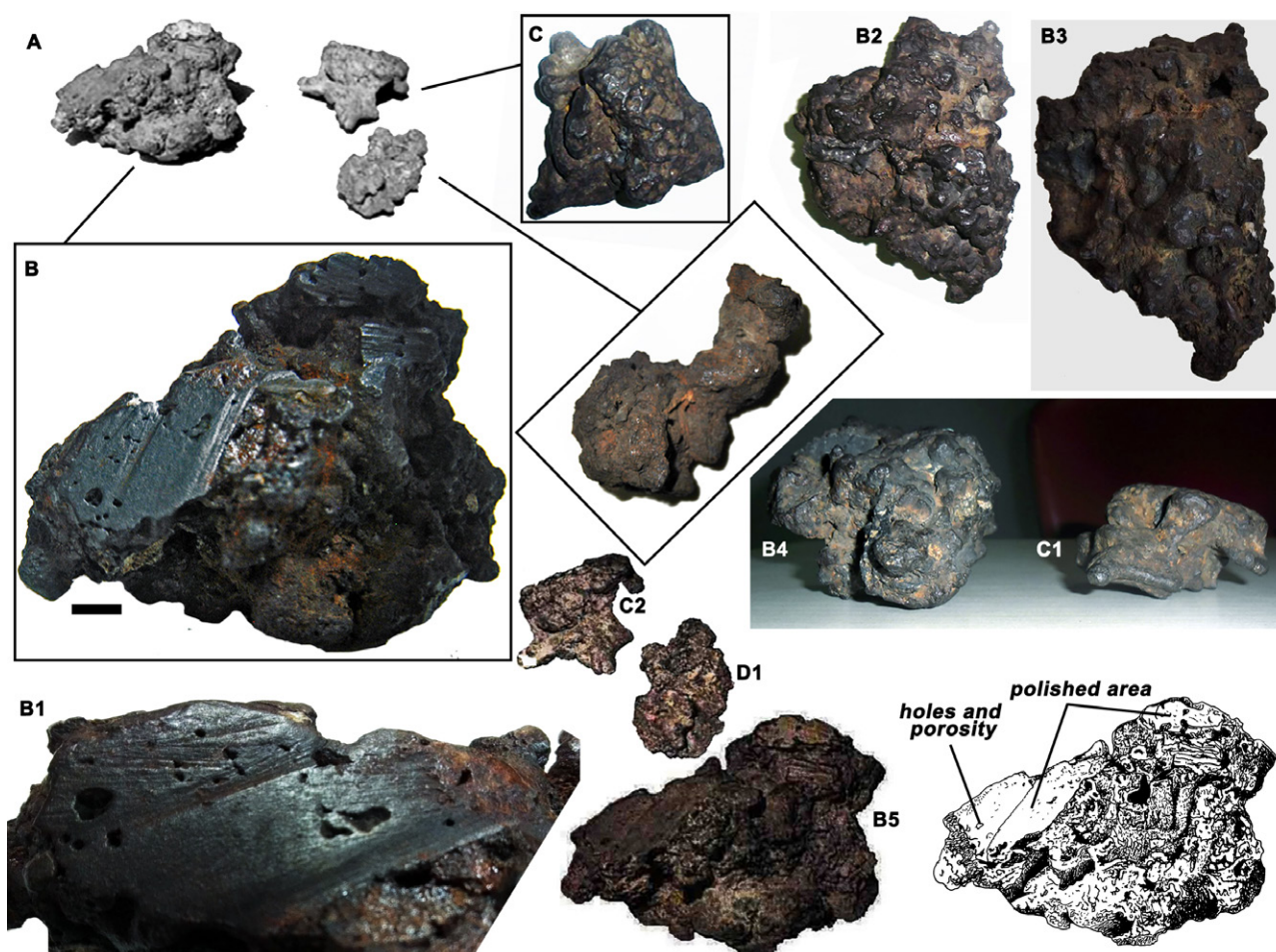


Fig. 5.- A) The three fragments of Mango Jobo, B) Major fragment, C) Medium fragment, D) Minor fragment. B2-B3-B4) Different views of the main fragment, B1) “polished” surface in an enlarged view, B5) comparison with line drawing. C-C1-C2) Different views of the median fragment. D-D1) Different views of the smaller fragment. Scale = 1 cm.

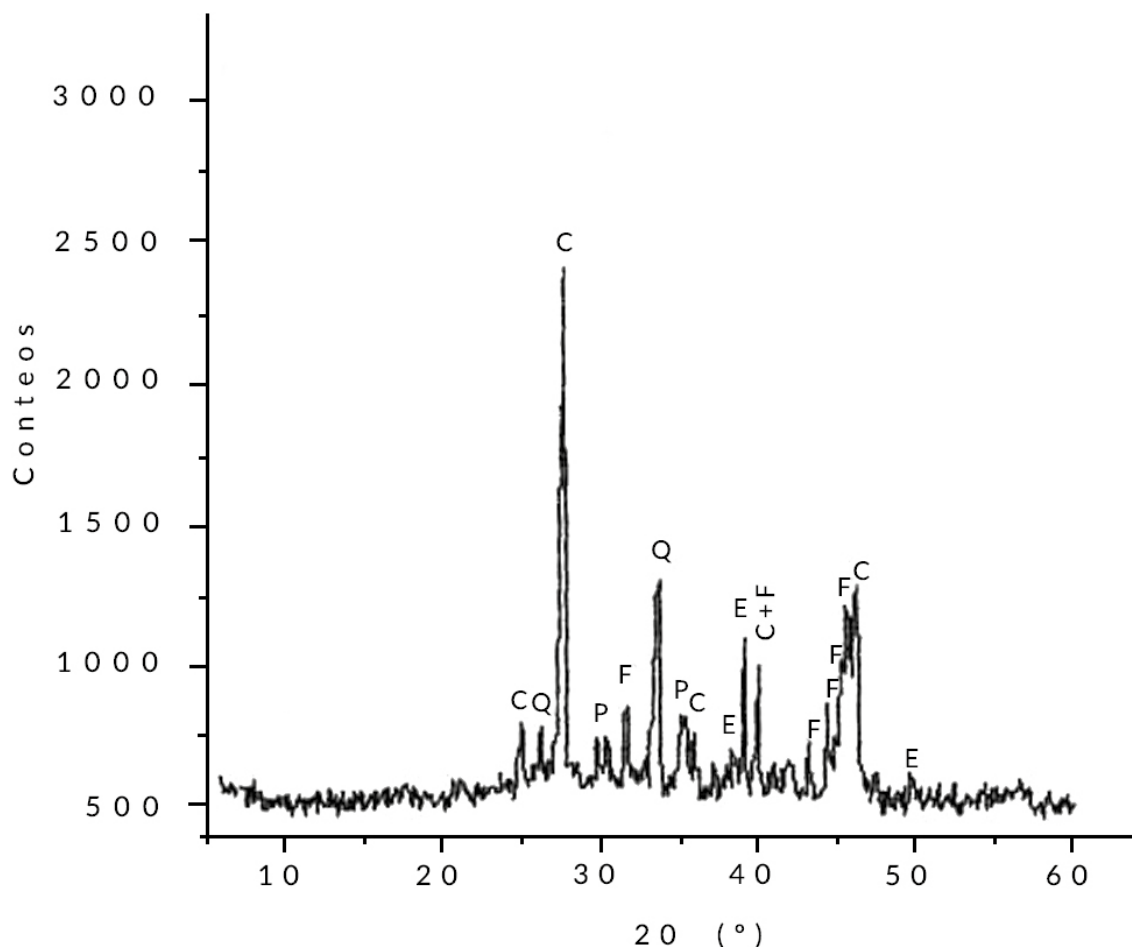


Fig. 6.- X-ray diffraction pattern of Mango Jobo III specimen (minor fragment) displaying prominent peaks corresponding to various minerals. The highest peak, denoted as ‘C’, is indicative of a significant cristobalite presence, while the other labeled peaks represent different minerals, such as quartz (‘Q’) and feldspar (‘F’). Peaks labeled ‘E’, ‘P’, and ‘L’ correspond to other minerals that are present in smaller quantities.

ding the actual observation of these patterns, highlighting a need for further investigation and verification of these critical diagnostic features in the specimen. The surface that appears to have been polished is on the larger fragment and on it, porosity and internal voids can be seen (Fig. 5B). Meteorites are solid rocks that have regmaglypts on their surface, but not empty spaces inside, which is an important clue that the Mango Jobo rock is not of spatial origin. Moreover, a recent test with nitric acid did not reveal Widmanstätten patterns and its density (5.4 g/cm^3) is very low for an iron meteorite. The holes in the polished surface, lack of fusion crust or regmaglypts, and the general appearance of this specimen are consistent with a “mocarrero” formed by the agglutination or cementation of sandy particles and ferruginous material, leaving cavernous spaces inside.

The medium-sized fragment (Fig. 5C) lacks both a fusion crust and regmaglypts, but there are abundant cavities on one of the planes of its surface. Towards its ends, subrounded protrusions stand out that are uncommon for a meteorite and resemble a viscous flow that cooled (Ceballos-Izquierdo, 2022). Rochette *et al.* (2023) classified this specimen –an iron-rich fragment with traces of chromium (Cr) and nickel (Ni), consisting of metallic globules and si-

licate slag bubbles, and previously displayed at the National Museum of Natural History of Havana– as a man-made object. According to Iturralde-Vinent (2023), this sample was not found in the museum after the study by Rochette *et al.* (2023).

The smaller fragment ($\sim 6.5 \times 3 \times 2 \text{ cm}$) is very irregularly shaped, arched, appears deeply oxidized, and lacks a fusion crust and regmaglypts (Ceballos-Izquierdo, 2022) (Fig. 5D). The outer surface is reddish-brown. The diffractogram of the specimen revealed prominent peaks of cristobalite and quartz, and it notably lacked meteoritic minerals, regmaglypts, and a fusion crust (Fig. 6). Additionally, its irregular appearance and internal cavities are inconsistent with characteristics typically associated with extraterrestrial objects (Norton and Chitwood, 2008). This evidence collectively suggests a terrestrial origin for the specimen. On the other hand, Jaimez-Salgado (2023) expressed reservations about its cosmic origin (p. 25) and speculated that it might be a stony meteorite from the H-type chondrite class, citing its high magnetism (p. 22). However, given that magnetism is not an exclusive feature of meteorites, such a classification should be approached with caution. Jaimez Salgado’s (2023) article acknowledges the exis-

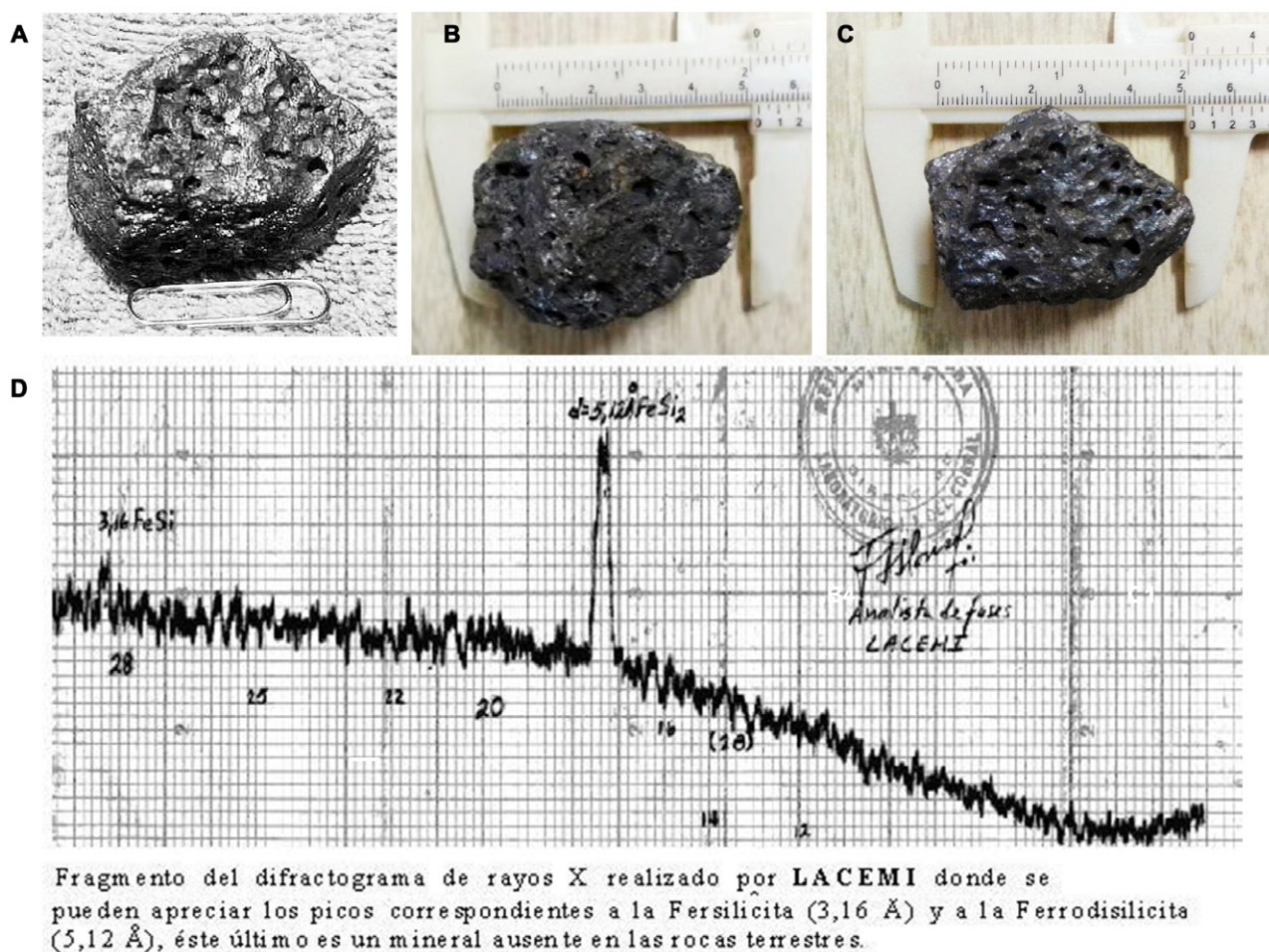


Fig. 7.- A) Old photo available of the Boyeros specimen. B-C) Recent photos of the Boyeros specimen. D) Diffractogram with the peaks of the terrestrial minerals FeSi_2 and FeSi . Although in the diffractogram it was written that Ferrosilicite is absent in terrestrial rocks, this mineral was discovered in 1960 in Donetsk Oblast, in the Soviet Union, and later found in Tibet.

tence of three fragments but only provides details on two. Further, the article lacks information regarding the status or custodianship of these objects, a detail that is crucial for the continuity and transparency of scientific research.

Visually, this pseudometeorite closely resembles an aggregate of iron pellets (mocarrero) or iron slag. The most plausible explanation for the Mango Jobo fragments is that they are mocarreros. This interpretation is in accordance with Iturralde-Vinent (2023), who stated that he examined in the sixties the sample designated as Mango Jobo in the collection of René Herrera Fritot at the Department of Archaeology of the former Academy of Sciences in the National Capitol. Since then, he had determined that, due to its yellowish-earthy coloration and nodular texture, it was a ferruginous concretion, typical of many Cuban soils and lateritic weathering crusts. Finally, if the three fragments mentioned truly originate from Mango Jobo, their presence there should not be considered exotic or out of place. The 1965 genetic soil map (ACC, 1965) indicates that the area around Mango Jobo and south of Pinar del Río province contains soils with mocarreros, supporting this interpretation. This area is characterized by Quaternary geological formations with weathering crusts, including ferritic crusts, nodules, and ferruginous concretions.

The Bacuranao specimen, which was previously unaccounted for in the collections of the MNHNCu, resurfaced and underwent a brief examination by Rochette *et al.* (2023). They identified it as slag, a finding supported by an unscaled photograph (Fig. 2D). For the sake of scientific transparency and ethical research practices, the provenance and chain of custody of the specimen, as it came into the possession of Rochette *et al.* for their in-situ study, warrant further clarification. Additionally, their dismissal of the specimen as a non-essential part of museum heritage is regrettable, casting doubt on its availability for future research. Adding to the confusion, Jaimez-Salgado (2023) first considered it as either an iron meteorite or a stony-iron (p. 22), later specifying it as a stony-iron (mesosiderite) (p. 24). This latter classification was based on the interpretation of the presence of both chondrules and Widmanstätten patterns in the same specimen (Jaimez-Salgado *et al.*, 2023, p. 31), which is highly unusual and warrants skepticism. Conveniently, the latter author omitted any discussion of the finding of Rochette *et al.* (2023) in his account.

The Bacuranao specimen was reported by Segura-Soto (1983) as found in a sandy seabed, on the beach of Bacuranao, Havana, in 1974. Under such conditions, an iron meteorite would be subject to corrosion, sedimentation, and pos-

sible interactions with bacteria that could affect its integrity and composition over time (i.e., Buchwald, 1977; Buchwald and Clarke, 1989; González-Toril *et al.*, 2005; Gronstal *et al.*, 2009). Despite these potential alterations, Segura-Soto (1983) did not report any alteration processes or corrosion products. The specimen was described as black in color with a submetallic luster. Regarding the Widmanstätten figures, Segura-Soto (1983) stated: “the internal mass of the sample is entirely composed of metallic minerals that in the polished section are revealed as kamacite, which, when arranged in lamellar bands, recalls the Widmanstätten figures”. Yet, the published photographs by Segura-Soto (1983) do not conclusively show such figures. Furthermore, Segura-Soto (1983) reported the presence of a few lithic chondrules containing well-defined quartz and ferromagnesian minerals (breunnerite), which are atypical in iron meteorites (Ceballos-Izquierdo *et al.*, 2021; Scott, 2020). No information on the specimen’s mass, density, or current repository was provided, leaving its existence uncertain.

Regarding the other three rocks that have traditionally been considered meteorites, namely Boyeros, Güira de Melena (Gámez), and Balcón de La Lisa, they have the appearance of a metallic silicon alloy (ferrosilicon) with a surface

with small holes or depressions and no regmaglypts, nor any trace of a fusion crust. The diffractograms of these specimens show pronounced peaks of the minerals Ferdisilicite (FeSi_2) and Fersilicite (FeSi), suggesting their origin from industrial materials (Fig. 7D, 8-9). High concentrations of metallic silicon are typically not observed in meteorites. While both FeSi_2 and FeSi have been identified within meteoritic compositions, they are considered to be accessory phases, existing predominantly in the form of small grains (Rubin and Ma, 2017). Metallic silicon alloys are produced industrially on a large scale due to their numerous applications and their luster, color, and resistance to weathering often lead to them being mistaken for meteorites. It also is interesting to note that at the time when the diffractograms were performed, the names Ferdisilicite and Fersilicite were not internationally approved. These minerals were recognized later in 2012 as Linzhiite and Naquite (Li *et al.*, 2012; Nicheng *et al.*, 2012). Even, the first publications that reported Linzhiite and Naquite as accessory minerals in meteorites were from 2015 (Ma *et al.*, 2016; Nazarov *et al.*, 2015; Rappenglück, 2022). Another element to consider is that these three objects were originally reported as stony irons, and this classification in turn is divided into two subgroups. The first subgroup is

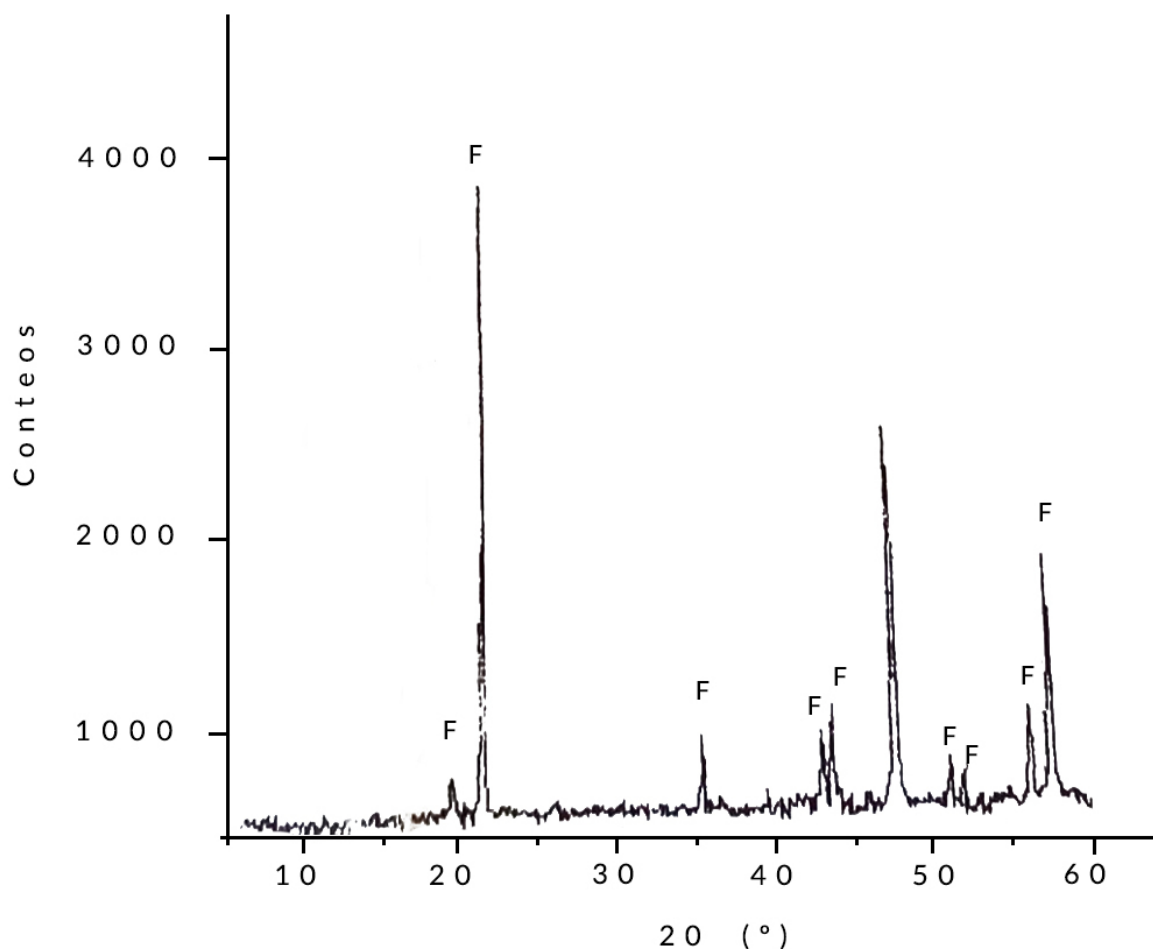


Fig. 8.- X-ray diffraction pattern highlighting the mineralogical composition of the Guira de Melena specimen. Labels ‘F’ correspond to the terrestrial minerals FeSi_2 and FeSi . Multiple smaller peaks are also present, which may correspond to various other minerals within the sample matrix.

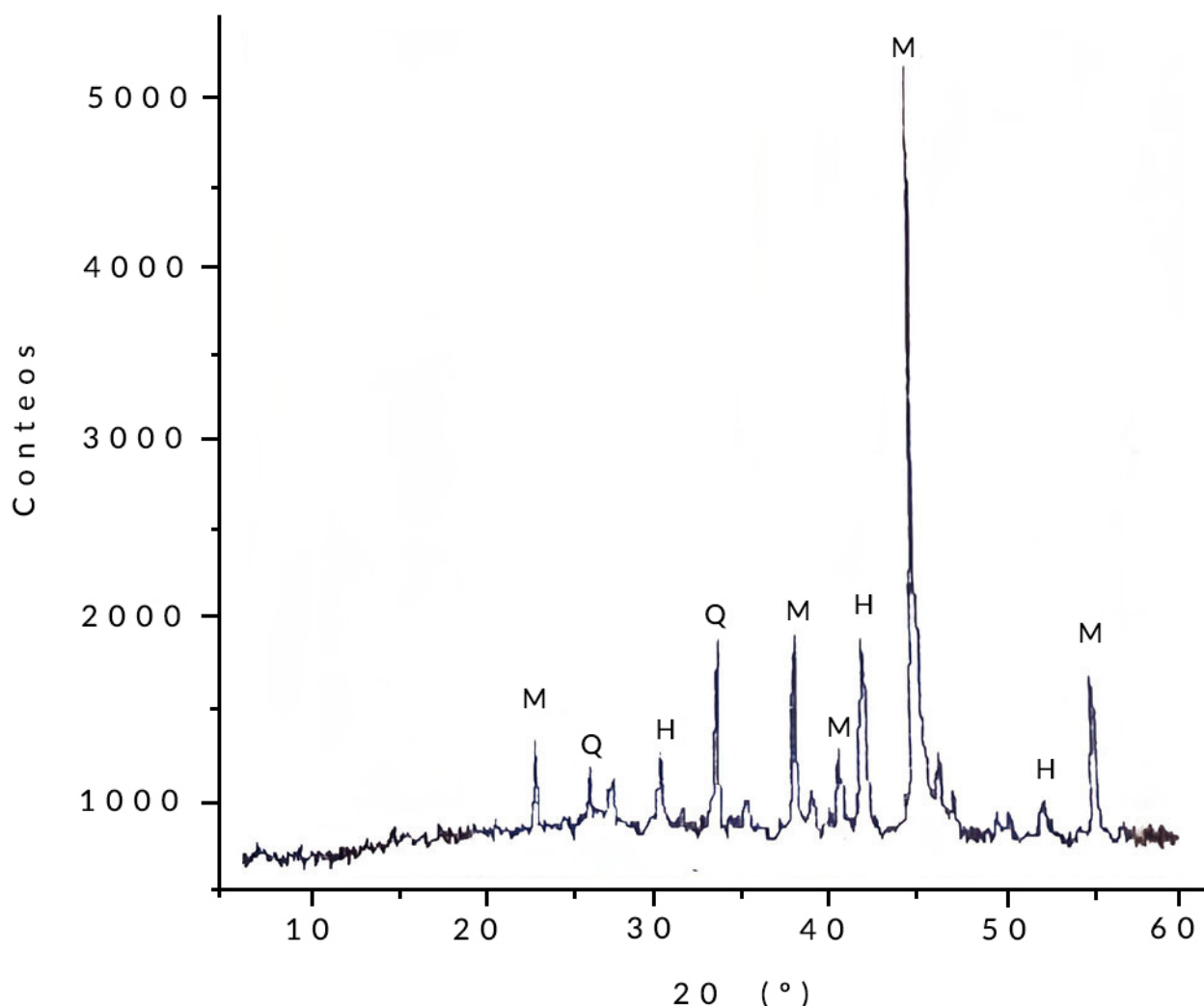


Fig. 9.- X-ray diffraction pattern highlighting the mineralogical composition of the Número 6 specimen. Labels correspond to Q: Quartz (SiO_2), H: Hematite (Fe_2O_3), M: Magnetite (FeO). Multiple smaller peaks are also present, which may correspond to various other minerals within the sample matrix.

called pallasites, considered the most beautiful meteorites because they have olivine crystals, thus in a pallasite a diffractogram should show minerals typical of a meteorite and high peaks of olivine, but the specimens we are analyzing do not belong to this classification. The second subgroup is called mesosiderites, because they present a metallic phase and a rocky/brecciated phase. These differ from Boyeros, Güira de Melena (Gámez), and Balcón de La Lisa, which have a very shiny metallic appearance. To validate them with a diffractogram, it should present high peaks of pyroxene and Ca-rich plagioclase, combined with peaks of kamacite and taenite. Visually, both Güira de Melena (Gámez) and Balcón de La Lisa specimens have tabular cuts that are improper for meteorites (Fig. 10). Specifically, one of the cuts in Balcón de La Lisa reveals the inner matrix, which markedly differs from a pallasite or a mesosiderite.

In the specific case of the Boyeros specimen, it was initially identified as an iron meteorite, with a reported global chemical composition as follows: Fe (53.7%), Ni (7.03%), Co (0.19%), and Si (39.08%) (Jaimez-Salgado *et al.*, 2001). Surprisingly, it was later reclassified as a stony-

iron meteorite (Jaimez-Salgado *et al.*, 2007). On the other hand, Jaimez-Salgado (2023) presented two different compositions and a lower mass than initially reported, raising questions about the specimen's handling, storage, and the accuracy of the analyses. In all instances, the composition does not align with that of an iron meteorite due to the low iron content (Krot *et al.*, 2014; Scott, 2020). However, it also does not correspond to a stony-iron meteorite, as these typically contain approximately even amounts of silicates and nickel-iron alloy (Norton and Chitwood, 2008).

According to an unpublished report from the Test Certificate #2 (CIPIMM, 2003), other pseudometeorites namely Isla de la Juventud, Cruces, Guanabo, and Número 6, were analyzed under the assumption that they might be meteorites. However, their diffraction patterns revealed that these samples are, in fact, meteor-wrongs, as the mineralogical composition is inconsistent with that of extraterrestrial meteoritic material. The diffractograms of these specimens revealed the presence of terrestrial minerals, predominantly quartz, which is a common mineral found in Earth's crust (Buchwald, 1977; Senesi *et al.*, 2018).

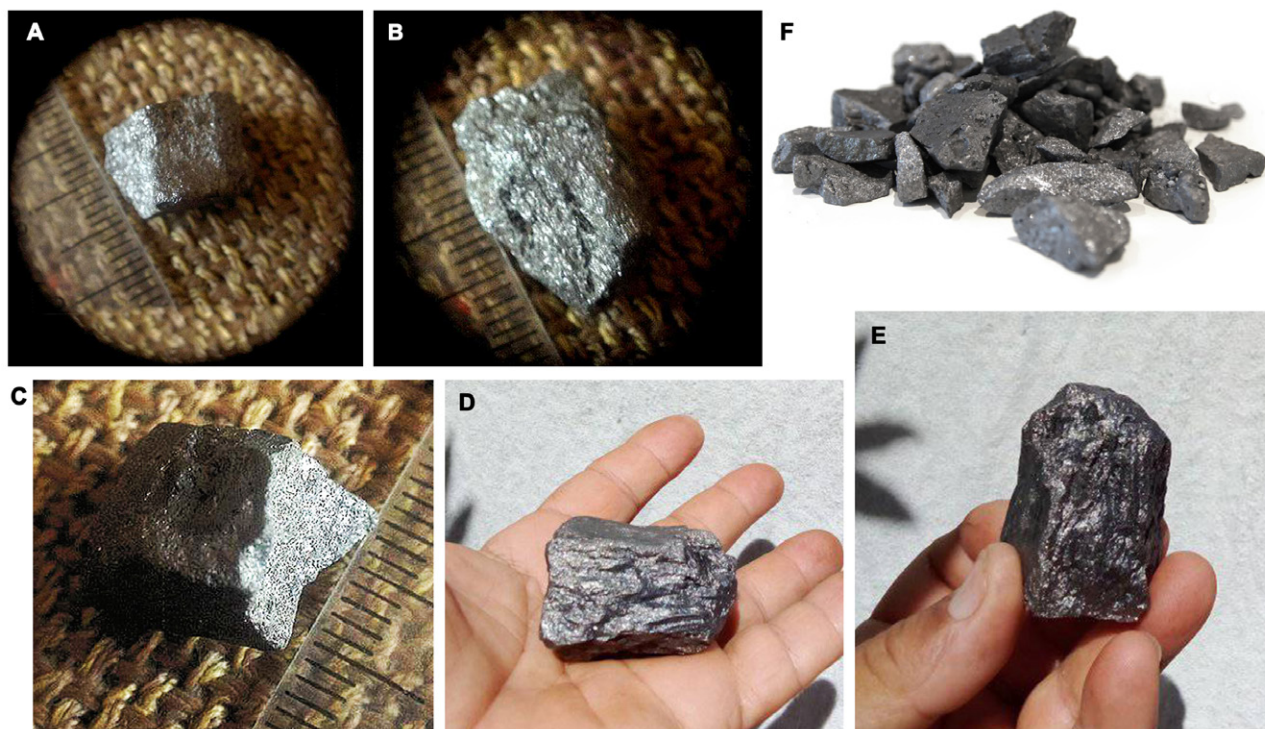


Fig. 10.- Cuban meteor-wrongs: A-C) Balcón de La Lisa specimen, D-E) Güira de Melena (Gámez) specimen, F) Ferrosilicon fragments for comparison.

Another unpublished specimen (14 in Table 1) was discovered in 2006 on the site formerly occupied by the National Center for Hydrology and Water Quality (CENHICA) in the Boyeros municipality, Havana, western Cuba. This specimen consisted of several small, highly magnetic metallic fragments with a total weight of approximately 200 g. One of the fragments, treated with concentrated nitric acid on a polished surface, was subsequently examined under an optical microscope. The result revealed a mosaic of highly oxidized ferruginous elements interspersed with very bright spots. These spots starkly contrasted with the ferruginous stains, yet there were no Widmanstätten patterns or Neumann lines observed (Jaimez-Salgado, pers. comm., 2016). According to Jaimez-Salgado (pers. comm., 2019), part of this material was sent to the CEAC laboratory in Cienfuegos (central Cuba) in 2019 for further investigation, but no results or even photographs of the material have been published to date.

One more rock (16 in Table 1) was reported to have impacted the roof of a house in the Las 79 Viviendas del Güirito neighborhood, located in the city of Gibara, Holguín province, at approximately 2:45 a.m. on March 31, 2013. This specimen, characterized by an oval shape and reddish-black color, featured a porous surface and the appearance of a water-worn pebble. It was transferred to the Center for Environmental and Technological Research and Services (CISAT) of the Ministry of Science, Technology, and Environment's delegation in Holguín, eastern Cuba. The object weighed 114 g and measured 5.5 cm in length, 3.6 cm in maximum width, and 3.3 cm in thickness, according to Juan José Guarch Rodríguez (Cuban Speleological Society) and Gibara researcher José (Joselín) Corella (Fig. 11A). How-

ever, the rock does not exhibit the typical characteristics of a meteorite; a fresh meteoritic fall would typically show a fusion crust and regmaglypts. Similarly, the specimens (15 and 18 in Table 1) known as Rodas (Fca. Castellanos) (Fig. 11B) and Guira de Melena II (Fig. 2F), which were examined by the authors, do not exhibit the typical characteristics of meteorites and present voids inside (Fig. 11).

A final comment is directed towards the better scientific documentation and curatorial process of several samples in

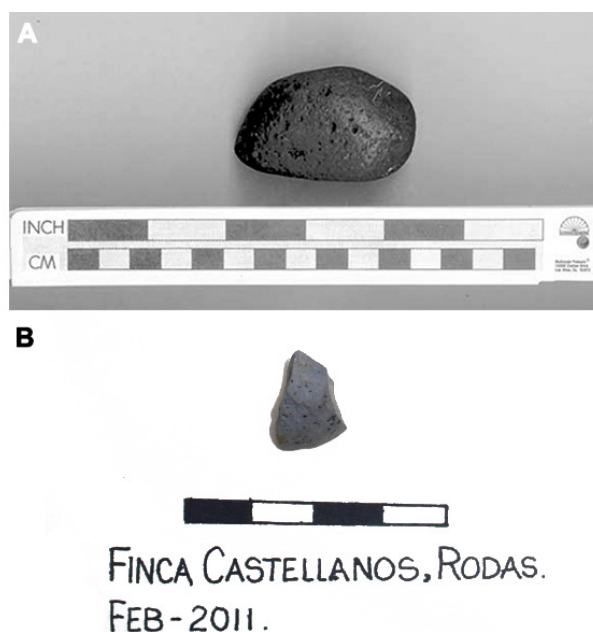


Fig. 11.- Cuban meteor-wrongs: A) Gibara specimen, B) Rodas specimen. Scale = 1 cm.

institutions or private collections in Cuba (e.g. 3-8 in Table 1), which often lack catalog numbers or unique identifiers. Even if they are not meteorites, their significance in scientific research cannot be understated, and these samples should be readily available for scientific examination. This accessibility not only assists in refining identification techniques but also contributes to a broader understanding of meteoritic versus terrestrial materials, thereby enhancing the overall knowledge in the field of meteoritics. Recently, Jaimez-Salgado (2023) and Jaimez-Salgado *et al.* (2023) briefly discussed some of these objects, however both articles fail to clarify their status or loan history.

Conclusions

This checklist not only clarifies the non-meteoritic nature of several misidentified specimens but also emphasizes the importance of meticulous and comprehensive testing in meteorite identification, particularly in the context of frequent misidentifications in Cuba. It contributes to a deeper understanding of meteoritic versus non-meteoritic materials, enhancing knowledge in the field of meteoritics and promoting a culture of scientific rigor and curiosity on the island. The list includes 18 specimens, some previously discussed by other researchers, and others never published before, included here to serve as references for future studies.

The case of the “Cuba” specimen, Bacuranao and the Mango Jobo fragments particularly exemplify the complexities involved in meteorite identification and handling of specimens. However, some specific traits were crucial in debunking the meteoritic nature of these specimens, revealing their terrestrial origins instead. The Mango Jobo fragments, initially part of Dr. René Herrera Fritot’s collection, displayed characteristics more closely aligned with terrestrial formations, particularly mocarreros, which is consistent with the geological context of the area (ACC, 1965).

Our findings also draw attention to the need for better scientific documentation and curatorial processes in Cuba. Many samples in institutions or private collections lack proper cataloging, which hinders scientific research. Despite their non-meteoritic nature, some of these samples hold significant scientific value and should be readily available for examination.

Acknowledgements and funding

We thank Aurelio Nieto Codina (MNCN), Philipp Heck (FMNH) and Jim Holstein (FMNH) who kindly provided photographs and information about the fragments deposited in their institutions. J.O. thanks Thomas H. Beasley of the Florida Center for Analytical Microscopy (FCAEM) at Florida International University (FIU) and Prof. Florentin J. M. Maurrasse of the Geosciences Department at FIU for

access to their labs and guidance with SEM-EDS analyses. Comments from the editor, Nieves López-González, and the reviewers, Pierre Rochette and Matthias van Ginneken, were very helpful in improving the final version of the manuscript. The present research has not received specific support from public sector agencies, commercial sector or non-profit entities.

Author contributions

Work development, Y.C. and J.O.; methodology, Y.C. and J.O., data collection, Y.C., J.O. and C.B.S.; figures, Y.C.; research/analysis, Y.C. and J.O.; manuscript review, Y.C. and J.O.

References

- Academia de Ciencias de Cuba (ACC), 1965. República de Cuba, Mapa Genético de Suelos. Escala 1: 250,000. (+ 19 mapas). Instituto de Suelos. Instituto cubano de Geodesia y Cartografía, 17-5, available online at: https://esdac.jrc.ec.europa.eu/images/Eudasm/latinamerica/images/maps/download/cuba1_5.jpg
- Arencibia, F., Delgado, A., 1984. Estudio antropológico de un individuo femenino en la cueva Gato Jibaro. Boletín Espeleológico del Grupo Norbert Casteret, número 5.
- Britt, D.T., Consolmagno, G.J.S.J., 2003. Stony meteorite porosities and densities: A review of the data through 2001. *Meteoritics & Planetary Science*, 38 (8): 1161-1180. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2003.tb00305.x>
- Buchwald, V.F., 1977. The mineralogy of iron meteorites: Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences, 286 (1336), 453-491. <https://doi.org/10.1098/rsta.1977.0127>
- Buchwald, V.F., Clarke Jr, R.S., 1989. Corrosion of Fe-Ni alloys by Cl-containing akaganéite (β -FeOOH): The Antarctic meteorite case. *American Mineralogist*, 74: 656-667.
- Ceballos-Izquierdo, Y., 2019. Recuento de los meteoritos reportados en Cuba y bibliografía sobre el tema. *Anales de la Academia de Ciencias de Cuba*, 9 (1 Especial), 1-18.
- Ceballos-Izquierdo, Y., 2022. Será o no será [meteorito], esa es la pregunta. La historia de las rocas que querían ser meteoritos. *Energía y Tú*, 98: 20-24.
- Ceballos-Izquierdo, Y., Orihuela, J., Gonçalves Silva, G., Zurita, M., Cardozo Mourão, M., Delgado Manzor, H., 2021. Meteorite and bright fireball records from Cuba. *Mineralia Slovaca*, 54: 3-18.
- Ceballos-Izquierdo, Y., Nieto Codina, A., Orihuela, J., 2024. From Meteorite to Meteor-Wrong: Investigating a controversial specimen from Cuba. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 41 (1): 1-10. <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2024.1.1761>
- Centro de Investigaciones para la Industria Minero-Metalúrgica (CIPIMM), 2003. Informe de resultados de análisis por difracción de rayos X. Certificado de ensayo #2, La Habana, Cuba.
- González-Toril, E., Martínez-Frías, J., Gómez, J.M., Rull, F., Amils, R., 2005. Iron meteorites can support the growth of acidophilic chemolithoautotrophic microorganisms. *Astrobiology*, 5 (3): 406-414. <https://doi.org/10.1089/ast.2005.5.406>
- Gronstal, A., Pearson, V., Kappler, A., Dooris, C., Anand, M., Poitrasson, F., Cockell, C.S., 2009. Laboratory experiments

- on the weathering of iron meteorites and carbonaceous chondrites by iron-oxidizing bacteria. *Meteoritics & Planetary Science*, 44 (2): 233-247.
<https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2009.tb00731.x>
- Henderson, E.P., Perry, S.H., 1954. A discussion of the densities of iron meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 6 (5-6): 221-240. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(54\)90002-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(54)90002-2)
- Iturralde-Vinent, M., 2023. Comentarios sobre “Actualización del Registro Institucional de Meteoritos Caídos en Cuba”. *Geoinformativa*, 16 (2): 57-61.
- Iturralde-Vinent, M., García-Casco, A., Rojas-Agramonte, Y., Proenza-Fernández, J.A., Murphy, J.B., Stern, R.J., 2016. The geology of Cuba: A brief overview and synthesis. *GSA Today*, 26 (10): 4-10. <https://doi.org/10.1130/GSATG296A.1>
- Jaimez-Salgado, E., 2023. Actualización del registro institucional de meteoritos caídos en Cuba. II Congreso de ciencias geoespaciales y riesgo de desastres, 17-26.
- Jaimez-Salgado, E., Alonso, J.A., Fleita, R., 2001. Notas sobre el hallazgo de un meteorito férrico (siderito) en Ciudad de la Habana. *Datos Astronómicos para Cuba*, 74-75.
- Jaimez-Salgado, E., Alonso, J.A., Fleita, R., 2007. Nuevos reportes de meteoritos en las provincias de la Habana y Ciudad de la Habana, Cuba. *Datos Astronómicos para Cuba*, 94-95.
- Jaimez-Salgado, E., González Veitia, F., Alonso, A., Zaldívar Estrada, R., 2023. Actualización del registro institucional de meteoritos caídos en Cuba según Instituto de Geofísica y Astronomía. *Ciencias de la Tierra y el Espacio*, julio-diciembre, 23 (2): 25-33.
- Krot, A.N., Keil, K., Scott, E.R.D., Goodrich, C.A., Weisberg, M.K., 2014. Classification of Meteorites and their genetic relationships, in Davis, A.M. (ed.), *Meteorites and cosmochemical processes*, 2nd ed., Vol. 1, *Treatise on Geochemistry*: Oxford, Elsevier, 1-63. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00102-9>
- Li, G., Bai, W., Shi, N., Fang, Q., Xiong, M., Yang, J., Ma, Z., Rong, H., 2012. Linzhiite, FeSi₂, a redefined and revalidated new mineral species from Luobusha, Tibet, China. *European Journal of Mineralogy*, 24 (6): 1047-1052.
<https://doi.org/10.1127/0935-1221/2012/0024-2237>
- Ma, C., Lin, C., Bindi, L., Steinhardt, P.J., 2016. Discovery of new Al-Cu-Fe minerals in the Khatyrka CV3 meteorite. In 79th Annual Meeting of the Meteoritical Society, 79 (1921): 6017.
- Nazarov, M.A., Shornikov, S.I., Demidova, S.I., 2015. Origin of native silicon and iron silicides in the Dhofar 280 lunar meteorite. *Petrology*, 23: 168-175.
<https://doi.org/10.1134/S0869591115020071>
- Nicheng, S.H.I., Wenji, B.A.I., Guowu, L.I., Ming, X.I.O.N.G., Jingsu, Y.A.N.G., Zhesheng, M.A., He, R., 2012. Naquite, FeSi, a new mineral species from Luobusha, Tibet, western China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 86 (3): 533-538. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.2012.00682.x>
- Norton, O.R., Chitwood, L.A., 2008. *Field guide to meteors and meteorites*. London: Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-1-84800-157-2>
- Notkin, G., 2011. *Meteorite hunting: How to find treasure from space*. Tucson, USA, *Aerolite Meteorites*, 84 pp.
- Orihuela, J., Viñola, L.W., Vázquez, O.J., Mychajliw, A.M., de Lara, O.H., Lorenzo, L., Soto-Centeno, J.A., 2020. Assessing the role of humans in Greater Antillean land vertebrate extinctions: New insights from Cuba. *Quaternary Science Reviews*, 249, p.106597.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106597>
- Pérez-Doval, J., 1996. *Meteoritos Cubanos. Datos Astronómicos para Cuba*, 101.
- Rappenglück, M.A., 2022. Natural Iron Silicides: A Systematic Review. *Minerals*, 12: 188.
<https://doi.org/10.3390/min12020188>
- Rochette, P., Rojas-Consuegra, R., Andrieu, V., Moreira Martínez, J., 2023. Report on in situ investigations of meteorites from Cuba (Poster GEO6-P9). *Convención Internacional de Ciencias de La Tierra. La Habana. Abril 2023*.
- Rubin, A. E., Ma, Ch., 2017. Meteoritic minerals and their origins. *Geochemistry*, 77, 3: 325-385.
<https://doi.org/10.1016/j.chemer.2017.01.005>
- Scott, E.R., 2020. Iron meteorites: Composition, age, and origin. *Oxford Research Encyclopedia of Planetary Science*.
<https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190647926.013.206>
- Segura-Soto, R., 1983. Hallazgo de un meteorito en la Playa de Bacuranao, Cuba. *Boletín de la Sociedad Cubana de Geología*, 1 (1): 76-82.
- Senesi, G.S., Manzari, P., Tempesta, G., Agrosi, G., Touchnt, A.A., Ibhi, A., De Pascale, O., 2018. Handheld laser induced breakdown spectroscopy instrumentation applied to the rapid discrimination between iron meteorites and meteor-wrongs. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 42 (4): 607-614.
<https://doi.org/10.1111/ggr.12220>
- Solano y Eulate, J.M., 1872. Noticia sobre un hierro meteórico hallado en el departamento oriental de la isla de Cuba. *Anales de la Sociedad Española de Historia Natural*, Madrid, 1: 183-186.
- Villegas, R., 1984. Informe preliminar sobre los hallazgos arqueológicos del sitio El Gato Jibaro. *Boletín Espeleológico del Grupo Norbert Casteret*, número 5.

MANUSCRITO RECIBIDO: 17-02-2024

REVISIÓN RECIBIDA: 07-04-2024

ACEPTACIÓN DEL MANUSCRITO REVISADO: 17-06-2024



ESTUDIO PRELIMINAR DE LA CUENCA AUSTRAL A PARTIR DE BIOMARCADORES OBTENIDOS DE DIVERSOS CRUDOS

Preliminar study of the Austral Basin based on biomarkers obtained from different crude oils

Germán Javier Tomas^{1,2} y Adrián Javier Acuña²

¹ Centro de Investigación y Transferencia de la Provincia de Santa Cruz - CONICET, Av. Lisandro de la Torre 860, Río Gallegos (9400) Santa Cruz, Argentina. germanjaviertomas@frsc.utn.edu.ar

² Grupo de Estudios Ambientales (GEA) Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Santa Cruz, Av. de los Inmigrantes 555, Río Gallegos (9400) Santa Cruz, Argentina. adrianjacuna@yahoo.com.ar

Resumen: En Argentina existen varias cuencas productivas de petróleo, entre ellas la Cuenca Austral, cuyas sucesiones estratigráficas contienen varias unidades que actúan como rocas reservorio, destacando en este estudio las formaciones Springhill, Margas Verdes y Piedra Clavada. El objetivo de este trabajo fue analizar los biomarcadores de trece muestras de crudo extraídas de estas unidades reservorio, que permitiera caracterizar la materia orgánica que los formó, el ambiente en la que está sedimentó, la litología de las rocas generadoras y el grado de emparentamiento entre las mismas. Para tal fin, se analizaron los perfiles de biomarcadores por GC/MS a partir de sus fracciones alifáticas y aromáticas previa separación por cromatografía en columna. Parámetros específicos tales como P/F, P/n-C₁₇, F/n-C₁₈, DBT/Ph, % MeDBT y % S₂₇₋₂₈₋₂₉ indican que todos los crudos se generaron a partir de materia orgánica tipo II-III (mixta), asociada a rocas madre siliciclásticas en ambientes sedimentarios con baja concentración de oxígeno. Los resultados obtenidos se corresponden con estudios previos realizados sobre petróleos de esta cuenca. Además, las muestras se agruparon mediante el siguiente patrón: ambiente tectónico y profundidad de punzado < roca madre-unidad reservorio < ubicación respecto al río Gallegos.

Palabras clave: esteranos, terpanos, litología, materia orgánica, Palermo Aike

Abstract: In Argentina there are several oil-producing basins, including the Austral Basin, whose stratigraphic successions contain several units that behave as reservoir rocks, highlighting in this study the Springhill, Margas Verdes and Piedra Clavada formations. The objective of this work was to analyze the biomarkers of thirteen crude oil samples extracted from these reservoir units, to characterize the organic matter that formed them, the environment in which they were sedimented, the lithology of the source rocks and the degree of relatedness between them. For this purpose, biomarker profiles were analyzed by GC/MS from their aliphatic and aromatic fractions after separation by column chromatography. Specific parameters such as P/F, P/n-C₁₇, F/n-C₁₈, DBT/Ph, % MeDBT and % S₂₇₋₂₈₋₂₉ indicate that all crudes were generated from type II-III (mixed) organic matter associated with siliciclastic source rocks in sedimentary environments with low oxygen concentration. The results obtained are in agreement with previous studies carried out on crude oils from this basin. In addition, the samples were grouped by the following pattern: tectonic environment and depth of puncturing < source rock-reservoir unit < location with respect to the Gallegos River.



Keywords: steranes, terpanes, lithology, organic matter, Palermo Aike

Tomas, G.J., Acuña, A.J., 2024. Estudio preliminar de la Cuenca Austral a partir de biomarcadores obtenidos de diversos crudos. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 37 (1): 45-55.

Introducción y marco geológico

La Cuenca Austral se formó durante el Triásico-Jurásico y se ubica en el extremo sur de la Patagonia Argentina. Hacia el norte limita con el macizo del Deseado, un alto estructural emplazado en el centro-norte de la provincia de Santa Cruz. Hacia el noroeste se conecta con la parte occidental de la cuenca del Golfo San Jorge la cual se sitúa entre el norte de la provincia de Santa Cruz y el sur de la provincia de Chubut (Ramos *et al.*, 2019). Un cuarto de la cuenca está en territorio chileno, en la isla de Tierra del Fuego y al norte del estrecho de Magallanes, y el resto en Argentina, abarcando una superficie de 162.000 km² (Aramendia *et al.*, 2018). La Cuenca Austral posee una plataforma estable (territorio continental) que cubre una faja de aproximadamente 600 km de largo por un máximo de 150 km de ancho, adosada al litoral marítimo de las provincias de Santa Cruz y Tierra del Fuego (Barberón *et al.*, 2015). Le sigue el sector costa afuera (*offshore*), que cubre todo el litoral marítimo, desde la costa hasta el Alto de Dungeness en Argentina y parte del Estrecho de Magallanes en Chile. Continúa con un talud y cuenca oceánica ubicados en el centro oeste de la provincia, documentando en el sector

más profundo de la cuenca, abundantes manifestaciones de hidrocarburos (Zerfass *et al.* 2017).

El desarrollo de la Cuenca Austral está fuertemente ligado a la evolución geodinámica de la curvatura de los Andes más meridionales (lado cóncavo), mientras que el sector bisagra contiene el depocentro más grueso (Diraison *et al.*, 2000). Tras la acreción cratónica de finales del Paleozoico-Triásico y consolidación del basamento (Giacosa *et al.*, 2012), un evento extensional del Jurásico estableció el sustrato de la cuenca. Durante la extensión del Gondwana, la cuenca oceánica de Rocas Verdes se abrió a lo largo del margen del continente (Calderón *et al.*, 2016). Además, un sistema regional de fosas de orientación N-S a NE-SW con relleno sin-rift de secuencias continentales y volcánicas afectó a toda la cuenca (Cuitiño *et al.* 2019). La etapa rift de sedimentación en la Cuenca Austral se produjo durante el final del Jurásico superior y principios del Cretácico. Esta fase extensional corresponde a la Fm. Tobífera, la cual presenta un espesor variable de entre 100 y más de 1000 m, y se compone principalmente de secuencias volcano-sedimentarias (Poiré y Franzese, 2010). Sobre este complejo se encuentra la Fm. Springhill, que representa el relleno transgresivo inicial de las fosas y semifosas

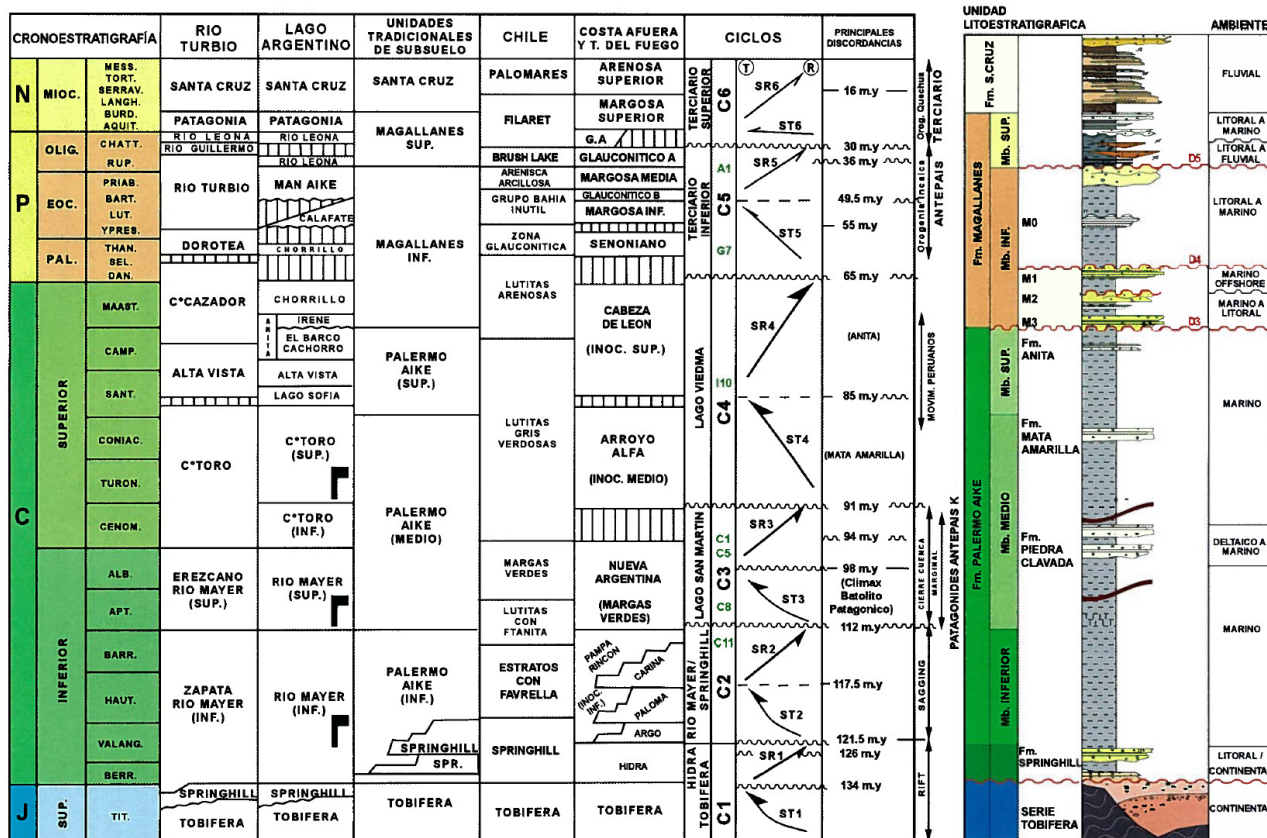


Fig. 1.- Cuadro estratigráfico y ciclos deposicionales de la Cuenca Austral (Adaptado de Rodríguez *et al.*, 2008).

(Cuitiño *et al.* 2019). Esta unidad se definió por primera vez en estudios del subsuelo y es la más importante de la Cuenca Austral (Schwarz *et al.*, 2011). Después de la fase de ruptura en el Jurásico tardío, se inició en la cuenca un ciclo tectónico transgresivo caracterizado con la sedimentación de la Fm. Inoceramus Inferior compuesta de lutitas ricas en materia orgánica (Gallardo, 2014). La fase de hundimiento continuó durante el Cretácico medio con el depósito de la Fm. Margas Verdes, representada por lutitas calcáreas y argilitas marinas, señalando el inicio de un nuevo ciclo tectónico. Las unidades reservorio terciarias de la cuenca están representadas por areniscas típicas en dos unidades: Magallanes Inferior (Paleoceno-Eoceno) y Magallanes Superior (Eoceno tardío-Mioceno temprano). La primera descansa de manera inconforme sobre el Cretácico y está compuesta por areniscas glauconíticas y de cuarzo, y lutitas, depositadas en un entorno marino (Mpodozis *et al.*, 2011). La segunda está compuesta por conglomerados, areniscas, lutitas y lechos de lignito, depositada en un entorno fluvial a marginal marino (Barberón *et al.*, 2015). La formación del Mioceno suprayacente está representada por depósitos continentales de la Fm. Santa Cruz. En la Fig. 1 se observa un diagrama estratigráfico de la Cuenca Austral para diferentes localidades donde se observan las unidades tradicionales del subsuelo.

A partir de algunas evidencias que surgen de correlaciones entre rocas madre-hidrocarburos, se han reconocido seis sistemas petrolíferos en la Cuenca Austral, de los cuales tres se clasifican como conocidos: “Palermo Aike/Inoceramus Inferior-Springhill”, “Margas Verdes-Magallanes Inferior” y “Tobífera- Tobífera/Springhill” (Rodríguez *et al.*, 2008). La Fm. Springhill es la roca reservorio principal de la cuenca, conocida desde la década de los cuarenta aportó prácticamente la totalidad de los recursos hidrocarbúricos descubiertos hasta la fecha, sin embargo, existen varias unidades reservorio de petróleo y gas en la Fm. Magallanes Inferior (Cagnolatti y Miller, 2002).

Durante la evolución de la cuenca se produjo un progresivo enterramiento de las rocas madre que favoreció la generación de hidrocarburos. La Fm. Palermo Aike/Inoceramus Inferior se caracterizó por un querógeno mixto (tipo II/III) que se determinó a partir de los resultados de los índices de hidrógeno y oxígeno obtenidos por pirólisis Rock-Eval (Belotti *et al.*, 2014). La acumulación de este tipo de materia orgánica está relacionada con el impacto anóxico en la franja de hundimiento de la placa sudamericana (Legarreta y Villar, 2011). En este sentido, las pelitas generadoras de la Fm. Margas Verdes han sido correlacionadas con petróleos marinos en el sector sur de la cuenca (Pittion y Gouadain, 1992; Pittion y Arbe, 1999). Por otro lado, la roca generadora conocida como Serie Tobífera tiene asociada facies que se acumularon bajo condiciones lacustres restringidas y dieron lugar a querógenos de tipo III y en menor medida de tipo I (Legarreta y Villar, 2011). El objetivo de este trabajo fue analizar los biomarcadores presentes en muestras de crudo provenientes de la Cuenca Austral que permitiera determinar el tipo de materia orgánica que los generó y las condiciones paleoambientales bajo las cuales ésta sedimentó. Además, conocer la natu-

raleza de las rocas madre y el grado de relación entre los crudos extraídos de las distintas unidades reservorios.

Materiales y métodos

Muestras de crudo

Se obtuvieron 13 muestras de crudo provenientes de la misma cantidad de yacimientos ubicados a lo largo y ancho de la Cuenca Austral (Fig. 2). Siete muestras fueron extraídas de la Fm. Springhill a una profundidad de punzado que osciló entre los 1300 y 3100 m, dependiendo del área tectónica de la cuenca. De las seis restantes, dos se obtuvieron de la Fm. Piedra Clavada y las otras cuatro de la Fm. Magallanes Inferior a profundidades promedio de 2300 y 1600 m, respectivamente. Cabe destacar que presentaron una gravedad API entre los 32° y 50° a 15 °C, por lo tanto, se pueden clasificar como hidrocarburos livianos. Además, es importante mencionar que los crudos fueron recolectados y transportados al laboratorio en botellas de vidrio (color ámbar) de un litro de capacidad previamente lavadas. La coloración caramelo de los frascos previno el desarrollo de reacciones fotoquímicas sobre los hidrocarburos. Durante el llenado de las botellas, se evitó la formación de

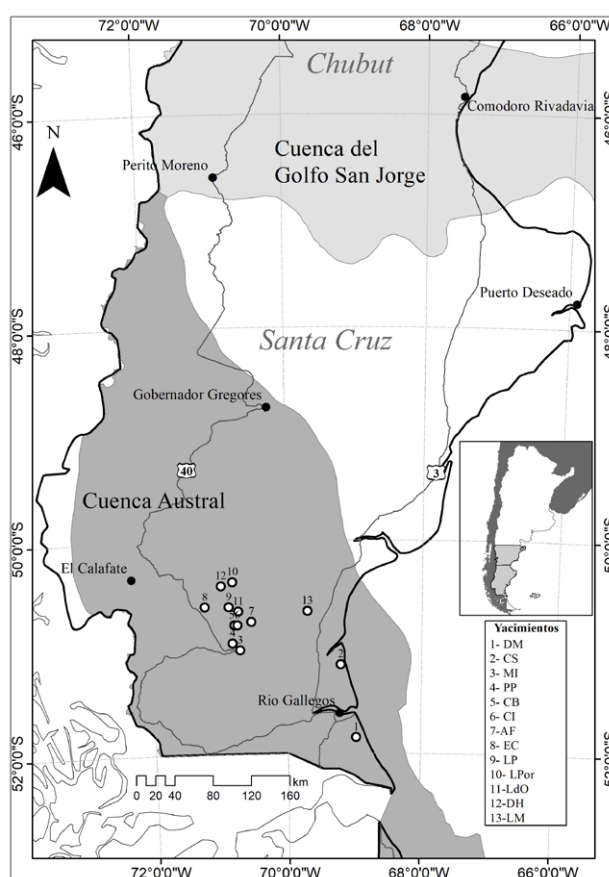


Fig. 2.- Mapa de la Cuenca Austral donde se indican los yacimientos estudiados: Del Mosquito (DM), Cañadón Salto (CS), La Maggie (LM), Campo Boleadoras (CB), Campo Indio Oeste (CI), Laguna del Oro (LdO), La Paz (LP), Dos Hermanos (DH), La Porfiada (Lpor), María Inés (MI), Puesto Peter (PP), Agua Fresca (AF), El Cerrito (EC).

Código	Yacimiento	Roca madre	Reservorio	Ubicación	Punzado	Coordenadas
DM	Del Mosquito	Palermo Aike	Springhill	Plataforma sur	1300 m	51°51'02" S - 68°58'26" W
CS	Cañadón Salto	Palermo Aike	Springhill	Plataforma norte	1300 m	51°09'57" S - 69°12'06" W
LM	La Maggie	Palermo Aike	Springhill	Plataforma norte	1500 m	50°39'57" S - 69°41'30" W
CB	Campo Boleadoras	Palermo Aike	Springhill	Talud centro	3100 m	50°47'27" S - 70°46'26" W
CI	Campo Indio Oeste	Palermo Aike	Springhill	Talud centro	2900 m	50°47'24" S - 70°43'52" W
LdO	Laguna del Oro	Palermo Aike	Springhill	Talud centro	3100 m	50°39'42" S - 70°42'43" W
LP	La Paz	Palermo Aike	Springhill	Talud centro	3000 m	50°37'11" S - 70°51'11" W
DH	Dos Hermanos	Palermo Aike	Piedra Clavada	Talud norte	2100 m	50°25'13" S - 70°57'31" W
LPor	La Porfiada	Palermo Aike	Piedra Clavada	Talud norte	2500 m	50°23'09" S - 70°47'31" W
MI	María Inés	Margas Verdes	Magallanes Inferior	Talud sur	1600 m	51°01'35" S - 70°41'43" W
PP	Puesto Peter	Margas Verdes	Magallanes Inferior	Talud sur	1600 m	50°57'33" S - 70°48'25" W
AF	Agua Fresca	Margas Verdes	Magallanes Inferior	Talud centro	1400 m	50°45'37" S - 70°31'24" W
EC	El Cerrito	Margas Verdes	Magallanes Inferior	Talud centro	1800 m	50°36'56" S - 71°12'25" W

Tabla 1.- Descripción de las 13 muestras de crudo de la Cuenca Austral estudiadas.

una cámara de aire para minimizar el impacto del oxígeno en la estabilidad de las muestras y la aparición de procesos biodegradativos estimulados por un microambiente óxico. Finalmente, fueron almacenadas en un lugar oscuro y seco a temperatura ambiente hasta la realización de los análisis dentro en las siguientes 72 horas. En la Tabla 1 se presentan en detalle los nombres (código) y los respectivos yacimientos, rocas madre, unidades reservorio, ambientes tectónicos (ubicación), profundidades de punzado y coordenadas, de todas las muestras analizadas.

Acondicionamiento de las muestras

Teniendo en cuenta los trabajos de Leal *et al.* (2011) y Tomas *et al.* (2020), el procedimiento para la obtención de las fracciones a analizar consistió en la separación de los crudos por cromatografía de adsorción sólido-líquido en columna, en hidrocarburos saturados, compuestos aromáticos y resinas-asfaltenos. Las muestras se sometieron a una separación en columna de vidrio (20 cm x 1,2 cm) empacada con 3 g de gel de sílice (activado a 150 °C durante un

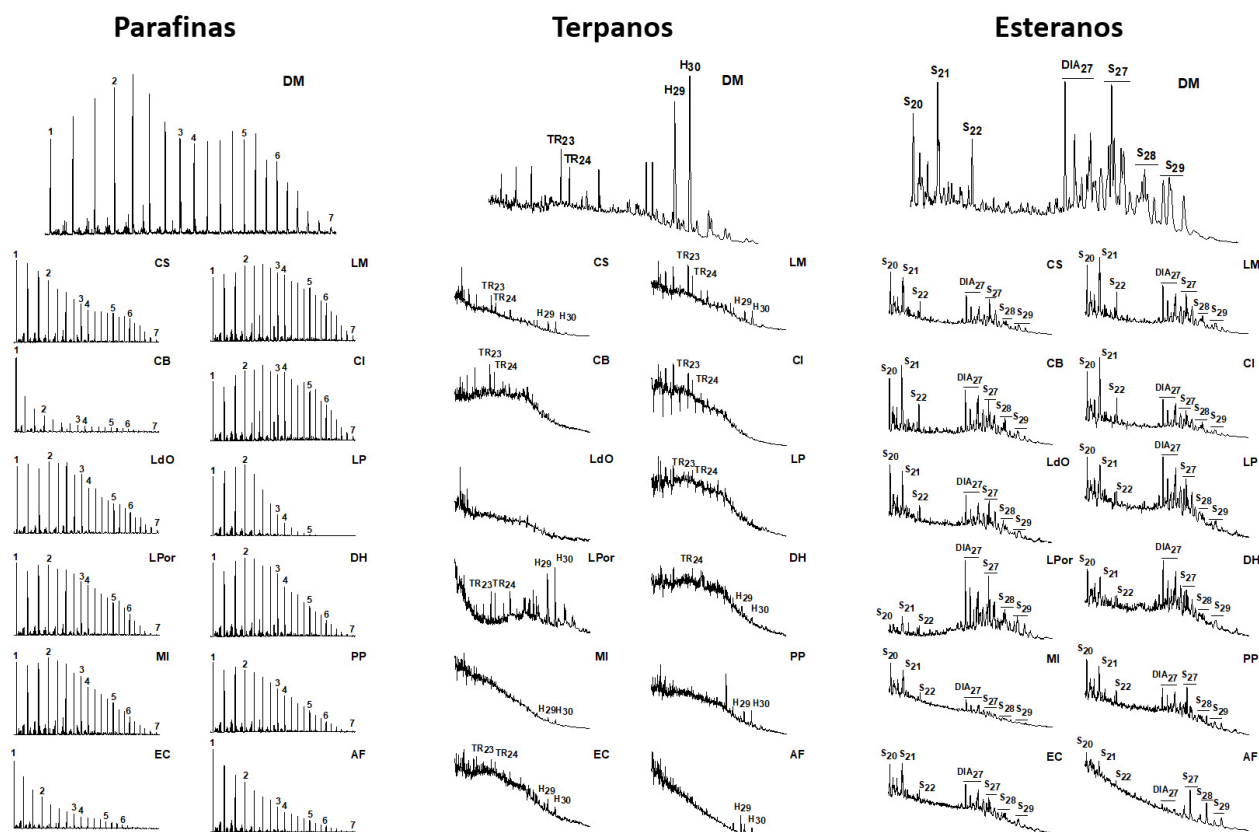


Fig. 3.- Distribución de los n-alcenos, terpanos y esteranos en los fragmentogramas correspondientes a los iones $m/z = 85$, 191 y 217, respectivamente para los crudos estudiados. Del Mosquito (DM), Cañadón Salto (CS), La Maggie (LM), Campo Boleadoras (CB), Campo Indio (CI), Laguna del Oro (LdO), La Paz (LP), La Porfiada (Lpor), Dos Hermanos (DH), María Inés (MI), Puesto Peter (PP), El Cerrito (EC), Agua Fresca (AF). 1: decano ($n-C_{10}$), 2: tridecano ($n-C_{13}$), 3: heptadecano ($n-C_{17}$), 4: octadecano ($n-C_{18}$), 5: docosano ($n-C_{22}$), 6: pentacosano ($n-C_{25}$), 7: tridecano ($n-C_{30}$), TR₂₃: terpano tricíclico C₂₃, TR₂₄: terpano tricíclico C₂₄, H₂₉: norhopano C₂₉, H₃₀: hopano C₃₀, S₂₀: pregnano, S₂₁: homopregnano, S₂₂: bishomopregnano, DIA₂₇: diasteranos C₂₇, S₂₇: colestanos, S₂₈: ergostanos, S₂₉: estigmastanos.

período de 24 horas en estufa), al que se le adicionó 50 mg de sulfato de sodio activado y 50 mg de alúmina activada en su parte superior. Se sembraron aproximadamente 100 μL de crudo en la columna, que se eluyeron sucesivamente con 10 mL de n-pentano y 10 mL de diclorometano, para obtener los eluatos alifático y aromático, respectivamente, quedando retenidas en la columna las fracciones pesadas conocidas como resinas y asfaltenos. Los extractos alifático y aromático se concentraron por separado hasta 0,5 mL bajo corriente de nitrógeno, se transfirieron a un vial de cromatografía, y se almacenaron a -15°C hasta su análisis.

Análisis cromatográfico

En base a las publicaciones de Stashenko *et al.* (2014) y Tomas y Acuña (2023), por cada muestra de crudo se inyectó en un cromatógrafo de gases, 1 μL de los eluatos alifático y aromático en modo Splitless. La separación se realizó en un equipo Agilent modelo 7890A, con un detector de espectrometría de masas de la misma marca (modelo 5975C). Se utilizó una columna HP5ms de 30 m de largo, con un diámetro interno de 0,32 mm y un espesor de película de 0,25 μm . La temperatura del inyector se ajustó a 290°C y se utilizó helio como gas acarreador con una velocidad de flujo de $1,2\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$. El programa de temperatura utilizado fue el siguiente: temperatura inicial de 55°C durante 2 min, seguido de una rampa de $6^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ hasta alcanzar los 270°C , pasando directamente a otra rampa de $3^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ hasta alcanzar 300°C , temperatura que se mantuvo durante 17 min. El tiempo total de corrida fue de 65 min. El detector de masas se utilizó con una temperatura de la fuente de iones y de la línea de transferencia de 230°C y 180°C , respectivamente, y una energía de impacto de 70 eV. El escaneo de masas entre 30 y 400 uma se realizó en modo Scan para analizar los iones $m/z = 178$ (fenantreno), 184 (dibenzotiofeno) y 198 (metildibenzotiofenos) en la fracción aromática. Por otro lado, el modo SIM Scan (monitoreo de iones seleccionados) se empleó para determinar los iones $m/z = 85$ (alcanos, pristano, fitano), 191 (terpanos) y 217 (esteranos) en la fracción alifática. De esta manera se obtuvieron los fragmentogramas de interés correspondientes a cada muestra, haciendo uso del software “MSD ChemStation Data Analysis Application”. A partir de los tiempos de retención, bibliografía de referencia e integración manual de los picos, se identificaron los compuestos antes mencionados.

Resultados

Alcanos, pristano y fitano

En la Fig. 3 se observan los cromatogramas de masas para el ion $m/z = 85$ de las trece muestras de crudo que formaron parte de este estudio, la mayoría de las cuales presentan una distribución unimodal. El número de carbonos de todas las muestras se sitúa en el intervalo $\text{C}_{10}\text{--}\text{C}_{30}$, con excepción del crudo LP que alcanza hasta el tetradocosano (n-C_{24}). Además, la relación P/F oscila entre 1,22 y 1,98

con una media de 1,53, y los cocientes P/n-C_{17} y F/n-C_{18} son relativamente bajos, con valores de 0,11 a 0,48 y 0,08 a 0,34, respectivamente (Tabla 2).

Utilizando la relación P/n-C_{17} en función de F/n-C_{18} con los valores presentados en la Tabla 2, se graficó el Diagrama de Shanmugam (Fig. 4) para evaluar la materia orgánica precursora de los crudos (Shanmugam, 1985). Todas las muestras se agruparon cercanas entre sí, en el intervalo definido para la materia orgánica tipo mixta (marina-continental). Otra forma de analizar la naturaleza de la materia orgánica que sedimentó y dio lugar a la generación de estos crudos por posteriores transformaciones biológicas, físicas y geoquímicas, es a través del cociente P/n-C_{17} en función de P/F (Peters *et al.*, 2005). Esta representación permitió complementar los resultados observados en el Diagrama de Shanmugam, ya que las muestras nuevamente se ubicaron en el intervalo definido para la materia orgánica de tipo mixta (Fig. 5).

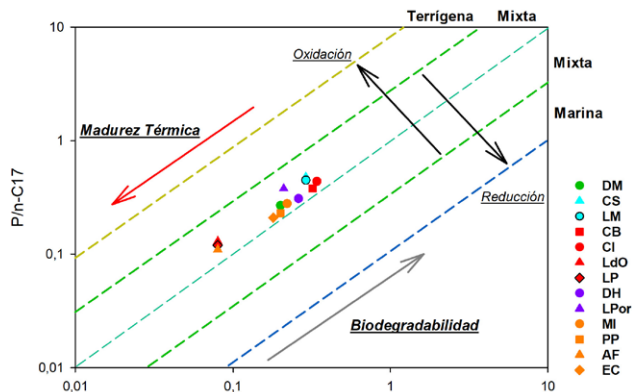


Fig. 4.- Diagrama de Shanmugam (Shanmugam, 1985) de P/n-C_{17} en función de F/n-C_{18} para las muestras de crudos estudiadas.

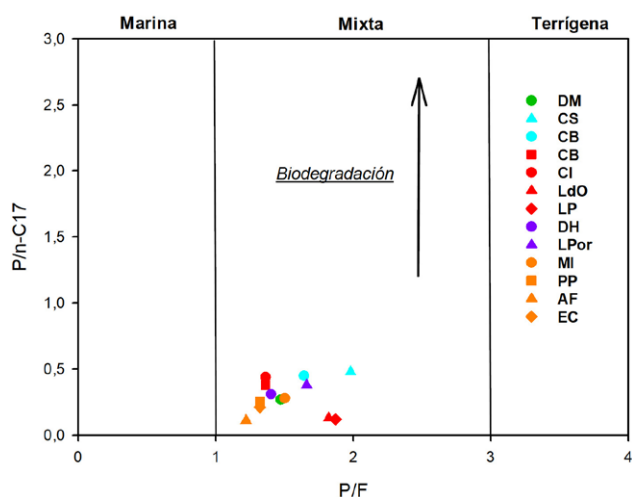


Fig. 5.- Representación del coeficiente P/n-C_{17} en función de P/F para las muestras de crudos analizadas.

Biomarcadores alicíclicos

A partir de la fracción de hidrocarburos saturados se obtuvieron los fragmentogramas asociados a la relación $m/z = 191$ (Fig. 3). El único crudo que presentó señales

Parámetro	DM	CS	LM	CB	CI	LdO	LP	DH	LPor	MI	PP	AF	EC
P/C ₁₇	0,27	0,48	0,45	0,38	0,44	0,13	0,12	0,31	0,38	0,28	0,25	0,11	0,21
F/C ₁₈	0,20	0,29	0,29	0,32	0,34	0,08	0,08	0,26	0,21	0,22	0,20	0,08	0,18
P/F	1,47	1,98	1,64	1,36	1,36	1,82	1,87	1,40	1,66	1,50	1,32	1,22	1,32
C ₂₉ /C ₁₇	0,43	0,33	0,31	0,18	0,29	0,32	0,00	0,16	0,12	0,16	0,11	0,12	0,10
% S ₂₇	44	50	48	47	57	50	52	45	46	50	50	37	43
% S ₂₈	20	22	25	30	25	27	25	19	24	30	28	37	28
% S ₂₉	36	28	27	23	18	23	23	36	30	20	22	26	29
DBT/Ph	0,09	0,20	0,08	0,10	0,14	0,05	0,02	0,02	0,05	0,09	0,01	0,07	0,02
IMP	0,88	0,69	1,00	1,47	1,21	1,30	1,52	0,70	1,06	1,32	1,08	0,80	0,60
Rc	0,93	0,82	0,99	1,25	1,11	1,15	1,27	0,83	1,02	1,17	1,03	0,88	0,77
% 4-MeDBT	63	58	57	65	65	66	69	53	63	58	55	54	52
% (2+3)-MeDBT	27	28	34	33	34	33	30	38	34	31	30	26	33
% 1-MeDBT	10	14	09	02	01	01	01	09	03	11	15	20	15
TR23	4,83	7,55	7,17	4,72	2,57	3,65	5,58	18,68	6,43	11,50	7,09	9,48	9,78
TR24	3,03	4,57	4,95	3,01	1,49	3,78	4,76	11,62	5,40	6,94	7,80	6,61	9,46
H29	21,45	5,24	3,39	0,89	1,64	1,58	4,58	7,52	10,09	15,78	12,97	13,16	15,47
H30	60,69	12,65	9,47	1,39	4,31	0,99	6,08	12,19	28,07	15,76	22,14	20,74	15,30
S20	1,41	23,39	23,20	23,12	29,07	31,69	20,26	11,56	2,03	21,11	17,28	17,69	12,17
S21	1,47	7,95	10,62	17,25	16,36	14,80	10,75	2,94	2,28	7,78	7,40	10,57	8,14
S22	1,17	7,78	9,90	11,23	13,41	9,03	7,87	2,81	2,30	3,94	4,41	5,74	3,92
DIA27S	3,05	16,49	15,99	18,52	15,78	16,45	17,91	15,26	21,65	8,49	10,22	7,09	11,27
DIA27R	1,30	7,12	6,50	7,29	6,14	7,87	9,91	6,52	10,56	4,25	3,76	3,78	6,01
DIA27S2	0,58	2,27	1,93	2,62	1,68	2,23	3,46	4,46	4,83	0,96	2,41	0,83	2,43
DIA27R2	1,02	4,99	6,84	9,96	7,55	7,93	8,84	6,44	6,36	3,49	4,51	4,31	6,05

Tabla 2.- Parámetros moleculares derivados de n-alcenos, isoprenoides alicíclicos y marcadores aromáticos seleccionados en las muestras de crudo analizadas y extraídas de la Cuenca Austral. P/n-C₁₇ = pristano/heptadecano, F/n-C₁₈ = fitano/octadecano (Moldowan *et al.*, 1985); P/F = pristano/fitano (Tissot y Welte, 1984); n-C₂₉/n-C₁₇ (Peters *et al.*, 2005); % S₂₇ = (C₂₇ / C₂₇ + C₂₈ + C₂₉) * 100, % S₂₈ = (C₂₈ / C₂₇ + C₂₈ + C₂₉) * 100, % S₂₉ = (C₂₉ / C₂₇ + C₂₈ + C₂₉) * 100 (Peters *et al.*, 2005); DBT/ Ph = dibenzotiofeno/fenantreno (Hughes *et al.*, 1995); IMP = índice de metilfenantreno (1.5 x (2-MP + 3-MP) / (Ph + 1-MP + 9-MP)) (Radke y Welte, 1983); % Rc = 0.60 x IMP + 0.40 si MPR < 2.65 y % Rc = - 0.60 x IMP + 0.40 si MPR > 2.65 (Radke y Welte, 1983); % 4-MeDBT = (4-MeDBT / 4-MeDBT + (2 + 3)-MeDBT) * 100, % (2 + 3)-MeDBT = ((2 + 3)-MeDBT / 4-MeDBT + (2 + 3)-MeDBT) * 100, % 1-MeDBT = (1-MeDBT / 4-MeDBT + (2 + 3)-MeDBT + 1-MeDBT) * 100 (Killops y Killops, 2005); TR23 = terpano tricíclico C₂₃; TR24 = terpano tricíclico C₂₄; H29 = 7α(H), 21β(H)-30-norhopano; H30 = 17α(H), 21β(H)-hopano; S20 = C₂₀ 5α(H), 14α(H), 17α(H)-esterano; S21 = C₂₁ 5α(H), 14β(H), 17β(H)-esterano; S22 = C₂₂ 5α(H), 14β(H), 17β(H)-esterano; DIA27S = C₂₇ 20S - 13β(H), 17α(H)-diasterano; DIA27R = C₂₇ 20R - 13β(H), 17α(H)-diasterano; DIA27S2 = C₂₇ 20S - 13α(H), 17β(H)-diasterano, DIA27R2 = C₂₇ 20S - 13α(H), 17β(H)-diasterano.

claras e intensas de los terpanos (zona intermedia) fue el extraído del yacimiento Del Mosquito con picos predominantes para los hopanos H₂₉ y H₃₀. El resto de las muestras exhibieron señales de baja intensidad para estos biomarcadores en sus fragmentogramas respectivos, evidenciando que DM es una excepción en la Cuenca Austral. Por otro lado, los cromatogramas asociados a la relación m/z = 217 también se obtuvieron a partir de la fracción alifática, que corresponde a una familia de biomarcadores tetracíclicos sin aromaticidad (Fig. 3). En consonancia con lo mencionado anteriormente para los terpanos, nuevamente el crudo DM fue la muestra que permitió una mejor visualización de estos biomarcadores derivados de organismos eucariotas. Sin embargo, en general se observó una distribución similar de estas moléculas para todos los crudos con mayores abundancias de pregnanos (picos 1, 2 y 3) y diasteranos C₂₇ (pico 4) para las muestras extraídas de la Fm. Springhill. Finalmente, en base a las proporciones de los colestanos (S₂₇), ergostanos (S₂₈) y estigmastanos (S₂₉) presentadas en la Tabla 2, se graficó el diagrama ternario propuesto por Moldowan *et al.* (1985), donde se puede observar que todos los crudos se ubicaron en la región definida para rocas madre con una litología de tipo lutitas marinas (Fig. 6).

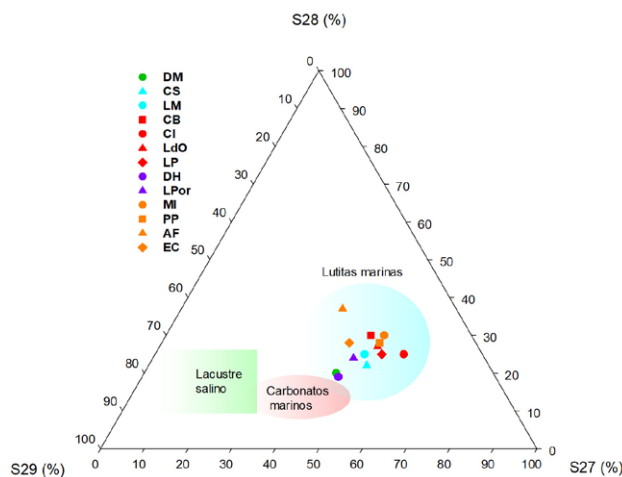


Fig. 6.- Diagrama ternario propuesto por Moldowan *et al.* (1985) de esteranos para las muestras de crudos analizadas.

Hidrocarburos aromáticos policíclicos

La litología presente durante la sedimentación de la materia orgánica constituye un aspecto clave en la formación del petróleo. A partir de los porcentajes relativos de los isómeros metilados del dibenzotiofeno presentados en la Tabla 2, se pudo determinar la naturaleza de las rocas

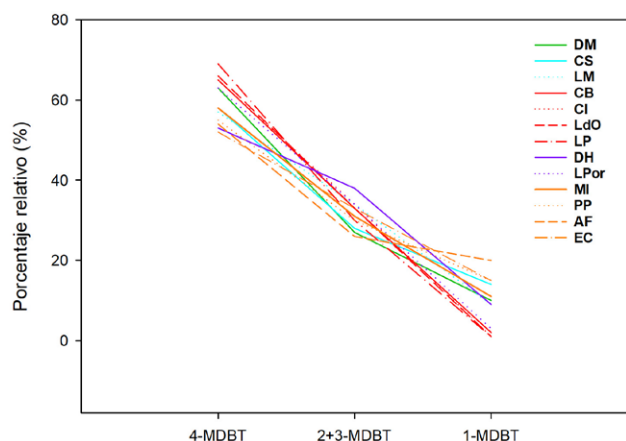


Fig. 7.- Porcentajes de los MeDBTs para cada una de las muestras de crudos estudiadas.

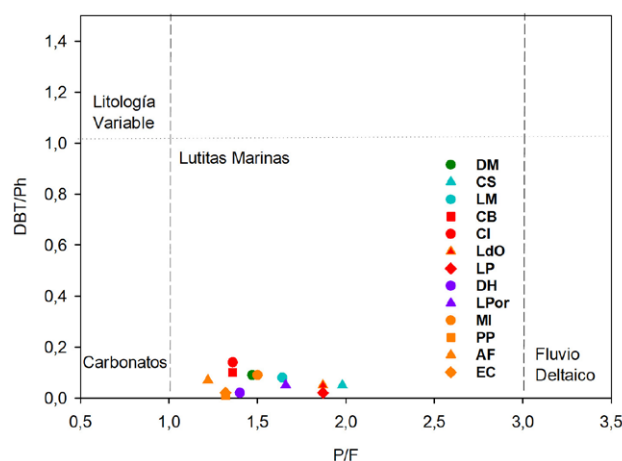


Fig. 8.- Diagrama de representación de DBT/Ph vs P/F para las muestras de crudos estudiadas.

generadoras de estos crudos en base a la distribución de estos hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) (Hughes *et al.*, 1995). El comportamiento de estos compuestos aromáticos azufrados siguió un patrón tipo escalera (Fig. 7), es decir, los porcentajes relativos fueron decreciendo desde el 4-MeDBT al 2+3-MeDBT hasta llegar al 1-MeDBT en todos los casos, característico de una litología siliciclástica (Hughes *et al.*, 1995). En este sentido también se determinó la relación dibenzotiofeno/fenantreno (DBT/Ph) frente a la relación P/F (Tabla 2). Hughes *et al.* (1995) propusieron que el cociente DBT/Ph tiene la capacidad de evaluar la disponibilidad de azufre reducido que se incorpora en la materia orgánica. Además, es un buen indicador de rocas madre carbonáticas cuando la relación es mayor que uno y de rocas madre siliciclásticas si, por el contrario, ese valor es inferior a la unidad, como en el caso de las muestras analizadas. Por otro lado, la relación P/F indica las condiciones oxido-reductoras del ambiente de depósi-

to (Didyk *et al.*, 1978). Los resultados permitieron inferir que la litología tanto de la Fm. Palermo Aike como de la Fm. Margas Verdes (rocas madre) es siliciclástica de tipo lutita marina (Fig. 8). Cabe destacar que la totalidad de los crudos se formaron a partir de materia orgánica que sedimentó en ambientes marinos, en los cuales las condiciones oxido-reductoras fueron subóxicas-disóxicas (Legarreta y Villar, 2011).

Estadística multivariada

Para establecer el grado de agrupamiento de las muestras de crudo se realizó un análisis clúster mediante el empleo del Software Past 4.03 (Fig. 9). Se utilizaron los parámetros geoquímicos presentados en la Tabla 2, cuyos valores fueron sometidos a un preprocesado (*row normalize lenght*). En primera instancia los crudos mostraron una asociación según la ubicación de los yacimientos en los

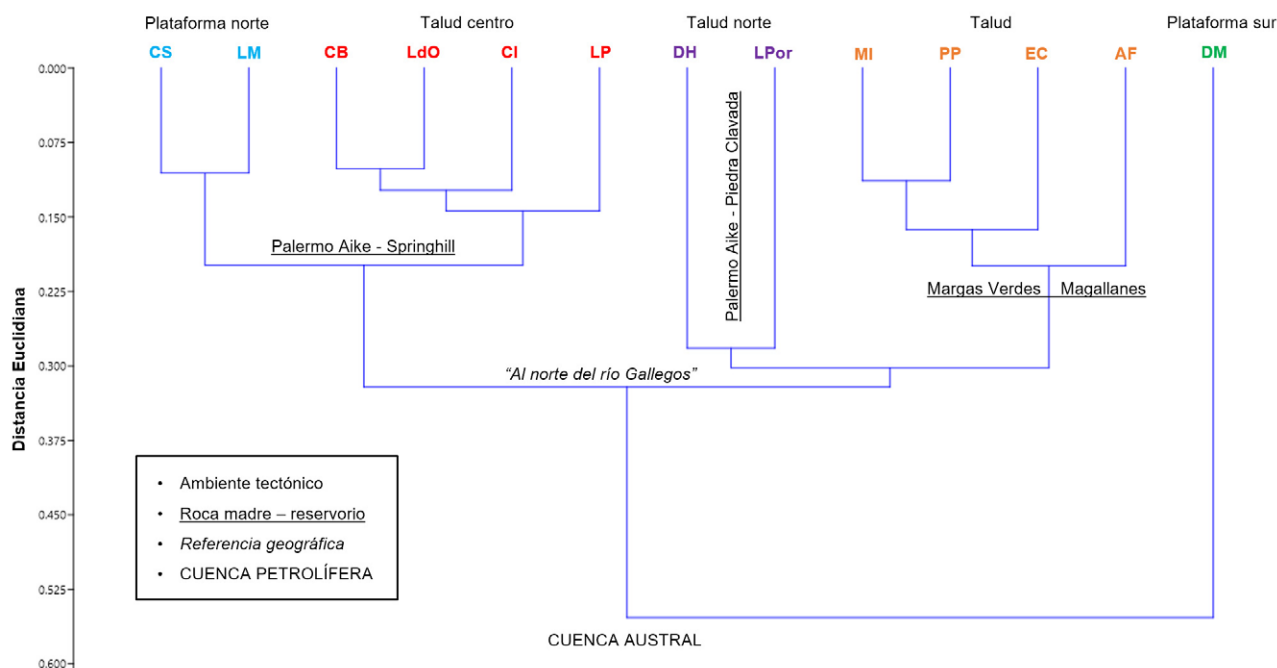


Fig. 9.- Dendrograma de las 13 muestras de crudo provenientes de diferentes yacimientos de la Cuenca Austral.

ambientes tectónicos de la cuenca: CS y LM (Plataforma norte); CB, LdO, CI y LP (Talud centro); DH y Lpor (Talud norte); MI, PP, EC y AF (Talud); y DM (Plataforma sur). En segundo lugar, cabe destacar que la distribución de los hidrocarburos se relacionó con el sistema petrolero que los produjo. En este sentido las muestras de la plataforma norte y talud centro evidenciaron el mayor grado de asociación, ya que ambos están vinculados a la Fm. Palermo Aike-Fm. Springhill. Por otro lado, los petróleos vinculados a talud norte y talud se caracterizaron por una marcada separación en el dendrograma, los primeros obtenidos de la Fm. Palermo Aike-Fm. Piedra Clavada y los segundos de la Fm. Margas Verdes-Fm. Magallanes Inferior. Por último, la muestra DM correspondiente al yacimiento Del Mosquito mostró las mayores diferencias con relación al resto de hidrocarburos estudiados. Cabe destacar que éste fue el único crudo que se obtuvo al sur del río Gallegos en el ambiente tectónico definido como plataforma.

Discusión

Origen, entorno y rocas generadoras de la materia orgánica

La naturaleza de la materia orgánica y su ambiente de depósito constituyen aspectos claves para descubrir nuevas formaciones, para el análisis de correlación entre petróleo-roca madre y para determinar fuentes de petróleo mixtas (Guo *et al.*, 2020). En este estudio, la fuente de materia orgánica de los crudos y las condiciones redox del entorno de formación se evaluaron a partir de biomarcadores, mediante sus relaciones de diagnóstico (RD) aplicadas a numerosos diagramas (Peters *et al.*, 2005).

Fuente de materia orgánica del petróleo basada en biomarcadores. Antes de interpretar las RD derivadas de los biomarcadores es necesario determinar el grado de biodegradación de los crudos, que provocará cambios en la estructura de estos compuestos y, por lo tanto, afectará a su eficacia. En los cromatogramas asociados al ion $m/z = 85$ no se observó la formación de una mezcla compleja no resuelta (MCNR) en ningún caso, lo cual indica el bajo nivel o la nula biodegradación de los crudos y la validez de los parámetros vinculados a los biomarcadores (Hakimi y Abdullah, 2013). La MCNR o joroba en el cromatograma, es una típica evidencia de biodegradación y este proceso tiene lugar una vez que el crudo se almacena en el yacimiento (López e Infante, 2021). El petróleo de la Cuenca Austral se ha originado en rocas del Cretácico inferior, y no han sido documentados procesos de alteración biológica sobre sus hidrocarburos (Cagnolatti *et al.*, 1996).

La fuente orgánica de todos los crudos estudiados fue de tipo mixta: marina-continental (Tissot y Welte, 1984). Esto se sugiere a partir de las relaciones $P/n-C_{17}$ y $F/n-C_{18}$ representadas en el Diagrama de Shanmugam (Fig. 4) y $P/n-C_{17}$ en función de P/F (Fig. 5). Estos resultados ya han sido reportados en la Cuenca Austral, ya que estudios realizados sobre crudos extraídos de la Fm. Springhill también manifestaron esa naturaleza del querógeno (Rodríguez *et al.*, 2008; Tomas y Acuña, 2021). Por otra parte, trabajos

previos realizados por Villar y Arbe (1993) manifestaron que los crudos extraídos de la Fm. Magallanes Inferior y los extractos de roca madre de la Fm. Margas Verdes eran querógeno tipo II/III (mixto). Estos resultados fueron inferidos según las observaciones microscópicas que se asociaron a un material algal-amorfo con una mezcla terrígena menor y a las huellas dactilares de los biomarcadores (similares a los fragmentogramas obtenidos). En este sentido, mediante un análisis de pirólisis Rock-Eval para las rocas, validaron la presencia de kerógeno tipo II/III maduro. Además, definieron a la Fm. Margas Verdes como la roca generadora de los crudos extraídos de la Fm. Magallanes Inferior (Cagnolatti y Miller, 2002).

Condiciones redox en el entorno de formación del petróleo y litología de las rocas madre determinada por biomarcadores. Los isómeros 1, 2 + 3 y 4-Metildibenzotiofeno (MeDBT) aportan información sobre la litología de la roca madre (Killops y Killops, 2005). El patrón tipo escalera de los porcentajes relativos de estos isómeros del MeDBT permitió proponer que la naturaleza de las rocas generadoras es siliciclástica (Fig. 7). Esto se correlaciona con la bibliografía referida, por un lado, a la Fm. Margas Verdes, la cual se describe como una roca fuente constituida por lutitas y margas marinas (Rodríguez *et al.*, 2008). Por otro lado, las rocas de la Fm. Palermo Aike son lutitas negras marinas que están en contacto directo con los reservorios areniscosos de la Fm. Springhill (Rodríguez *et al.*, 2008).

Acerca de la relación dibenzotiofeno/fenantreno (DBT/Ph) en función de pristano/fitano (P/F), la misma es utilizada como indicador del ambiente de depósito de rocas sedimentarias (Hughes *et al.*, 1995). Las muestras estudiadas para la Cuenca Austral se ubicaron dentro de la zona inferior intermedia en el diagrama de la Fig. 8. Esto sugiere que las condiciones de sedimentación se asociaron a un paleoambiente de lutitas marinas, depositadas en condiciones de baja oxigenación dada por valores de P/F inferiores a 2. En un estudio llevado a cabo sobre crudos extraídos del yacimiento Del Mosquito pertenecientes a la Fm. Springhill de la Cuenca Austral se obtuvieron resultados semejantes que se asocian a condiciones de depósito marinas y subóxicas (Tomas *et al.*, 2020). Además, Pittion y Goudaia (1992) propusieron un modelo sedimentario en el cual las lutitas marinas de la Fm. Palermo Aike (roca madre) se depositaron con una capa de agua con baja presencia de oxígeno, ya que en ese tiempo, el depocentro Austral todavía representaba un caso bastante severo de ambiente deposicional circundado por tierra, lo cual tiene parecido con la vía de mar occidental cretácica de los Estados Unidos. En ese ambiente de acumulación disódico la materia orgánica logró preservarse y permitió a esta secuencia sedimentaria desarrollar el potencial inicial para generar petróleo (Uliana *et al.*, 1999). En la misma línea, Rodríguez *et al.* (2008) también propusieron que la sedimentación de Fm. Palermo Aike se produjo en condiciones disódicas a anódicas. En lo que respecta a la Fm. Margas Verdes, la misma se describió como una serie que oscila entre 200-300 y más de 1000 m de espesor, compuesta por biomicroritas zeolíticas, lutitas y arcilitas con chert o con zeolitas y bandas de glauconitas

(Uliana *et al.*, 1999). Dentro de sus estratos albianos, el intervalo querógeno refleja un evento de estancamiento que rompió con las condiciones que prevalecieron después del prolongado interludio anóxico del Jurásico Tardío-Neocomiano.

Análisis de conglomerados

En la Cuenca Austral se han podido establecer correlaciones que permiten reconocer, de forma general, la relación entre las rocas madre y los hidrocarburos descubiertos. Sin embargo, frecuentemente las correlaciones presentan cierto grado de incertidumbre, dada la similitud entre las secciones generadoras: Fm. Palermo Aike, Fm. Margas Verdes, y equivalentes laterales (Rodríguez *et al.*, 2008). El análisis de conglomerados permitió visualizar una marcada distribución de los crudos por niveles, que en primera instancia respondió al ambiente tectónico y a la profundidad de punzado de la cual fueron extraídos (Fig. 9). Esto se asocia con los entornos geológicos contenidos que presentan estos depósitos petrolíferos y que generalmente permiten preservar la composición química de los hidrocarburos (Peters *et al.*, 2005). Además, una mayor profundidad respecto de la superficie viene acompañada por incrementos de la temperatura, de acuerdo con el gradiente térmico de la cuenca, es decir, este calor promueve una mayor madurez térmica sobre los petróleos localizados en regiones más profundas (Hardebol *et al.*, 2009).

Dentro de una cuenca, los sistemas petroleros representan el punto más diferencial al momento de contrastar crudos que provengan de ellos, ya que representan un conjunto de elementos geológicos y procesos físico-químicos relacionados que interactúan en sincronía entre sí, para formar yacimientos (Cunningham y Mann, 2007). Partiendo de esta premisa es razonable entender por qué el análisis clúster separa las muestras en tres grandes familias. La primera de ellas está integrada por los crudos de la plataforma norte y talud centro que tienen como roca madre a la Fm. Springhill y como unidad reservorio a la Fm. Palermo Aike. El segundo y tercer grupo considera a los hidrocarburos de las zonas talud norte y talud vinculados a los sistemas de la Fm. Palermo Aike-Fm. Piedra Clavada y Fm. Margas Verdes-Fm. Magallanes Inferior, respectivamente. Las correlaciones entre la Fm. Palermo Aike y los hidrocarburos de la Fm. Springhill han sido determinadas principalmente en la zona intermedia (talud). En la zona sur han sido publicadas en Pittion y Gouadain (1992) y Pittion y Arbe (1999). Datos inéditos de petróleos de Fm. Springhill procedentes de pozos *onshore* del norte de la zona intermedia sugieren la correlación con rocas generadoras marinas equivalentes a la Fm. Palermo Aike (Rodríguez *et al.*, 2008). Por otro lado, algunos petróleos de la Fm. Magallanes Inferior de la zona intermedia han sido correlacionados con la Fm. Margas Verdes como, por ejemplo, aquellos provenientes del yacimiento Puesto Peter (Villar y Arbe, 1993). Además, según Robbiano y Arbe (1996), petróleos del yacimiento Maria Inés (Fm. Magallanes Inferior) también son correlacionables con la Fm. Margas Verdes. Sin embargo, estudios geo-

químicos recientes realizados sobre muestras de crudos de diferentes reservorios de la Fm. Magallanes y de la Fm. Springhill, evidencian que estos tienen similitudes y diferencias. En varios casos es difícil determinar si éstas se deben al aporte de distintas rocas generadoras o a otros factores como variaciones de las facies generadoras, diferencias de madurez térmica, procesos de alteración en el reservorio, cambios y aportes menores producidos durante la migración y/o problemas de muestreo (Rodríguez *et al.*, 2008). Finalmente, Cevallos *et al.* (2018) han correlacionado los hidrocarburos de los yacimientos Dos Hermanos (DH) y La Porfiada (Lpor) de la Fm. Piedra Clavada con su roca madre, la Fm. Palermo Aike.

Ubicado al sur del río Gallegos, en el ambiente tectónico definido como plataforma sur, el único petróleo que se separó notoriamente del resto ha sido el definido como DM, proveniente del yacimiento Del Mosquito. Tomas *et al.* (2020) estudiaron en detalle numerosos crudos de diversos pozos de este yacimiento, los cuales se caracterizaron por una importante presencia y abundancia de biomarcadores, lo cual, como se ha expuesto anteriormente, no es común en los hidrocarburos de la Cuenca Austral. Resulta interesante añadir que una de las muestras presentaba un pronunciado levantamiento de la línea de base que derivó en una MCNR, un claro indicio de paleobiodegradación (Tomas, 2023). Los procesos de alteración biológica no han sido documentados en la Cuenca Austral, pero sí han sido una constante en la historia de generación y acumulación de petróleos en la Cuenca del Golfo San Jorge (Uliana *et al.*, 1999). Debido a esta composición química particular, tiene sentido observar notables diferencias para DM, ya que en el dendrograma queda apartada de los demás crudos, muestra un patrón de terpanos único visualizado en su fragmentograma correspondiente al ion m/z 191 y en la Tabla 2 presenta valores para los parámetros H_{29} y H_{30} muy altos.

Conclusiones

Los resultados obtenidos a partir de la caracterización del patrón de biomarcadores y sus relaciones de diagnóstico en las muestras estudiadas, permiten sugerir que todos los crudos analizados se generaron a partir de materia orgánica tipo mixta (marina-continental), depositada en condiciones de baja oxigenación. Las formaciones Palermo Aike y Margas Verdes, definidas como las rocas generadoras de los crudos presentes en las unidades reservorio Springhill, Piedra Clavada y Magallanes Inferior, respectivamente, se caracterizaron por una naturaleza siliciclástica de tipo lutita marina.

A partir del análisis clúster, se puede decir que todas las muestras de crudos se separaron por niveles de mayor a menor grado de emparentamiento según los siguientes criterios: ambiente tectónico y profundidad de punzado < roca madre-unidad reservorio < ubicación respecto al río Gallegos. El crudo más distintivo de todos los estudiados pertenece al yacimiento Del Mosquito (DM), en el cual se observó una marcada e importante presencia de terpanos, que estaría relacionado con su entorno geológico y cuyo

comportamiento se ve respaldado por el análisis estadístico multivariado.

Este trabajo aporta información sobre las rocas madre y unidades reservorio de la Cuenca Austral a partir de yacimientos que no habían sido estudiados hasta la fecha. Los resultados comparten similitudes con las escasas publicaciones presentadas sobre estas formaciones vinculadas a algunos de los depósitos hidrocarbúferos tratados en esta investigación. Las conclusiones presentadas en este trabajo ponen de manifiesto la importancia de la geoquímica del petróleo como herramienta de prospección de hidrocarburos en conjunción con otras disciplinas, como la ingeniería del petróleo, la geología y la geofísica.

Agradecimientos y financiación

Los autores agradecen al Ing. Leandro Almonacid por su colaboración en la confección de la cartografía presentada, a la Dra. Katya Reategui y a un revisor anónimo por la evaluación del trabajo. El presente estudio ha sido financiado por el proyecto PI MSUTNSC0007712 (Universidad Tecnológica Nacional-Facultad Regional Santa Cruz) y por la beca doctoral del CONICET (Dr. Germán Javier Tomas).

Contribución de autores/as

Elaboración del trabajo, G.J.T.; metodología, A.J.A.; obtención de datos, G.J.T.; figuras, G.J.T.; investigación/análisis, G.J.T.; revisión del manuscrito, A.J.A.; coordinación, A.J.A.; supervisión, A.J.A.; obtención de financiación, A.J.A.

Referencias

- Aramendia, I., Ramos, M., Geuna, S., Cuitino, J., Ghiglione, M., 2018. A multidisciplinary study of the Lower Cretaceous marine to continental transition in the northern Austral-Magallanes basin and its geodynamic significance. *Journal of South American Earth Sciences*, 86: 54-69. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.06.010>
- Barberón, V., Ronda, G., Leal, P., Sue, C., Ghiglione, M., 2015. Lower Cretaceous provenance in the northern Austral basin of Patagonia from sedimentary petrography. *Journal of South American Earth Sciences*, 64(2), 498-510. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.08.014>
- Belotti, H., Rodríguez, J., Conforto, G., 2014. La Formación Palermo Aike como reservorio no convencional en la Cuenca Austral, Provincia de Santa Cruz, Argentina. IX Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mendoza.
- Cagnolatti, M., Martins, R., Villar, H., 1996. La Formación Lemaire como probable generadora de hidrocarburos en el área Angostura, Provincia de Tierra del Fuego, Argentina. XIII Congreso Geológico Argentino y III Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Mar del Plata, 123-139.
- Cagnolatti, M., Miller, M., 2002. Los reservorios de la Formación Magallanes. En *Rocas Reservorio de las Cuencas Productivas de la Argentina* (M., Schiuma, G., Hinterwimmer, G., Vergani, Eds.). Simposio del V Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Buenos Aires, 91-114.
- Calderón, M., Hervé, F., Fuentes, F., Fosdick, J., Sepúlveda, F., Galaz, G., 2016. Tectonic evolution of Paleozoic and Mesozoic andean metamorphic complexes and the Rocas Verdes ophiolites in southern Patagonia. En *Geodynamic Evolution of the Southernmost Andes* (M.C., Ghiglione, Ed.). Springer, Cham, 7-36. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39727-6_2
- Cevallos, M., Marzano, M., Cagnini, A., Molinari, M., 2018. Los reservorios de la Formación Piedra Clavada (Cretácico Inferior), Cuenca Austral. X Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mendoza.
- Cuitino, J., Varela, A., Ghiglione, M., Richiano, S., Poiré, D., 2019. The Austral-Magallanes Basin (southern Patagonia): asynthesis of its stratigraphy and evolution. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis*, 26: 155-166.
- Cunningham, W., Mann, P., 2007. Tectonics of strike-slip restraining and releasing bends. Geological Society, London, 290: 1-12. <https://doi.org/10.1144/SP290.1>
- Didyk, B., Simoneit, B., Brassell, S., Eglinton, G., 1978. Organic geochemical indicators of palaeoenvironmental conditions of sedimentation. *Nature*, 272: 216-222. <https://doi.org/10.1038/272216a0>
- Diraison, M., Cobbold, P., Gapais, D., Rossello, E., Le Corre, C., 2000. Cenozoic crustal thickening, wrenching and rifting in the foothills of the southernmost Andes. *Tectonophysics*, 316: 91-119. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00255-3](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00255-3)
- Gallardo, R., 2014. Seismic sequence stratigraphy of a foreland unit in the Magallanes-Austral Basin, Dorado Riquelme Block, Chile: implications for deepmarine reservoirs. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis*, 21: 49-64.
- Giacosa, R., Fracchia, D., Heredia, N., 2012. Structure of the Southern Patagonian Andes at 49°S. *Geológica Acta*, 10: 265-282. <https://doi.org/10.1344/105.000001749>
- Guo, R., Zhao, Y., Wang, W., Hu, X., Zhou, X., Hao, L., Ma, X., Ma, D., Li, S., 2020. Application of Rare-Earth Elements and Comparison to Molecular Markers in Oil-Source Correlation of Tight Oil: A Case Study of Chang 7 of the Upper Triassic Yanchang Formation in Longdong Area, Ordos Basin, China. *ACS Omega*, 5: 22140-22156. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c02233>
- Hakimi, M.H., Abdullah, W.H., 2013. Geochemical characteristics of some crude oils from Alif Field in the Marib-Shabowah Basin, and source-related types. *Marine Petroleum Geology*, 45: 304-314. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2013.05.008>
- Hardebol, N., Callot, J., Bertotti, G., Faure, J., 2009. Burial and temperature evolution in thrust belt systems: Sedimentary and thrust sheet loading in the SE Canadian Cordillera. *Tectonics*, 28. <https://doi.org/10.1029/2008TC002335>
- Hughes, W., Holba, A., Dzou, L., 1995. The ratios of dibenzothiophene to phenanthrene and pristane to phytane as indicators of depositional environment and lithology of petroleum source rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 3581-3598. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00225-O](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00225-O)
- Killops, S.D., Killops, V.J., 2005. Introduction to Organic Geochemistry. Second Edition, Blackwell Publishing, UK, 393 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511524868>
- Leal, B., Freitas, M., Bracho, E., Martínez, M., López, L., 2011. Evaluación de la fase estacionaria en la separación SARA de dos crudos pertenecientes a la subcuenca de Barinas, Venezuela. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 34: 203-211.
- Legarreta, L., Villar, H., 2011. Geological and Geochemical Keys of the Potential Shale Resources, Argentina Basins. Unconventional Resources, Basics, Challenges, and Opportunities for New Frontier Plays, Buenos Aires.
- López, L., Infante C., 2021. Cambios en los biomarcadores de la fracción de hidrocarburos saturados en un ensayo

- de biorremediación con un crudo extrapesado. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 37: 119-131. <https://doi.org/10.20937/RICA.53718>
- Moldowan, J., Seifert, W., Gallegos, E., 1985. Relationship between petroleum composition and depositional environment of petroleum source rocks. *AAPG Bulletin*, 69: 1255-1268. <https://doi.org/10.1306/AD462BC8-16F7-11D7-8645000102C1865D>
- Mpodozis, C., Mella, P., Padva, D., 2011. Estratigrafía y megasecuencias sedimentarias en la cuenca Austral-Magallanes, Argentina y Chile. VIII Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mar del Plata, 97-137.
- Peters, K., Walters, C., Moldowan, J., 2005. *The Biomarker Guide. Biomarkers and Isotopes in the Environment and Human History*. Cambridge University Press, Cambridge, 471 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511524868>
- Pittion, J., Arbe, H., 1999. Sistema petrolero de la Cuenca Austral. IV Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, IAPG, Actas I: 239-250.
- Pittion, J., Goudaia, J., 1992. Source-rocks and oil generation in the Austral basin. XIII World Petroleum Congress, Buenos Aires, 2: 113-120.
- Poiré, D., Franzese, J.R., 2010. Mesozoic clastic sequences from a Jurassic rift to a Cretaceous foreland basin, Austral Basin, Patagonia, Argentina. In: del Papa, C & Astini, R (Eds.), *Field Excursion Guidebook*, 18th International Sedimentological Congress, Mendoza, Argentina, FE-C13, pp.1-53.
- Radke, M., Welte, D.H., 1983. The Methylphenanthrene Index (MPI): a maturity parameter based on aromatic hydrocarbons. En: *Advances in Organic Geochemistry 1981*, (M. Bjoroy, C. Albrecht, C. Cornford, Eds). John Wiley and Sons, New York, 504-512.
- Ramos, M., Suárez, R., Boixart, G., Ghiglione, M., Ramos, V., 2019. The structure of the northern Austral Basin: Tectonic inversion of Mesozoic normal faults. *Journal of South American Earth Sciences*, 94: 102197. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.05.013>
- Robbiano, J., Arbe, H., 1996. Cuenca Austral Marina. En *Geología y Recursos Naturales de la Plataforma Continental Argentina* (V., Ramos, M., Turic, Eds.). XIII Congreso Geológico Argentino y III Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Buenos Aires, 343-358.
- Rodríguez, J., Miller, M., Cagnolatti, M., 2008. Sistemas Petroleros de Cuenca Austral, Argentina y Chile. En Simposio: "Sistemas Petroleros de las Cuencas Andinas" (C.E., Cruz, J.F., Rodríguez, J.J., Hechem, H.J., Villar, Eds.). Instituto Argentino del Petróleo y del Gas, Buenos Aires. <https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.266.2>
- Schwarz, E., Veiga, G., Spalletti, L., Massaferró, J., 2011. The transgressive infill of an inherited-valley system: The Springhill Formation (lower Cretaceous) in southern Austral Basin, Argentina. *Marine and Petroleum Geology*, 28: 1218-1241. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2010.11.003>
- Shanmugam, G., 1985. Significance of coniferous rain forests and related organic matter in generating commercial quantities of oil, Gippsland Basin, Australia. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 69: 1241-1254. <https://doi.org/10.1306/AD462BC3-16F7-11D7-8645000102C1865D>
- Stashenko, E., Martínez, J., Robles, M., 2014. Extracción selectiva y detección específica de biomarcadores saturados del petróleo. *Scientia Chromatographica*, 6: 251-268. <https://doi.org/10.4322/sc.2015.010>
- Tissot, B., Welte, D., 1984. *Petroleum formation and occurrence*. Springer-Verlag, Berlín, 666 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-87813-8>
- Tomas, G., 2023. Caracterización y estabilidad ambiental de biomarcadores en petróleos de la Cuenca Austral, Provincia de Santa Cruz. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de la Patagonia Austral, 114 p.
- Tomas, G., Acuña, A., 2021. Comparaciones basadas en biomarcadores de crudos extraídos de la Formación Springhill (Cuenca Austral) y de la Formación Bajo Barreal (Cuenca Golfo San Jorge), Argentina. *Estudios Geológicos*, 78: e143. <https://doi.org/10.3989/egol.44405.606>
- Tomas, G., Acuña, A., 2023. Estudio de biomarcadores del petróleo a partir de la meteorización de un crudo en agua de mar. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 39: 71-84. <https://doi.org/10.20937/rica.54799>
- Tomas, G., Vargas, W., Acuña, A., 2020. Evaluación geoquímica por biomarcadores del yacimiento del Mosquito de la Cuenca Austral de la Patagonia Argentina. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 33: 31-40.
- Uliana, M.A., Legarreta, L., Laffitte, G., Villar, H., 1999. Estratigrafía y Geoquímica de las facies generadoras de hidrocarburos en las cuencas petrolíferas de Argentina. IV Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, IAPG, Actas I: 1-61.
- Villar, H., Arbe, H., 1993. Oil generation in the Esperanza area, Austral Basin, Argentina (resumen). En *Third Latin American Congress on Organic Geochemistry* (M., Mello, L., Trindade, Eds). Manaus, Brasil, 150-153.
- Zerfass, H., Ramos, V., Ghiglione, M., Naipauer, M., Belotti, H., Carmo, I., 2017. Folding, thrusting and development of push-up structures during the Miocene tectonic inversion of the Austral basin, southern patagonian Andes (50 °S). *Tectonophysics*, 699: 102-120. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.01.010>

MANUSCRITO RECIBIDO: 06-03-2024

REVISIÓN RECIBIDA: 22-05-2024

ACEPTACIÓN DEL MANUSCRITO REVISADO: 05-06-2024



IMPACTO DE LOS USOS DEL SUELO Y OTROS PARÁMETROS SOBRE LA PRESENCIA DE MICROPLÁSTICOS EN EL SUELO Y EN EL AGUA SUBTERRÁNEA: UNA REVISIÓN CRÍTICA

Impact of land use and other parameters on the presence of microplastics in soil and groundwater: a critical review

Rodrigo Andrés-Bercianos¹, Virtudes Martínez-Hernández² y Raffaella Meffe²

¹ Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC), c/ Ríos Rosas, 23, 28003 Madrid, España. r.andres@igme.es

² Instituto IMDEA Agua, Avda. Punto Com, 2, 28805 Alcalá de Henares, Madrid, España.

virtudes.martinez@imdea.org, raffaella.meffe@imdea.org

Resumen: Los microplásticos (MP) constituyen una de las formas de contaminación más omnipresentes en nuestro planeta. Pese a ello, en comparación con los ecosistemas marinos, lagos o ríos, destaca la escasez de estudios que han tratado sobre su presencia en el suelo y en las aguas subterráneas. Con el objetivo de evaluar el impacto de los usos del suelo y otros parámetros sobre la presencia de MP en ambos medios, se han extraído, de la revisión de 41 publicaciones, 56 casos de estudio asociados a suelos y 7 casos a aguas subterráneas. En conjunto, se pone de manifiesto la necesidad de establecer una metodología estandarizada, tanto analítica como de muestreo, con el fin de poder realizar comparaciones rigurosas. Por otra parte, queda patente en la mayor parte de las publicaciones revisadas una relación entre las fuentes de contaminación (puntuales y/o difusas) asociadas a los usos del suelo y la presencia de MP, en base a su cantidad, composición química predominante, color o forma característica según el uso del suelo. Por ello, es fundamental seguir investigando sobre la presencia de MP en suelos asociados a la totalidad de usos, así como diversificar geográficamente su estudio y enfatizarlo en las aguas subterráneas.

Palabras clave: microplásticos, suelos, usos del suelo, agua subterránea, revisión crítica.

Abstract: Microplastics (MP) are one of the most ubiquitous forms of pollution on our planet. However, compared to marine ecosystems, lakes or rivers, few studies have studied their occurrence in soil and groundwater. To evaluate the impact of land use and other parameters on the presence of MP in both media, 56 cases of study associated with soils and 7 with groundwater have been extracted from the review of 41 publications. Overall, the need to establish a standardized methodology, during both the analysis and sampling, has been identified to make rigorous comparisons. On the other hand, a relationship between the pollution sources (point and/or diffuse) associated with land use and the presence of MP is evident in most of the publications reviewed, based on its quantity, predominant chemical composition, color or characteristic shape according to land use. For this reason, it is essential to continue studying the presence of MP in soils associated with all uses, as well as diversifying geographically its study and emphasizing it in groundwater.

Keywords: microplastics, soils, land use, groundwater, critical review.

Andrés-Bercianos, R., Martínez-Hernández, V., Meffe, R., 2024. Impacto de los usos del suelo y otros parámetros sobre la presencia de microplásticos en el suelo y en el agua subterránea: una revisión crítica. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 37 (1): 56-75.

Introducción, justificación y objetivos

Pese a que existe cierta controversia con respecto al rango de tamaño asociado a los desechos plásticos que abarca el término “microplástico-MP” (Hartmann *et al.*, 2019) –popularizado por Thompson *et al.* (2004)–, este se ha adoptado para describir a pequeñas partículas de plástico, generalmente menores de 5 mm de diámetro (Arthur *et al.*, 2009; GESAMP, 2015). Así mismo, las partículas plásticas con un tamaño comprendido entre 5 mm y 0,001 mm se pueden subdividir en dos tipos (Ripken *et al.*, 2021): MP grandes (entre 5 y 1 mm) y MP pequeños (entre 1 y 0,001 mm). No obstante, aquellas partículas que presentan un tamaño inferior a 0,001 mm se denominan nanoplásticos (Gigault *et al.*, 2018). En contraposición, los desechos plásticos que presentan un tamaño inmediatamente superior al de los MP, es decir, entre 5 mm y 2,5 cm, se denominan mesoplásticos, clasificándose como macroplásticos a los que poseen un tamaño superior a 2,5 cm (Blettler *et al.*, 2017; Jeyasanta *et al.*, 2020). Con respecto a su origen, los MP se pueden clasificar en dos tipos: primarios y secundarios (GESAMP, 2015). Los MP primarios son aquellos liberados al medio ambiente directamente, es decir, ya en forma de diminutas partículas como, por ejemplo, microesferas exfoliantes en cosméticos o partículas sintéticas en abrasivos industriales (GESAMP, 2016). Los MP secundarios se producen como resultado de la degradación, erosión o fragmentación de desechos plásticos más grandes, pudiendo intervenir en ello la acción del viento, la escorrentía, la radiación ultravioleta o la actividad microbiana (Klein *et al.*, 2018; Meixener *et al.*, 2020). Ejemplos claros de esta tipología son los que proceden de la fragmentación de acolchados agrícolas, los MP generados a partir de la abrasión de neumáticos o las fibras sintéticas liberadas durante el lavado de textiles (GESAMP, 2016). En lo relativo a su forma, los MP se pueden clasificar en diversos tipos, siendo los siguientes los más comunes (Zhou *et al.*, 2018): fibras (aspecto alargado), fragmentos (piezas duras e irregulares), películas (suelen ser delgadas, suaves y blandas), gránulos (suelen ser duros, regulares y con forma de esfera, disco, ovoide o cilíndrica), espumas (livianas) y esponjas (livianas y porosas).

En 1997, Charles Moore, el hombre que navegó a través de la gran mancha de basura del Pacífico, afirmó que “la huella de plástico de la humanidad es probablemente más peligrosa que su huella de carbono (Cho, 2011)”. En este sentido, se estima que en el año 2019 flotaban en el océano entre 82 y 358 billones de partículas de plástico –la mayoría de ellas MP–, sumando un peso de entre 1,1 y 4,9 millones de toneladas de plástico (Eriksen *et al.*, 2023). Solo en 2021 la producción de plásticos a escala mundial aumentó aproximadamente un 4% con respecto al año anterior, alcanzando los 390,7 millones de toneladas (Plastics Europe, 2022). Como consecuencia, la

presencia de residuos plásticos en los océanos se espera que aumente hasta 2,6 veces para el año 2040 (Lau *et al.*, 2020). Sin embargo, anualmente se calcula que se liberan entre 4 y 23 veces más MP a la tierra que al océano (Horton *et al.*, 2017). En este sentido, la Agencia Europea de Productos Químicos (Environmental Chemical Agency - ECHA) también destacó que es más probable que los MP se acumulen en el suelo y que una proporción menor se libere directamente a ríos, lagos y mares (ECHA, 2018). Así, aproximadamente, el 52% de la pérdida de MP parece que queda atrapada en los suelos (Boucher y Friot, 2017) y, en esta línea, Nizzetto *et al.* (2016) estimaron que el suelo puede representar una reserva ambiental de MP más grande que el propio océano. De hecho, a pesar de que nuestra época cronoestratigráfica actual es el Holoceno (Cohen *et al.*, 2013: actualizado en 2023), el plástico ya se ha sugerido como un indicador estratigráfico de una nueva época geológica: el Antropoceno, debido a su presunta omnipresencia en los suelos (Zalasiewicz *et al.*, 2016). Todo ello está motivado por la existencia de numerosas fuentes de MP en el suelo, asociadas a los usos en cada emplazamiento, siendo algunas de ellas los acolchados plásticos, la aplicación de lodos de depuradoras, residuos plásticos de invernaderos, el uso de fertilizantes encapsulados, el riego con aguas residuales tratadas, los desechos plásticos domésticos, las instalaciones industriales, los vertederos de residuos sólidos mal gestionados, el depósito atmosférico, la escorrentía o el polvo fruto del desgaste de neumáticos (Yu *et al.*, 2022). Los seres vivos pueden ser importantes agentes de transporte, como en el caso de las lombrices de tierra, que movilizan las partículas plásticas por adhesión (Rillig *et al.*, 2017). Generalmente los MP más pequeños (< 10 micras), una vez en el suelo, también pueden infiltrarse con el agua a capas más profundas (Yu y Flury, 2021). De hecho, hay trabajos que han detectado la presencia de MP en aguas subterráneas (Ganesan *et al.*, 2019; Panno *et al.*, 2019), habiéndose ya planteando previamente a su detección la posibilidad, bajo ciertos supuestos, de una transferencia a este medio desde los suelos (Bläsing y Amelung, 2018; Scheurer y Bigalke, 2018). La presencia de MP en el suelo y su potencial infiltración hacia el agua subterránea pueden implicar riesgos para la protección de los ecosistemas y la salud humana, ante una exposición a estas partículas por ingestión, inhalación y contacto dérmico (Samandra *et al.*, 2022).

Por otra parte, las implicaciones de la presencia de MP en el suelo van más allá de hallar estas partículas. Hay que destacar que los MP, al tener un área de superficie específica grande y una fuerte hidrofobicidad, pueden adsorber y transportar sustancias orgánicas e inorgánicas peligrosas que son extrínsecas del propio plástico como, por ejemplo, contaminantes orgánicos persistentes o metales pesados (Uwamungu *et al.*, 2022). Del mismo modo, el uso de adi-

tivos en el proceso de polimerización del plástico implica que sustancias intrínsecas a la partícula (plastificantes o colorantes) puedan liberarse en el entorno circundante (Li *et al.*, 2020; Uwamungu *et al.*, 2022) e infiltrarse hasta alcanzar las masas de agua subterránea. Todo ello expande la exposición a sustancias contaminantes potencialmente peligrosas para la salud humana y la protección de los ecosistemas.

En consecuencia, dado que “la contaminación terrestre y la contaminación del suelo por grandes elementos de plástico y sus fragmentos o microplásticos derivados pueden ser significativas y ese plástico puede filtrarse al medio marino (DOUE, 2019)”, el Parlamento Europeo adoptó en 2019 una serie de medidas para el cumplimiento de unos objetivos en 2030. Entre otras, con objeto de reducir el impacto de determinados productos plásticos en el medio ambiente, se adoptó la prohibición de venta de plásticos de un solo uso, estableciendo como fecha límite para su entrada en vigor el 3 de julio de 2021 (DOUE, 2019). En lo que respecta a España, en abril de 2022 entró en vigor la Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular (BOE, 2022), estableciendo en su título V una serie de medidas encaminadas a la reducción del impacto de determinados productos de plástico en el medio ambiente. Entre otras, ratifica la prohibición de venta de cualquier producto de plástico fabricado con plástico oxodegradable, así como las microesferas de plástico de menos de 5 mm añadidas intencionadamente. Tal y como se indica en la misma, “es la primera vez que una ley estatal en materia de residuos dedica un título entero a esta fracción de residuos (BOE, 2022)”, incluyendo también una serie de regímenes de responsabilidad ampliada del productor, medidas de concienciación, requisitos de diseño para recipientes de plástico para bebidas y de recogida separada de botellas de plástico.

Sin embargo, a pesar de su anteriormente argumentada importancia, destaca la escasez de estudios que hayan abordado la presencia de MP en el suelo y en las aguas subterráneas en comparación con los ecosistemas marinos, estuarios, lagos o ríos (Gündoğdu *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2023). Por ello, a partir de la recopilación de la información existente, este trabajo tiene como objetivos: i) evaluar el impacto de los usos del suelo y otros parámetros sobre la presencia de MP en el suelo y en el agua subterránea; ii) identificar las lagunas de información para guiar investigaciones futuras, y iii) analizar la metodología utilizada en los trabajos revisados en pro de la estandarización de los estudios.

Material y métodos

La recopilación de publicaciones y artículos científicos que abordan la temática se llevó a cabo utilizando bases de datos científicas de editoriales como Elsevier, Springer o MDPI (Multidisciplinary Digital Publishing Institute). Para ello se introdujeron una serie de palabras clave (*microplastics*, *soils*, *groundwater*, *critical review* y *land use*) en los motores de búsqueda académica ScienceDirect y Google. Asimismo, también se identificaron numerosos trabajos a partir de las citas presentes en las publicacio-

nes seleccionadas en primera instancia. De cada publicación revisada se extrajeron los datos, asociados a: i) la localización del estudio; ii) el uso del suelo y las fuentes potenciales de MP; iii) las propiedades físicas y/o químicas tanto del suelo como de las aguas subterráneas; iv) el procedimiento de muestreo (método, número de muestras, cantidad de muestra, profundidad y almacenamiento); v) el método analítico (extracción de MP, tratamiento de la muestra, identificación y cuantificación de MP); vi) el control de calidad para evitar la contaminación cruzada (ropa, muestras como blanco y control); vii) las características de los MP presentes (concentración o número, tipo, forma, tamaño y color), y viii) las principales conclusiones de cada estudio.

Se revisaron un total de 41 publicaciones de las que se extrajo la información anteriormente citada. Algunas de las publicaciones revisadas incluyen artículos de revisión que se utilizaron para cotejar la información extraída en primera instancia. Cuando se produjeron datos incoherentes para un mismo artículo, se llevó a cabo una verificación adicional en la publicación original.

Una vez extraídos todos los datos, la información se agrupó y procesó. En primer lugar, las publicaciones se agruparon en función del compartimento ambiental de muestreo, es decir, suelos y/o aguas subterráneas. De las 41 publicaciones revisadas, 34 abordan la presencia de MP en suelos (publicadas entre 2016 y 2022), 6 en aguas subterráneas (publicadas entre 2019 y 2022) y 1 en ambos medios (publicada en 2022). Dado que uno de los objetivos principales era determinar el impacto de los usos del suelo en la presencia de MP, se extrajeron 56 casos de estudio de las 35 publicaciones que analizan la presencia de MP en suelos, al existir publicaciones que describen la presencia de MP en suelos con más de una tipología de uso. En consecuencia, la información extraída se agrupó considerando 8 usos diferentes del suelo: desértico, ribereño (llanura aluvial), forestal, vía de comunicación, urbano, industrial, pastizal y agrícola. En los suelos agrícolas, dado que aglutinaban un importante número de casos, se realizó una subdivisión basada en las potenciales fuentes de entrada de plásticos asociadas a las prácticas agrícolas. Debido al limitado número de trabajos disponibles que evalúan los MP en aguas subterráneas y a la complejidad que implica realizar estudios hidrogeológicos detallados para poder saber el origen de los MP en las aguas subterráneas, no se realizó la agrupación de las publicaciones en función de los usos del suelo asociados al área de recarga de cada acuífero. Ya durante el procesamiento de los datos se homogeneizaron unidades, como el rango de tamaño de los MP (en mm) o la cantidad de MP en suelos (en mg/kg –miligramos de MP por kilogramo de suelo– o en MP/kg –número de MP por kilogramo de suelo–) y en aguas subterráneas (en partículas/l). Asimismo, para cada caso, sólo se extrajo la tipología predominante, es decir: color, forma, composición química o rango de tamaño. Finalmente, los datos se compilaron en una hoja de cálculo utilizando Microsoft Excel, para realizar gráficos o diagramas que facilitasen el análisis y la interpretación de la información.

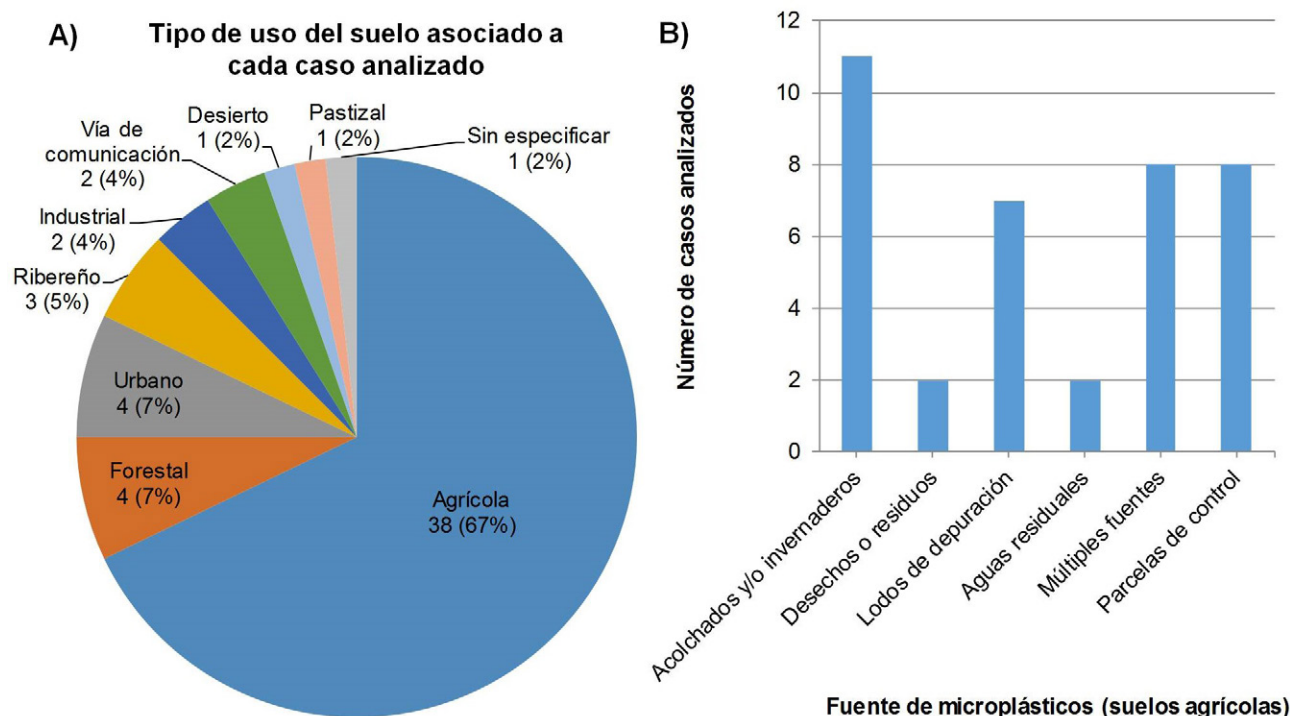


Fig. 1.- A) Número de casos analizados en suelos y porcentaje asociado, en función de cada tipología de uso del suelo. B) Número de casos analizados en suelos agrícolas en función de la potencial fuente de entrada de MP.

Resultados

Impacto de los usos del suelo sobre la presencia de MP en el suelo

Algo más de dos tercios de los 56 casos extraídos (Fig. 1A) que abordan la presencia de MP en suelos en función de la tipología de uso del suelo (Tabla 1) corresponden a estudios efectuados en suelos agrícolas (38 casos). Le siguen los de uso urbano y forestal (4 casos cada tipología), ribereño (3 casos), asociados a vías de comunicación y a uso industrial (2 casos cada uno) y, finalmente, los de uso desértico y de pastizal (1 caso cada tipología). Así mismo, también se incluye la única publicación revisada (Meixner *et al.*, 2020) en la que no se hace referencia al uso del suelo en el que se evaluó la presencia de MP. Dentro de la subdivisión realizada en los suelos agrícolas en función de la fuente de entrada de MP (Fig. 1B), se abordan casos asociados a: i) suelos con presencia de acolchado y/o invernaderos (11 casos); ii) múltiples fuentes de contaminación de MP –por ejemplo: acolchado, lodos y/o aguas residuales– (8 casos); iii) parcelas de control –es decir, sin aplicación plástica directa– (8 casos); iv) abonados con lodos de depuración (7 casos); v) con presencia de residuos o desechos superficiales (2 casos), y vi) regados con aguas residuales (2 casos).

Las 35 publicaciones revisadas abarcan un total de 17 países (Fig. 2). Algo más de un tercio del total han sido realizadas en suelos de China y prácticamente otro tercio se encuentran repartidas casi por igual entre Alemania, España e Irán. El tercio restante corresponde a estudios realizados en suelos de otros 13 países pertenecientes a Asia,

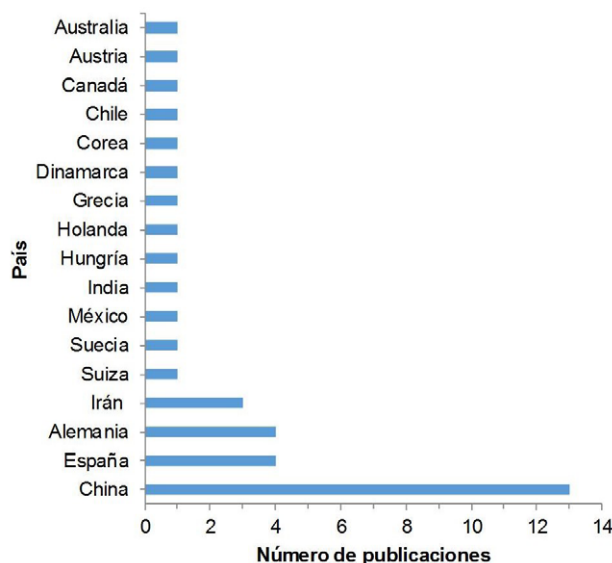


Fig. 2.- Número de publicaciones revisadas asociadas a cada país a partir de las cuales se evaluó la presencia de MP en suelos.

América, Oceanía y Europa.

Los 56 casos de estudio extraídos en función de la tipología de uso del suelo incluyen un total de 511 sitios de muestreo. Los que abordan la presencia de MP en suelos de uso agrícola suponen algo más de dos tercios (349) del total de sitios de muestreo (Fig. 3). No obstante, un sitio de muestreo puede llevar asociada la toma de muestras en más de un punto de muestreo. En ninguna de las publicaciones se ha cuantificado la presencia de MP a una profundidad superior a 10 cm en suelos de uso forestal, urbano, industrial y de pastizal, ni superior a 5 cm en suelos desérticos o

asociados a vías de comunicación (Fig. 3). La profundidad máxima de muestreo en suelos agrícolas está comprendida entre los 15 cm (relativa a los regados con aguas residuales) y los 160 cm (con presencia de acolchado plástico y/o invernaderos). La tipología de uso del suelo perteneciente a llanura aluvial (suelo ribereño) es en la que se ha alcanzado una máxima profundidad de muestreo de MP, de hasta 200 cm. No obstante, en 4 de las publicaciones revisadas no se hace referencia a la profundidad de muestreo considerada (lo que representa un 11,4% del total).

La tipología del suelo y/o a las propiedades físicas y/o químicas del mismo, únicamente se contemplan en 16 de las 35 publicaciones revisadas (Tabla 2). Más concretamente, en 15 de las publicaciones se especifica la tipología de suelo, asociado a su textura y/o estructura, y únicamente en 6

se hace mención a las propiedades físicas y/o químicas de los suelos en los cuales se analizó la presencia de MP. Los suelos asociados al uso como vías de comunicación y los agrícolas con presencia de residuos o desechos superficiales son los únicos en los cuáles no se evaluó la tipología del suelo en ninguna publicación. En ninguna de las publicaciones asociadas a suelos de uso desértico, vías de comunicación, industrial, ribereño (llanura aluvial), agrícolas (regados con aguas residuales, con presencia de residuos o desechos superficiales y de parcelas de control) y en la publicación en la que no se especificaba el uso del suelo, se analizaron las propiedades físicas y/o químicas del suelo. No obstante, en las publicaciones en las que sí se tuvieron en cuenta estos parámetros, la humedad del suelo (W) fue el más analizado, así como el carbono orgánico total (COT) y la materia orgánica

Uso del suelo	Publicación	Localización	Sitios	Prof. muestreo	Herramienta muestreo	Almacenamiento muestra	Contenido MP \bar{x} y/o (rango)	Técnica identific.	Tamaño predom.	Color predom.	Composición predom.	Forma predom.
Desértico	Abbasi <i>et al.</i> (2021)	Lut y Kavir (Irán)	21	0-5 cm.	Llana metálica	Frasco de vidrio	20 MP/kg (0-83 MP/kg)	μ -Raman	0,1-1 mm.	Negro-gris	PET	Fibra
Industrial	Fuller y Gautam (2016)	Sidney (Australia)	17	-	-	-	7764,7 mg/kg (300-67.500 mg/kg)	FTIR	< 1 mm	-	PVC	-
	Du <i>et al.</i> (2020)	Boading (China)	5	0-10 cm	Pala acero inoxidable	Papel aluminio	-	TOF-SIMS	< 0,02 mm	-	PA6 (nailon) y PP	-
Vía de comunicación	Dierkes <i>et al.</i> (2019)	Colonia (Alemania)	2	-	Pala acero inoxidable	Recipientes vidrio / aluminio	914,95±62,55 mg/kg	Pirólisis-GC/MS	-	-	PE	-
	Choi <i>et al.</i> (2021)	Yeoju (Corea del Sur)	19	0-5 cm	Barrena manual	Recipiente acero inoxidable	1108 MP/kg (Máx.: 3000 MP/kg)	FTIR	< 1 mm	Negro y amarillo	SBR	Fragmento
Pastizal	Rezaei <i>et al.</i> (2019)	Fars (Irán)	5	0-10 cm	-	-	0,18 mg/kg (0-0,68 mg/kg) 37,8 MP/kg (0-100 MP/kg)	Visual	< 0,1 mm	-	-	-
Urbano	Han <i>et al.</i> (2019)	Tianjin (China)	1	-	-	-	95 MP/kg	ATR-FTIR	0,1-3,2 mm	Blanco y verde	PP	Fragmento
	Zhou <i>et al.</i> (2019)	Wuhan (China)	7	0-5 cm	Pala de acero	Caja de aluminio	120.000 MP/kg (22.000-200.000 MP/kg)	Raman	0,01-0,1 mm	-	PE	Fragmento
	Du <i>et al.</i> (2020)	Boading (China)	2	0-10 cm	Pala acero inoxidable	Papel aluminio	-	TOF-SIMS	< 0,02 mm	-	PET	-
	Choi <i>et al.</i> (2021)	Yeoju (Corea del Sur)	5	0-5 cm	Barrena manual	Recipiente acero inoxidable	500 MP/kg	FTIR	< 1 mm	Negro	SBR	Fragmento
Forestal	Zhang y Liu (2018)	Kunming (China)	5	0-10 cm	Pala angosta	-	14.360 MP/kg (8180-18.100 MP/kg)	Visual	0,05-0,25 mm	-	-	Fibra
	Zhou <i>et al.</i> (2019)	Wuhan (China)	7	0-5 cm	Pala de acero	Caja de aluminio	410.000 MP/kg (96.000-690.000 MP/kg)	Raman	0,01-0,1 mm	-	PE	Fragmento
	Du <i>et al.</i> (2020)	Boading (China)	1	0-10 cm	Pala acero inoxidable	Papel aluminio	-	TOF-SIMS	0,02-0,035 mm	-	PET	-
	Choi <i>et al.</i> (2021)	Yeoju (Corea del Sur)	8	0-5 cm	Barrena manual	Recipiente acero inoxidable	160 MP/kg	FTIR	< 1 mm	Amarillo y negro	SIS	Fragmento
Ribereño (Llanura aluvial)	Scheurer y Bigalke (2018)	Suiza	29	0-5 cm	Útil de acero	Caja de aluminio	5 mg/kg (hasta 55,5 mg/kg - 593 MP/kg)	FTIR	0,125-0,5 mm	-	PE	-
	Amrutha y Warrier (2020)	Karnataka (SW India)	5	0-5 cm	Cuchara acero inoxidable	Aluminio (envoltura y recipiente)	5,63 mg/kg (0,59-10,86 mg/kg) / 84,45 MP/kg (26,61-205,06 MP/kg)	ATR-FTIR	1-5 mm	Blanco	PE	Fibras
	Weber y Opp (2020)	Hesse (Alemania)	12	0-200 cm	Perforación núcleo de pilotes	Bolsas de bioplástico de almidón de maíz	1,88 MP/kg (hasta 8,59 MP/kg)	ATR-FTIR	2-5 mm	Blanco	LDPE	Fragmento y película
Uso sin especificar	Meixner <i>et al.</i> (2020)	Austria / Sur de Alemania	11	-	-	-	12.553 MP/kg (2308-25.625 MP/kg)	Visual	0,005-1 mm	-	-	-
Uso del suelo	Publicación	Localización	Sitios	Prof. muestreo	Herramienta muestreo	Almacenamiento muestra	Contenido MP \bar{x} y/o (rango)	Técnica identific.	Tamaño predom.	Color predom.	Composición predom.	Forma predom.
Agrícola (acolchado plástico y/o invernaderos)	Rezaei <i>et al.</i> (2019)	Fars (Irán)	5	0-10 cm	-	-	1,2 mg/kg (0-2,8 mg/kg) 204,6 MP/kg (0-400 MP/kg)	Visual	<0,1 mm	-	-	-
	Ding <i>et al.</i> (2020)	Shanxi (China)	9	0-10 cm	Herramienta de acero	Botella de metal	2131 MP/kg (1430-3410 MP/kg)	FTIR	< 0,49 mm	-	PS-PE-PP-HDPE-PVC-PET	Fibra
	Feng <i>et al.</i> (2020)	Meseta Tibetana (China)	17	0-6 cm	Espátula de acero inoxidable	Bolsas de papel de aluminio	47,94 MP/kg (20-110 MP/kg)	Raman	< 0,1 mm	Transp.	PE	Película
	Huang <i>et al.</i> (2020)	Shihezi (China)	3	0-40 cm	-	Bolsas de aluminio	5 años: 80,3 MP/kg 15 años: 308 MP/kg 24 años: 1075,6 MP/kg	μ -FTIR	-	-	PE	-
	Zhang <i>et al.</i> (2020)	Haerbin (China)	4	0-30 cm	-	-	0,27 mg/kg (0-8,5 mg/kg) 107 MP/kg (0-800 MP/kg)	FTIR	> 0,1 mm	Blanco-transp.	PE	-
	Beriot <i>et al.</i> (2021)	Región de Murcia (España)	6	0-10 cm	-	-	2116 MP/kg	Visual	-	-	-	-
	Choi <i>et al.</i> (2021)	Yeoju (Corea del Sur)	68	0-5 cm	Barrena manual	Recipiente acero inoxidable	664 MP/kg (hasta 3440 MP/kg)	FTIR	< 1 mm	Negro	SBR-PP	Fragmento
	Isari <i>et al.</i> (2021)	Oeste de Grecia	10	0-30 cm	Pala de acero inoxidable	Recipiente aluminio	1 adición/año: 69 MP/kg (40-140 MP/kg) 2 adiciones/año: 301 MP/kg (189-556 MP/kg)	ATR-FTIR	0,5-5 mm	Negro	PE	Films fragment.
	Van Schothorst <i>et al.</i> (2021)	Sureste de España	1	0-30 cm	Barrena manual	-	2242 MP/kg	FTIR	0,1-0,2 mm	-	PE	-
	Rezaei <i>et al.</i> (2022)	Fars (Irán)	1	0-15 cm	Barrena	Papel de aluminio	380 MP/kg (40-830 MP/kg)	Raman	0,1-1 mm	Blanco-transp.	PET-Nailon	Fibra
	Sa'adu y Farsang (2022)	Szeged (SE de Hungría)	2	0-160 cm	Barrena metálica, pala y perforadora de pozos	Papel de aluminio	225 MP/kg (máx. 300 MP/kg a 40-60 cm y a 80-100 cm)	Raman	2-3 mm	-	-	Fibra
Agrícola (residuos o desechos plásticos superficiales)	Beriot <i>et al.</i> (2021)	Región de Murcia (España)	5	Muestras fecales	-	-	997 MP/kg	Visual	-	-	-	-
	Huerta Lwanga <i>et al.</i> (2017)	Península del Yucatán (México)	10	0-20 cm	-	-	870 MP/kg	Visual	< 0,02 mm	-	-	-

Uso del suelo	Publicación	Localización	Sitios	Prof. muestreo	Herramienta muestreo	Almacenamiento muestra	Contenido MP \bar{x} y/o (rango)	Técnica identific.	Tamaño predom.	Color predom.	Composición predom.	Forma predom.
Agrícola (lodos de depuración)	Vollertsen y Hansen (2017)	Jutlandia (Dinamarca)	5	0-15 cm	Pala sembradora	-	6,2 mg/kg (0-16,5 mg/kg) / 82.000 MP/kg (máx. 165.000 MP/kg)	FTIR	0,01-0,13 mm	-	PP	-
	Ljung <i>et al.</i> (2018)	Malmö (Suecia)	2	0-20 cm	Pala	Baldes metálicos	Últimos 36 años: -1 t/ha/año: 0,32 mg/kg -3 t/ha/año: 3,4 mg/kg	ATR-FTIR- μ FTIR	0,01-0,5 mm	-	Poliéster	-
	Corradini <i>et al.</i> (2019)	Región de Santiago (Chile)	30	0-25 cm	Barrena metálica	Bolsas de PP y tras tamizado en frascos de PET	-1 aplicación: 1100 MP/kg / 1,37 mg/kg (0,73-2,18 mg/kg) -2 aplicaciones: 1600 MP/kg / 2,03 mg/kg (1,79-3,16 mg/kg) -3 aplicaciones: 1700 MP/kg / 2,22 mg/kg (0,57-4,56 mg/kg) -4 aplicaciones: 2300 MP/kg / 2,88 mg/kg (1,76-12,9 mg/kg) -5 aplicaciones: 3500 MP/kg / 4,38 mg/kg (1,79-10,3 mg/kg)	Visual	<1 mm	-	-	Fibra
	Crossman <i>et al.</i> (2020)	SE Ontario (Canadá)	3	0-15 cm	Sacatestigos acero inox.	Papel de aluminio	-1 aplic. previa: 102,5 MP/kg -2 aplic. previas: 541 MP/kg	ATR-FTIR	-	-	Poliéster	Fibra
	Van den Berg <i>et al.</i> (2020)	Valencia (España)	11	0-30 cm	Barrena	Bolsas de PP sellables	5190 MP/kg	μ FTIR	0,15-0,25 mm	-	PP	Fragmento
	Van Schothorst <i>et al.</i> (2021)	Holanda	2	0-30 cm	Barrena manual	-	888 MP/kg	FTIR	0,1-0,3 mm	-	PE	-
	Schell <i>et al.</i> (2022)	Madrid (España)	2	0-15 cm	Muestreador de núcleo de acero inoxidable - pala de metal	Frascos de vidrio	-1 aplicación 5 años antes: 330 MP/kg (226-412 MP/kg). Al año: 204 MP/kg (177-235 MP/kg) -1 aplicación reciente: 215 MP/kg (182-231 MP/kg). Al año: 211 MP/kg (138-288 MP/kg)	ATR-FTIR- μ FTIR	-Aplic. histórica: <1 mm -Aplic. reciente: >1 mm	-	Poliéster	Fibra
Agrícola (aguas residuales)	Rezaei <i>et al.</i> (2022)	Fars (Irán)	1	0-15 cm	Barrena	Papel de aluminio	510 MP/kg (200-1100 MP/kg)	Raman	0,1-1 mm	Blanco-transp.	PET-Nailon	Fibra
	Zhou <i>et al.</i> (2020)	Hangzhou Bay (China)	15	0-10 cm	Pala de acero inoxidable	Botella de vidrio	263 MP/kg	μ -FTIR	1-3 mm	-	PE y PP	Fragmento
Agrícola (múltiples fuentes)	Liu <i>et al.</i> (2018)	Shangai (China)	20	0-6 cm	-	Recipiente aluminio	70,25 MP/kg (hasta 275 MP/kg)	μ -FTIR	<1 mm	Negro y transp.	PP	Fibra
	Zhang y Liu (2018)	Kunming (China)	4	0-10 cm	Pala angosta	-	19,860 MP/kg (7100-42,960 MP/kg)	Visual	0,05-0,25 mm	-	-	Fibras
	Ly <i>et al.</i> (2019)	Shangai (China)	3	0-10 cm	Muestreador acero inox.	Recipiente aluminio	16,1 MP/kg	μ -FTIR	0,02-1 mm	Blanco	PE	Microfibra
Uso del suelo	Publicación	Localización	Sitios	Prof. muestreo	Herramienta muestreo	Almacenamiento muestra	Contenido MP \bar{x} y/o (rango)	Técnica identific.	Tamaño predom.	Color predom.	Composición predom.	Forma predom.
Agrícola (múltiples fuentes)	Zhou <i>et al.</i> (2019)	Wuhan (China)	10	0-5 cm	Pala de acero	Caja de aluminio	160.000 MP/kg (43000-620.000 MP/kg)	Raman	0,01-0,1 mm	-	PE	Fragmento
	Chen <i>et al.</i> (2020)	Wuhan (China)	20	0-5 cm	-	Caja de aluminio	2020 MP/kg (320-12.560 MP/kg)	micro-Raman	0,02-0,2 mm	Rojo-negro-verde	PA	Microesfera
	Du <i>et al.</i> (2020)	Boading (China)	4	0-10 cm	Pala de acero inoxidable	Papel de aluminio	-	TOF-SIMS	< 0,02 mm	-	PET-PP	-
	Yu <i>et al.</i> (2021)	Shandong (China)	45	0-25 cm	Pala de acero inoxidable	Caja de aluminio	1444 MP/kg (310-5698 MP/kg)	μ -FTIR	<0,5 mm	Transp.-Transl.	PP	Fragmento
	Zhou <i>et al.</i> (2020)	Hangzhou Bay (China)	15	0-10 cm	Pala de acero inoxidable	Botella de vidrio	571 MP/kg	μ -FTIR	1-3 mm	-	PE y PP	Fragmento
Agrícola (parcelas de control)	Vollertsen y Hansen (2017)	Jutlandia (Dinamarca)	5	0-15 cm	Pala sembradora	-	51 mg/kg (0,1-224 mg/kg) 236.000 MP/kg (53.000-528.000 MP/kg)	FTIR	0,02-0,245 mm	-	PE	-
	Ljung <i>et al.</i> (2018)	Malmö (Suecia)	1	0-20 cm	Pala	Baldes metálicos	0,30 mg/kg	ATR-FTIR- μ FTIR	0,01-0,5 mm	-	Poliéster	-
	Piehl <i>et al.</i> (2018)	Mittelfranken (Alemania)	1	0-5 cm	Utensilio acero inox.	Barriles de PE	0,34 MP/kg (0-1,25 MP/kg)	ATR-FTIR	2-5 mm	Blanco	PE	Fragmento y película
	Corradini <i>et al.</i> (2019)	Región de Santiago (Chile)	1	0-25 cm	Barrena metálica	Bolsas de PP y tras tamizado en frascos de PET	333 MP/kg (200-600 MP/kg)	Visual	-	-	-	-
	Crossman <i>et al.</i> (2020)	SE de Ontario (Canadá)	1	0-15 cm	Sacatestigos acero inox.	Papel de aluminio	4 MP/kg	ATR-FTIR	-	-	-	-
	Van den Berg <i>et al.</i> (2020)	Valencia (España)	5	0-30 cm	Barrena	Bolsas de PP sellables	2030 MP/kg	μ FTIR	0,15-0,25 mm	-	PP	Fragmento
	Sa'adu y Farsang (2022)	Szeged (SE de Hungría)	1	0-40 cm	Barrena metálica y pala	Papel de aluminio	75 MP/kg	Raman	-	-	-	Espuma
	Schell <i>et al.</i> (2022)	Madrid (España)	1	0-15 cm	Muestreador de núcleo de acero inox. - pala de metal	Frascos de vidrio	57 MP/kg (31-84 MP/kg) Al año: 99 MP/kg (79-120 MP/kg)	ATR-FTIR- μ FTIR	> 1 mm	-	Acrílico	Fibra

Tabla 1.- Casos que abordan la presencia de MP en suelos en función de la tipología de uso del suelo e información extraída de las publicaciones asociadas a los mismos. Nota: el significado de las abreviaturas relativas a las técnicas de identificación analítica y a la composición química de los MP se puede consultar en la Tabla 6.

(MO). Únicamente 1 publicación (Schell *et al.*, 2022) analizó también la porosidad del suelo (n), la densidad relativa (Dr) y su densidad aparente (Dap).

En todas las publicaciones en las que se menciona la herramienta para la toma de muestras de suelo se hace alusión a su composición metálica o asimilable, no haciéndose mención al útil de muestreo en 9 de ellas –lo que representa aproximadamente un 25% del total–. Una vez tomada la muestra, las tipologías de almacenamiento más utilizadas tras su recolección (Fig. 4A) son: un recipiente de aluminio o de acero inoxidable (en 12 publicaciones), en papel de aluminio (en 7 publicaciones) y en recipiente de vidrio (4 publicaciones). No obstante, en los trabajos de Corradini *et*

al. (2019) y de Van den Berg *et al.* (2020) se alude al almacenamiento de las muestras en bolsas plásticas de polipropileno (PP), y Piehl *et al.* (2018) las almacenan en barriles de polietileno (PE). En el caso de Corradini *et al.* (2019), tras el tamizado, las muestras se almacenan también en frascos de tereftalato de polietileno (PET). Indicar que Dierkes *et al.* (2019) utilizan recipientes de vidrio y aluminio, y Amrutha y Warriar (2020) utilizan recipientes y papel de aluminio, es decir, también dos tipos de almacenamiento. Sin embargo, en 10 publicaciones (28,6%) no se especifica el material u objeto utilizado para el almacenamiento de la muestra. Ya en el laboratorio, la mayoría de las 35 publicaciones totales (21) abordan la identificación de los MP mediante espectroscopía

Uso del suelo	Publicación	Tipo de suelo	Parámetros físicos y/o químicos	Uso del suelo	Publicación	Tipo de suelo	Parámetros físicos y/o químicos
Desértico	Abbasi <i>et al.</i> (2021)	Arenosos a arcillosos	-	Agrícola (lodos de depuración)	Corradini <i>et al.</i> (2019)	Franco-Francoarenoso	1,3-4,3% (MO)
Industrial	Du <i>et al.</i> (2020)	Franco arenoso y franco	-		Crossman <i>et al.</i> (2020)	Francoarenoso	-
Pastizal	Rezaei <i>et al.</i> (2019)	Limoso-Arenoso	1,07-2,16% (W)		Van Schothorst <i>et al.</i> (2021)	Arena arcillosa-arcilla marina	-
Urbano	Zhou <i>et al.</i> (2019)	-	12,76-24,47% (W) 4,47-33,9% (COT)		Schell <i>et al.</i> (2022)	Limoso	42,22% (n) 2,31 g/cm ³ (Dr) 1,22 g/cm ³ (Dap) 1,22-2,6% (MO)
	Du <i>et al.</i> (2020)	Franco arenoso y franco	-	Agrícola (aguas residuales)	Rezaei <i>et al.</i> (2022)	Marga	-
Forestal	Zhang y Liu (2018)	Gleysol (fangoso)	-	Agrícola (múltiples fuentes)	Zhang y Liu (2018)	Arcilloso-Fangoso	-
	Zhou <i>et al.</i> (2019)	-	13,52-42,78% (W) 17,25-67,81% (COT)		Zhou <i>et al.</i> (2019)	-	11,64-50,79% (W) 6,14-26,87% (COT)
	Du <i>et al.</i> (2020)	Franco arenoso y franco	-		Du <i>et al.</i> (2020)	Francoarenoso y franco	-
Ribereño (aluvial)	Weber y Opp (2020)	Limos y margas	-		Yu <i>et al.</i> (2021)	Arenoso-Limoso	-
Agrícola (acolchado plástico y/o invernaderos)	Rezaei <i>et al.</i> (2019)	Limoso-Arenoso	1,14-2,01% (W)	Agrícola (control)	Piehl <i>et al.</i> (2018)	Alto contenido en arcilla	-
	Zhang <i>et al.</i> (2020)	Franco-arcilloso-limoso	17,47-28,57% (W)		Corradini <i>et al.</i> (2019)	Franco-Francoarenoso	-
	Van Schothorst <i>et al.</i> (2021)	Arenoso	-		Crossman <i>et al.</i> (2020)	Francoarenoso	-
	Rezaei <i>et al.</i> (2022)	Arenoso-Limoso	-		Sa'adu y Farsang (2022)	Loess	-
	Sa'adu y Farsang (2022)	Loess	-	Uso no indicado	Meixner <i>et al.</i> (2020)	Granular	-

Tabla 2.- Tipología de suelo, asociada a su textura y/o estructura, y parámetros físicos y/o químicos del mismo extraídos en suelos para cada tipología de uso del suelo de aquellas publicaciones en las que consta dicha información. El significado de las abreviaturas asociadas a los parámetros físicos y/o químicos del suelo es el siguiente: W (humedad del suelo), COT (carbono orgánico total), MO (materia orgánica), n (porosidad del suelo), Dr (densidad relativa del suelo) y Dap (densidad aparente del suelo).

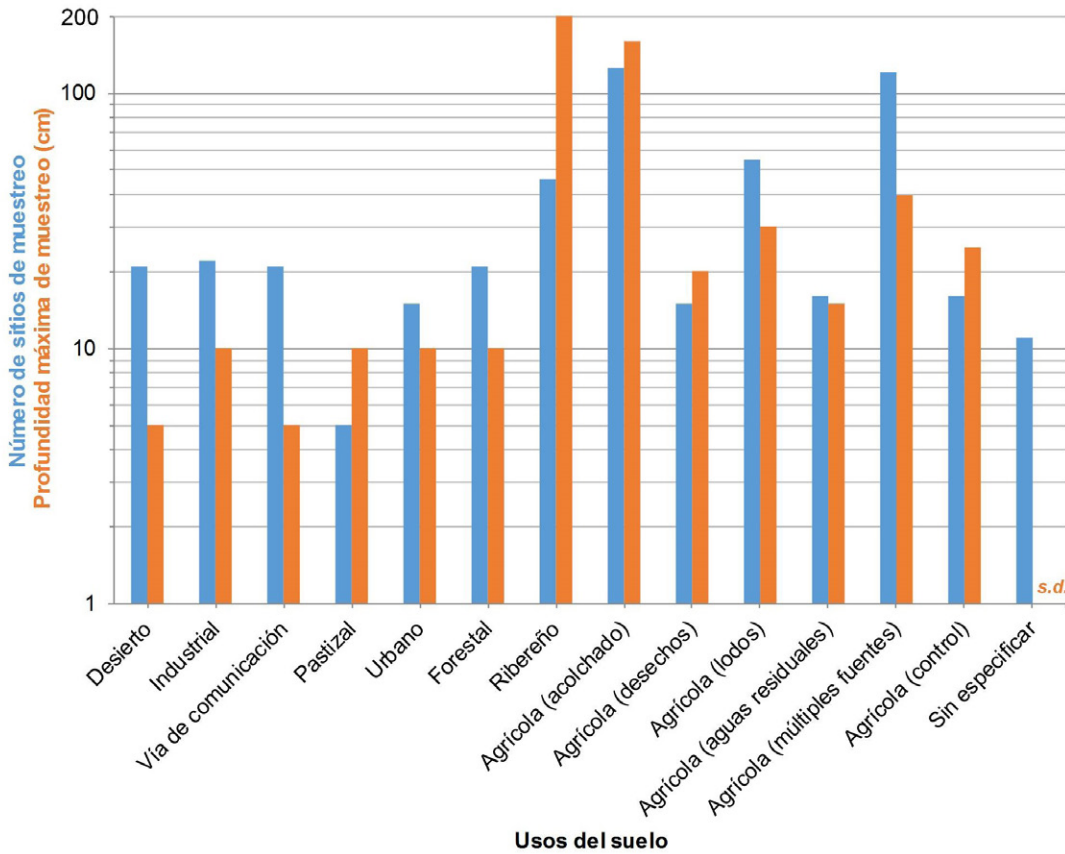


Fig. 3.- Número de sitios de muestreo (en azul) y profundidad máxima alcanzada en centímetros durante el muestreo (en naranja) en los suelos de cada tipo de uso del suelo. Nota: escala logarítmica en eje vertical y “s.d.” significa sin datos disponibles para dicho uso del suelo.

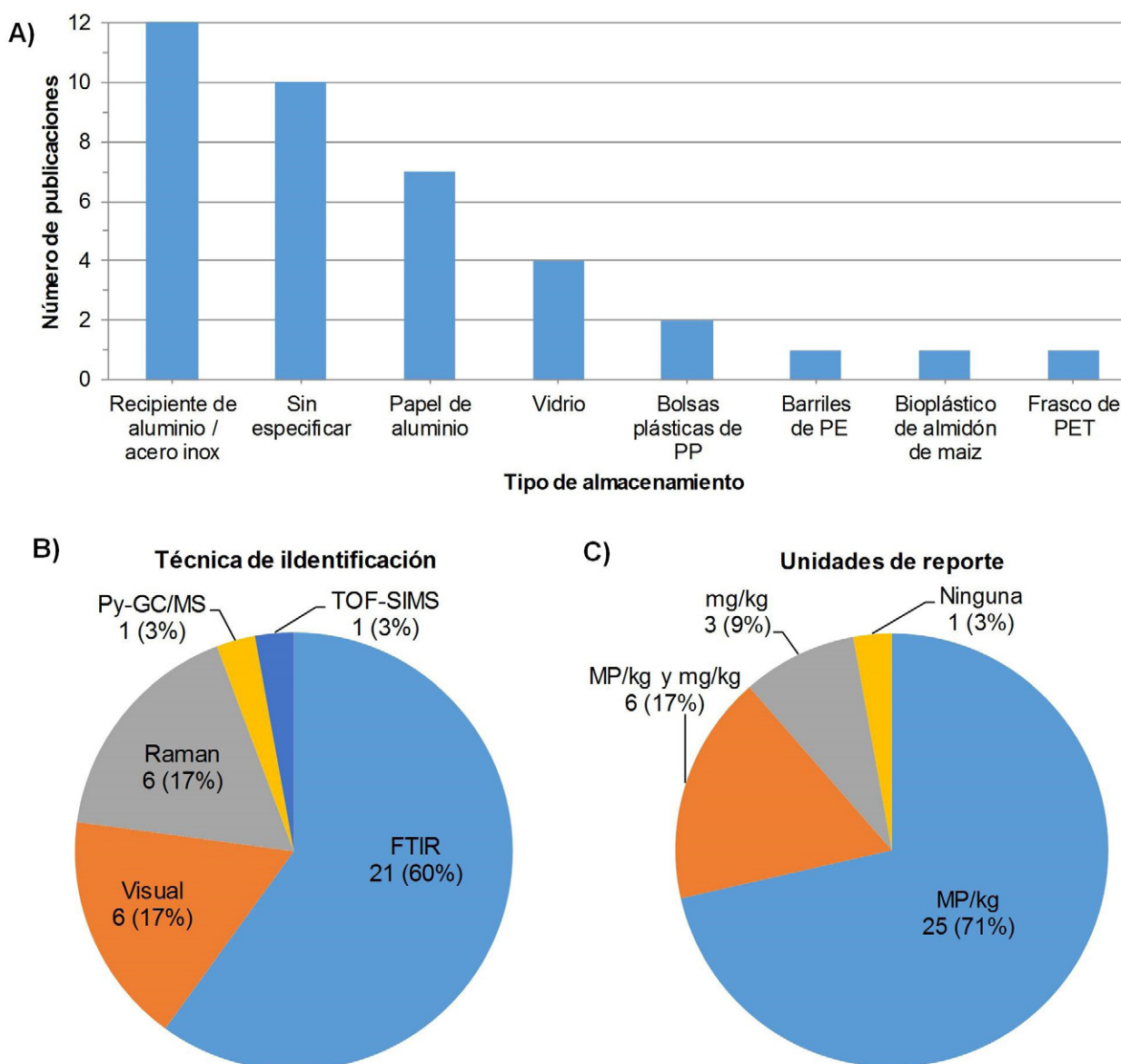


Fig. 4.- A) Tipología de almacenamiento de las muestras de suelo tras su recolección asociado a cada publicación. B) Técnica de identificación de los MP utilizada en cada una de las publicaciones analizadas, y porcentaje asociado. C) Unidades utilizadas para la cuantificación de los MP en cada una de las publicaciones revisadas, y porcentaje asociado. Nota: el significado de las abreviaturas relativas a las técnicas de identificación analítica y a la composición química de los MP se puede consultar en la Tabla 6.

de infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR) (Fig. 4B). La identificación Raman y la visual han sido utilizadas en 6 trabajos cada una. Dierkes *et al.* (2019) emplearon pirólisis acoplada a cromatografía de gases y espectrometría de masas (Py-GC/MS) y Du *et al.* (2020) analizaron mediante espectrometría de masas de iones secundarios por tiempo de vuelo (TOF-SIMS). Del total de las publicaciones en las que se cuantifica la presencia de MP (34), 25 de ellas reportan los resultados en MP/kg y 3 en mg/kg (Fig. 4C). En las 6 publicaciones restantes se reporta la cuantificación en ambas unidades. La publicación de Du *et al.* (2020) es la única en la que no se cuantifica la presencia de MP, y por tanto no se reportan unidades.

En promedio, la menor concentración de MP reportada en MP/kg es de 0,34 en suelos agrícolas de control en Alemania (Piehl *et al.*, 2018). A ella le sigue una concentración

promedio de 1,88 MP/kg en suelos de llanuras aluviales alemanas (Weber y Opp, 2020) y de 4 MP/kg en un suelo agrícola de control canadiense (Crossman *et al.*, 2020). En contraposición, la mayor concentración promedio de MP reportada en MP/kg es de 410.000 en un suelo forestal chino (Zhou *et al.*, 2019). En menor cuantía, le sigue una concentración promedio de 236.000 MP/kg en suelos agrícolas de control en Dinamarca (Vollertsen y Hansen, 2017) y de 160.000 MP/kg en un suelo agrícola chino con múltiples fuentes de contaminación por microplásticos (Zhou *et al.*, 2019). El conjunto de valores promedio (máximos y mínimos) para cada tipología de uso del suelo, en función de las unidades de reporte, se indican en la Tabla 3. Considerando los valores unitarios en aquellos casos en los que se ha podido extraer el rango, se ha cuantificado un valor de 0 MP/kg en los suelos desérticos (Abbasi *et al.*, 2021) y

Uso del suelo	Rango de valores promedio	
	MP/kg	mg/kg
Desierto	20	-
Industrial	-	7764,7
Vía de comunicación	1108	914,95
Pastizal	37,8	0,18
Urbano	95 - 120.000	-
Forestal	160 - 410.000	-
Ribereño	1,88 - 84,45	5 - 5,63
Agrícola (acolchado)	47,94 - 2242	0,27 - 1,2
Agrícola (desechos)	870 - 997	-
Agrícola (lodos)	102,5 - 82.000	0,32 - 6,2
Agrícola (aguas residuales)	263 - 510	-
Agrícola (múltiples fuentes)	16,1 - 160.000	-
Agrícola (control)	0,34 - 236.000	0,3 - 51
Sin especificar	12.553	-

Tabla 3.- Rango de valores promedio máximos y mínimos extraídos en suelos para cada tipología de uso del suelo, en función de las unidades de reporte. Nota: cuando solo figura un valor promedio para una tipología de uso del suelo es porque es el único existente.

pastizales iraníes (Rezaei *et al.*, 2019), en un suelo agrícola asociado a tierras de cultivo en China (Zhang *et al.*, 2020) y en un suelo agrícola de control alemán (Piehl *et al.*, 2018) –el mismo en el que se obtuvo la mínima concentración promedio–. Por el contrario, el máximo valor cuantificado corresponde a 690.000 MP/kg, asociado a un suelo forestal chino (Zhou *et al.*, 2019) en el que además se obtuvo la mayor concentración promedio.

Como se apreciaba en la Tabla 3, la menor concentración promedio de MP reportada en mg/kg es de 0,18 en suelos de pastizal en Irán (Rezaei *et al.*, 2019). A ella le sigue una concentración promedio de 0,27 mg/kg en suelos asociados a tierras de cultivo en China (Zhang *et al.*, 2020) y de 0,3 mg/kg en un suelo agrícola de control sueco (Ljung *et al.*, 2018). En contraposición, la mayor concentración de MP reportada en mg/kg es de 7764,7 en un suelo industrial de Australia (Fuller y Gautam, 2016). En menor cuantía, le sigue una concentración promedio de 914,95 mg/kg en suelos asociados a una vía de comunicación alemana (Dierkes *et al.*, 2019) y de 51 mg/kg en un suelo agrícola de control danés (Vollertsen y Hansen, 2017), el cual también destacó por la elevada concentración de MP (236.000 MP/kg). Considerando los valores unitarios en aquellas publicaciones en las que se ha podido extraer el rango, se ha cuantificado un valor nulo de MP reportado en mg/kg –al igual que ocurrió para MP/kg– en alguna muestra asociada a los suelos de pastizales iraníes (Rezaei *et al.*, 2019) y en un suelo agrícola asociado a tierras de cultivo en China (Zhang *et al.*, 2020). Así mismo, también se obtuvo un valor de 0 mg/kg en alguna muestra de suelo asociada a suelos agrícolas daneses abonados con lodos de depuración (Vollertsen y Hansen, 2017). Por el contrario,

el máximo valor cuantificado corresponde a 67.500 mg/kg, asociado a un suelo industrial australiano (Fuller y Gautam, 2016) –el mismo en el que se obtuvo la máxima concentración promedio–.

En cuanto al tamaño de los MP detectados, este no se cuantificó en 6 de las publicaciones –lo que representa aproximadamente un 22,9% del total–. En primer lugar, se ha obtenido el rango de tamaño predominante, a partir del valor de tamaño predominante máximo y mínimo extraído del conjunto de los casos asociados a una misma tipología de uso del suelo (Fig. 5). No obstante, para diversas tipologías de uso del suelo no se ha podido establecer un valor mínimo de tamaño predominante –y por consiguiente el rango–, por lo que únicamente se ha especificado el valor máximo de tamaño predominante. En consecuencia, el valor máximo del tamaño predominante de los MP es, en todos los casos, inferior a 1 mm en suelos desérticos, forestales, asociados a vías de comunicación y de uso industrial, llegando a ser inferior a 0,1 mm en suelos de pastizal. Por el contrario, en suelos ribereños el valor máximo del tamaño predominante es de 5 mm, algo superior a los 3,2 mm considerados para suelos urbanos. En lo relativo a suelos de uso agrícola, se establece en 5 mm el valor máximo del tamaño predominante de los MP en suelos asociados a parcelas de control, en suelos abonados con lodos de depuración y en suelos con presencia de acolchado y/o invernaderos. Dicho valor es de 3 mm en suelos agrícolas regados con aguas residuales y en suelos agrícolas con presencia de múltiples fuentes de contaminación por microplásticos,

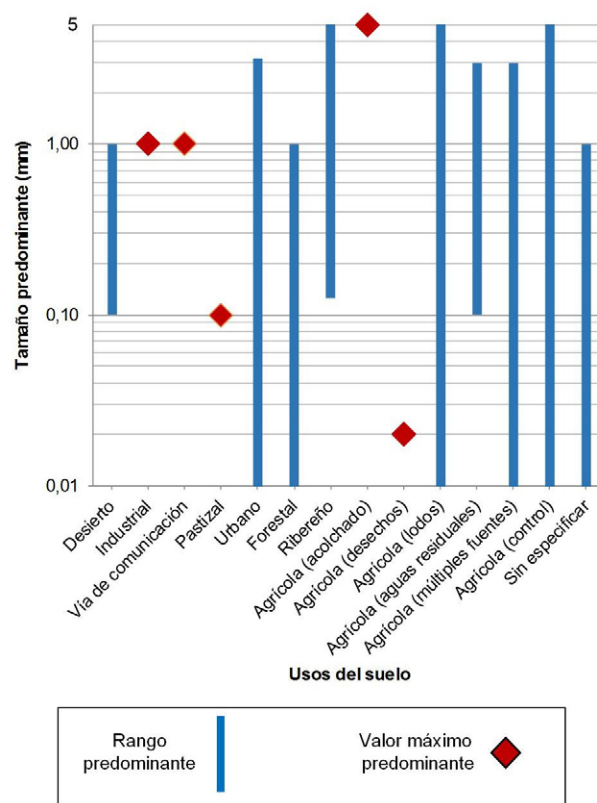


Fig. 5.- Tamaño predominante de los MP asociado a cada tipología de uso del suelo. Nota: escala logarítmica en eje vertical.

Uso del suelo	Composición química predominante								Formas predominantes					Colores predominantes				
	PE	PP	PET	SBR	Nailon	Poliéster	PVC	SIS	Fragmento	Fibra	Película	Espuma	Microesfera	Blanco-Transparente	Negro-gris	Amarillo	Verde	Rojo
Desierto			X							X				X	X			
Industrial		X			X		X				s.d.				s.d.			
Vía de comunicación	X			X					X						X		X	
Pastizal					s.d.						s.d.				s.d.			
Urbano	X	X	X	X					X					X	X		X	
Forestal	X		X					X	X	X					X		X	
Ribereño	X								X	X	X			X				
Agrícola (acolchado)	X	X	X						X	X	X			X	X			
Agrícola (desechos)					s.d.						s.d.				s.d.			
Agrícola (lodos)	X	X				X			X	X					s.d.			
Agrícola (aguas residuales)	X	X	X		X		X		X	X				X				
Agrícola (múltiples fuentes)	X	X	X						X	X			X	X	X		X	X
Agrícola (control)	X	X				X			X	X	X	X		X				
Sin especificar			X								s.d.				s.d.			

Tabla 4.- Composición química, forma y color predominante de los MP extraída en suelos para cada tipología de uso del suelo. Nota: “s.d.” significa sin datos disponibles para dicho uso del suelo. El significado de las abreviaturas relativas a la composición química de los MP se puede consultar en la Tabla 6.

llegando a ser inferior a 0,02 mm en suelos con presencia de residuos o desechos plásticos superficiales. El tamaño mínimo del rango predominante es del orden de 0,01 mm en suelos de uso forestal, urbano y agrícola, salvo en los suelos regados con aguas residuales –donde, al igual que en suelos desérticos y ribereños, es del orden de 0,1 mm–. Por último, en los suelos agrícolas con presencia de acolchado, residuos o desechos plásticos superficiales no se ha podido establecer un valor mínimo de tamaño predominante, al igual que en los suelos asociados a vías de comunicación, industriales y de pastizal.

Considerando que no existe ningún dato sobre la composición química de los MP asociados a suelos de pastizal y a los agrícolas con presencia de residuos o desechos plásticos superficiales, el PE es el único tipo de plástico predominante que está presente en suelos de la práctica totalidad de las tipologías de uso, salvo en suelos de uso industrial y desérticos (Tabla 4). Así mismo, también se detecta la presencia de PP como compuesto químico predominante en los suelos de uso agrícola, al igual que en los de uso urbano e industrial. Por otra parte, indicar que el PET también es otro compuesto químico predominante en la práctica totalidad de las tipologías consideradas para uso agrícola y en suelos de tipo desértico, forestal y urbano. Por último, destaca la presencia de otros compuestos químicos predominantes asociados a usos del suelo más concretos, como: i) caucho de estireno-butadieno (SBR), en suelos urbanos y asociados a vías de comunicación; ii) nailon, en suelos industriales y agrícolas regados con aguas residuales; iii) poliéster, en suelos agrícolas de control y abonados con lodos de depuración; iv) policloruro de vinilo (PVC), en suelos de uso industrial y agrícolas regados con aguas residuales; y v) estireno-isopropeno-estireno (SIS), en suelos de uso forestal. No obstante, en 8 publicaciones no se hace mención alguna a la composición química de los MP existentes –lo que representa aproximadamente un 23% del total–.

La forma predominante de los MP según los usos del suelo, se muestra en la Tabla 4. No se dispone de ningún

dato asociado a suelos de uso industrial y de pastizal, así como de suelos agrícolas con presencia de residuos o desechos plásticos superficiales. Para el resto de usos del suelo, los fragmentos constituyen la forma o una de las formas predominantes de los MP detectados, con excepción de los suelos desérticos, caracterizados por el predominio único de las fibras. Se detectó también la presencia de fibras como forma predominante en los suelos de uso agrícola, al igual que en los de uso forestal y ribereño. Por último, también se detectó la presencia de películas como forma predominante en suelos de uso ribereño y en los agrícolas de control y con presencia de acolchado plástico y/o invernaderos. No obstante, en 15 de las publicaciones revisadas no se hace mención alguna a la forma que pudieran tener los MP, lo que representa un porcentaje notable –próximo al 43%– con respecto al total.

El color de los MP identificados no se indica en el 60% del total de las publicaciones revisadas (Tabla 4). En el 40% restante, indiscutiblemente, el blanco-transparente es un color predominante en la práctica totalidad de los usos del suelo, a excepción de los suelos de uso forestal y asociados a vías de comunicación, en los que predominan el negro y el amarillo. No se dispone de ningún dato asociado al color de los MP existentes en suelos de uso industrial y de pastizal, al igual que en suelos agrícolas abonados con lodos de depuración y con presencia de residuos o desechos plásticos superficiales. Así mismo, el negro es uno de los colores predominantes también en suelos agrícolas con presencia de acolchado plástico, al igual que en suelos agrícolas asociados a múltiples fuentes de contaminación microplástica, identificándose su presencia también como color predominante en suelos desérticos o de uso urbano. No obstante, el color de los MP podría alterarse durante el proceso de degradación de los mismos, pudiendo ser la causa de que en algunos casos predomine un color más blanquecino o transparente.

De modo genérico, en suelos ribereños (asociados a llanuras aluviales) destaca: i) la presencia de PE como compuesto químico predominante; ii) el color blanco de los MP; y iii) su reducido rango de tamaño predominante

—comprendido entre 0,125 mm (mínimo) y 5 mm (máximo)—. En lo que respecta a los suelos de uso urbano y asociados a vías de comunicación destaca el fragmento como forma predominante. Sin embargo, los suelos desérticos se caracterizan por la presencia más acentuada de fibras. Por último, en lo relativo a suelos de uso agrícola: i) la presencia de MP de poliéster y fibras predominan en los suelos abonados con lodos de depuración; y ii) la presencia de MP de PE y color transparente predominan en suelos con presencia de acolchado plástico y/o invernaderos. Finalmente, los suelos de uso agrícola asociados a múltiples fuentes de contaminación por microplásticos destacan por la presencia predominante de fibras y fragmentos y de MP de PP y de PE.

Impacto de la presencia de MP en el agua subterránea

La revisión de las 7 publicaciones disponibles (Tabla 5) permite señalar que, salvo en el caso de la India, donde existen dos publicaciones que abordan la presencia de MP en aguas subterráneas, el resto corresponden a estudios realizados en otros cinco países pertenecientes a Europa (Alemania y Hungría), Asia (China), América (Estados Unidos) y Oceanía (Australia). Asociados a dichas publicaciones, se tomaron muestras de aguas subterráneas de 86 sitios de muestreo: 30 en Alemania, 27 en la India, 17 en Estados Unidos, 7 en Australia, 3 en Hungría y 2 en China (Fig. 6).

La litología asociada a los acuíferos de las publicaciones revisadas se caracteriza por la presencia de rocas detríticas (Su *et al.*, 2021) o carbonatadas (complejos kársticos con presencia de discontinuidades, conductos o sumideros —Samandra *et al.*, 2022—). Únicamente Samandra *et al.* (2022) y Panno *et al.* (2019) hacen mención a la tipología

del acuífero existente, siendo en ambos casos de carácter libre. No obstante, en 3 de las 7 publicaciones revisadas no se hace referencia a la tipología de los acuíferos estudiados y/o a la litología asociada.

La profundidad de muestreo de las aguas subterráneas es muy variable y no se menciona en dos de las publicaciones revisadas, siendo lo habitual disponer de, al menos, alguna muestra tomada a nivel superficial (manantiales) o subsuperficial (entre 1 y 2 m). La profundidad máxima de muestreo oscila entre los 5 y los 30 m, pudiendo alcanzar los 60 m en el acuífero asociado al complejo kárstico de Illinois (Estados Unidos). Por tanto, se necesita utilizar instrumental de muestreo específico que únicamente se ha indicado en dos publicaciones. Así, solamente se especifica el uso de un achicador de acero inoxidable unido a una cuerda de poliamida (PA) trenzada en una publicación y de una bomba de teflón de 12 V en otra.

Una vez tomada la muestra, en la mayor parte de las publicaciones se alude a su almacenamiento en botellas de vidrio (Fig. 7A). No es el caso de los trabajos de Panno *et al.* (2019) y de Sa'adu y Farsang (2022), en los que se indica la utilización de botellas de plástico para el almacenamiento de las muestras de agua subterránea. Así mismo, es importante hacer mención al volumen de muestra considerado en cada trabajo a efectos de representatividad, el cual varió notablemente: i) desde 1 o 2 litros muestreados y/o procesados únicamente (Ganesan *et al.*, 2019; Panno *et al.*, 2019; Samandra *et al.*, 2022; Sa'adu y Farsang, 2022); ii) prosiguiendo por los 20 litros tomados por Selvam *et al.* (2021), y iii) finalizando en los 300-1000 litros procesados por Mintenig *et al.* (2019). Únicamente en el trabajo de Su *et al.* (2021) no se hace mención al volumen muestreado y/o procesado. De las 7 publicaciones totales, la mayoría (4) abordan la identificación de los MP en laboratorio mediante FTIR (Fig. 7B), habiéndose utilizado también la identificación mediante láser infrarrojo directo (LDIR) (Samandra *et al.*, 2022), Py-GC/MS (Panno *et al.*, 2019) y Raman (Sa'adu y Farsang, 2022).

En todas las publicaciones en las que se cuantifica la presencia de MP (6) se reportan los resultados en partículas por litro o unidad homogeneizable. En promedio, la menor concentración de MP reportada es de 0,00033 partículas/l en las aguas subterráneas tomadas a 30 m de profundidad en Alemania (Mintenig *et al.*, 2019). En contraposición, la mayor concentración promedio de MP reportada es de 38 partículas/l en un acuífero libre de Australia (Samandra *et al.*, 2022). Las cuatro publicaciones restantes reportan unas concentraciones promedio comprendidas entre 2,3 partículas/l (Sa'adu y Farsang, 2022) y 6,4 partículas/l (Panno *et al.*, 2019). De acuerdo a los valores unitarios asociados al rango indicado en cada publicación, se ha cuantificado un valor de 0 partículas/l en cuatro de las publicaciones (Panno *et al.*, 2019; Mintenig *et al.*, 2019; Selvam *et al.*, 2021; Sa'adu y Farsang, 2022). Por el contrario, el máximo valor cuantificado corresponde a 97 partículas/l, asociado a las aguas subterráneas de un área industrial australiana en el que la recarga del acuífero se produce a través de la infiltración vertical directa desde la superficie (Samandra *et al.*, 2022) y en el que además se obtuvo la mayor concentración promedio. Así, en esa región, la concentración

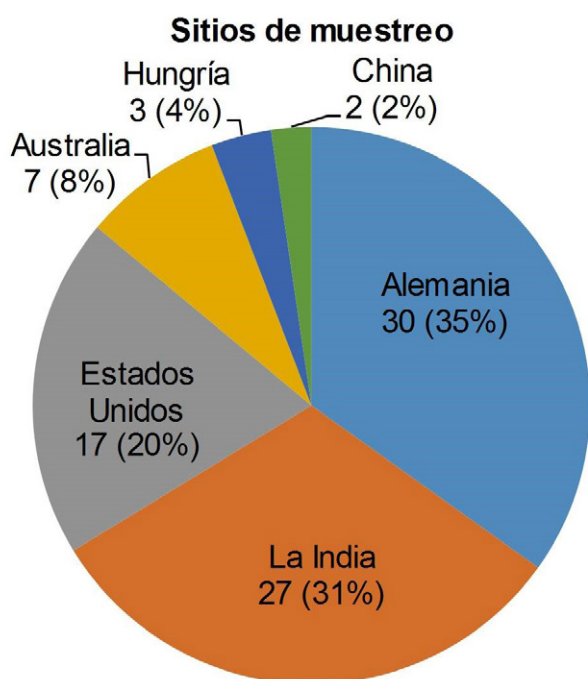


Fig. 6.— Número de sitios de muestreo por cada país, y porcentaje asociado, a partir de los cuales se evaluó la presencia de MP en aguas subterráneas.

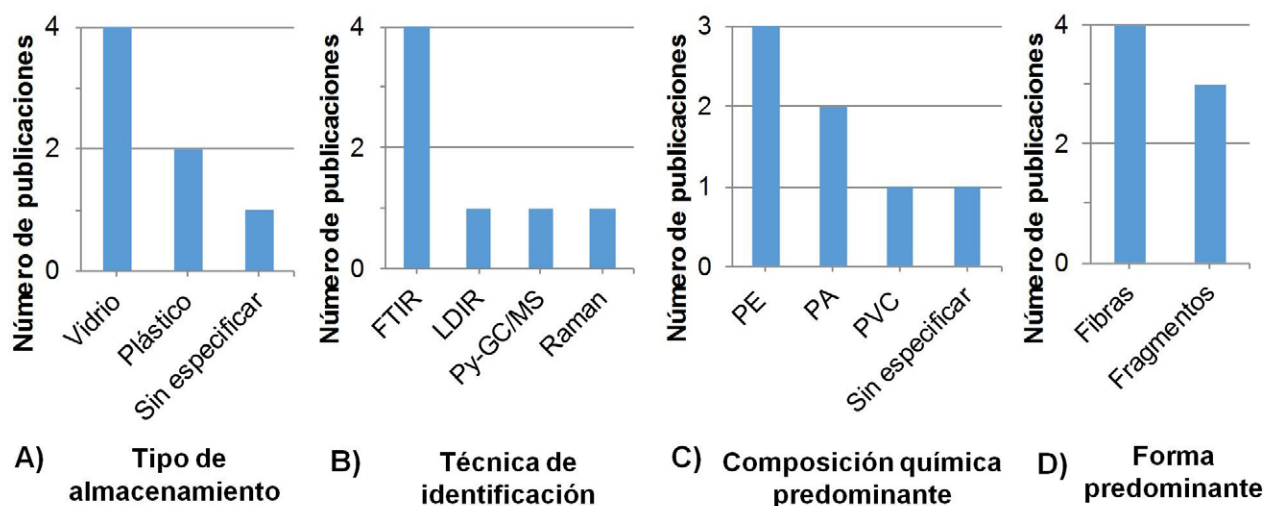


Fig. 7.- Número de publicaciones en aguas subterráneas asociadas a: A) cada tipología de almacenamiento de las muestras tras su toma; B) cada técnica de identificación de los MP utilizada; C) cada composición química predominante de los MP; y D) a cada forma predominante de los MP detectados. Nota: el significado de las abreviaturas relativas a las técnicas de identificación analítica y a la composición química de los MP se puede consultar en la Tabla 6.

de MP relativa a un punto sin fuentes de potencial contaminación *in situ* sería de 16 partículas/l.

El tamaño máximo predominante de los MP es inferior a 2,5 mm en todos los casos. Por el contrario, es necesario reseñar que existe un límite de tamaño, en función del método analítico, por debajo del cual no es posible cuantificar la presencia de micro-nanoplásticos. En el caso de las publicaciones seleccionadas, asociado al tamiz o filtro utilizado, este límite de tamaño es de: i) 0,00045 mm (Ganesan *et al.*, 2019; Panno *et al.*, 2019; Sa'adu y Farsang, 2022; Su *et al.*, 2021); ii) 0,003 mm (Mintenig *et al.*, 2019); iii) 0,015 mm (Samandra *et al.*, 2022), y iv) 0,05 mm (Selvam *et al.*, 2021). No obstante, solamente 1 publicación (Mintenig *et al.*, 2019) también hace referencia al límite inferior de detección del propio equipo utilizado en laboratorio, indicando que únicamente cuantifica MP mayores de 0,02 mm.

En consecuencia, el tamaño mínimo del rango predominante llegó a ser del orden de 0,018 mm en las aguas subterráneas de la región australiana de Victoria (Samandra *et al.*, 2022). Además, de esta publicación se puede extraer que el tamaño promedio predominante de los MP aumenta progresivamente desde las aguas subterráneas asociadas a suelos de uso industrial (0,068 mm), a los de uso urbano (0,089 mm) y agrícola (0,096 mm).

La composición química predominante de los MP detectados en las aguas subterráneas es el PE. No obstante, también queda patente la presencia como composición química predominante de PA –en 2 publicaciones– y del PVC –en 1 publicación– (Fig. 7C), siendo el trabajo de Sa'adu y Farsang (2022) el único que no hace ningún tipo de alusión a la composición de los MP detectados. La forma predominante de los MP (Fig. 7D) son las fibras (4 publi-

Publicación	Localización	Uso del suelo	Sitios	Prof. muestreo	Vol. muestra / Tamaño filtrado	Herramienta muestreo	Almacenam. muestra	Contenido MP \bar{x} y/o (rango)	Técnica identific.	Tamaño predom.	Color predom.	Composición predom.	Forma predom.
Ganesan <i>et al.</i> (2019)	Tamil Nadu (India)	Agrícola, urbano e industrial	3	-	1 l (procesado) / 0,00045 mm	-	Botellas de vidrio	5 part./l (4-7 part./l)	FTIR	-	Blanco y amarillo	PA	Fragmento
Mintenig <i>et al.</i> (2019)	Holdorf (Alemania)	-	3	30 m	300–1000 l (procesado) / 0,003 mm	-	Botellas de vidrio y cierre con papel aluminio	0,00033 part./l (0-0,001 part./l)	FTIR-FPA	0,05-0,15 mm	-	PE	Fragmento
Panno <i>et al.</i> (2019)	Illinois (EE. UU.)	Agrícola y urbano	17	0–<65 m	2 l (muestreado) / 0,00045 mm	-	Botellas de HDPE	6,4 part./l (0-15,2 part./l)	Pirólisis-GC/MS	< 1,5 mm	Azules y/o transp.	PE	Fibra
Selvam <i>et al.</i> (2021)	Tamil Nadu (India)	Región agrícola e industrial	24	2-5 m	20 l (muestreado) / 0,05 mm	Bomba de teflón de 12V	Frascos de vidrio	4,2 part./l (0-10,1 part./l)	ATR- μ FTIR-AFM	< 1 mm Total: (0,12–2,5 mm)	Transp.	PE	Fibra
Su <i>et al.</i> (2021)	Shandong (China)	Agrícola	2	-	- / 0,00045 mm	-	-	-	FTIR	-	-	PA	Fibra
Samandra <i>et al.</i> (2022)	Victoria (Australia)	Agrícola, industrial y urbano	7	2-29 m	1 l (muestreado / procesado) / 0,015 mm	Achicador de acero inoxidable unido a una cuerda de poliamida (PA) trenzada	Botellas de vidrio ámbar	Promedio total: 38 part./l Uso agrícola: 32 part./l (23-40 part./l) Uso industrial: 97 part./l Uso urbano: 27 part./l Sin fuentes <i>in situ</i> : 16 part./l	LDIR	Total: 0,089 mm (0,018-0,491 mm) Agrícola: 0,096 mm Industrial: 0,068 mm Urbano: 0,089 mm	-	Total: PVC Agrícola: PE Industrial: PVC Urbano: PE Sin fuentes <i>in situ</i> : PVC	Fragmento
Sa'adu y Farsang (2022)	Szeged (SE de Hungría)	Agrícola	3	1 m	1 l (muestreado) / 0,00045 mm	-	Botellas de plástico	2,3 part./l (0-5 part./l)	Calor- aguja / Raman	-	-	-	Fibra

Tabla 5.- Información extraída de las publicaciones que abordan la presencia de MP en el agua subterránea. Nota: el significado de las abreviaturas relativas a las técnicas de identificación analítica y a la composición química de los MP se puede consultar en la Tabla 6.

	Abreviatura	Significado
Técnicas de identificación analítica	AFM	Microscopía de fuerza atómica
	ATR	Reflectancia total atenuada
	FPA	Detector de matriz de plano focal
	FTIR	Espectroscopía de infrarrojos por transformada de Fourier
	Py-GC/MS	Cromatografía de gases por pirólisis / espectrometría de masas
	LDIR	Láser infrarrojo directo
Composición química	TOF-SIMS	Espectrometría de masas de iones secundarios por tiempo de vuelo
	HDPE	Polietileno de alta densidad
	PA	Poliamida
	PA6	Poliamida 6 o nailon 6
	PE	Polietileno
	PET	Tereftalato de polietileno
	PP	Polipropileno
	PS	Poliestireno
	PVC	Policloruro de vinilo
	LDPE	Polietileno de baja densidad
	SBR	Caucho de estireno-butadieno
	SIS	Estireno-isopropeno-estireno

Tabla 6.- Significado de las abreviaturas utilizadas en este trabajo relativas a las técnicas de identificación analítica y a la composición química de los MP.

caciones), seguidas exclusivamente de los fragmentos (3 publicaciones).

Únicamente, en 3 de las publicaciones se hace referencia al color de los MP presentes en las aguas subterráneas, siendo el transparente el color predominante. No obstante, en menor medida, también se hace referencia a la presencia de MP de color blanco, azul y amarillo.

Con respecto al mecanismo de ingreso de los MP en las aguas subterráneas, se plantean mayoritariamente tres casuísticas: i) infiltración desde el suelo a partir de residuos, desechos superficiales, acolchados, fertilizantes, etc. –actuando como vías de transporte las grietas, fracturas, conductos o sumideros– (Ganesan *et al.*, 2019; Panno *et al.*, 2019; Selvam *et al.*, 2021; Samandra *et al.*, 2022; Sa'adu y Farsang, 2022); ii) infiltración desde escorrentía superficial, efluentes o alcantarillado (Panno *et al.*, 2019; Selvam *et al.*, 2021), y iii) contaminación atmosférica durante el muestreo (Mintenig *et al.*, 2019; Su *et al.*, 2021).

Discusión

A diferencia de otros contaminantes ambientales, como los metales pesados, en los que se pueden establecer valores de fondo natural o geogénico para evaluar una potencial contaminación antrópica en suelos y aguas subterráneas, los MP son sustancias puramente antropogénicas que están omnipresentes en el medioambiente, tanto de manera puntual como difusa (Webber y Opp, 2020). Por tanto, los términos “línea base” o “concentración de fondo” aplicados a la presencia de MP en suelos y aguas subterráneas son muy relativos o incluso erróneos. En este sentido, Razei *et al.* (2022) tomaron como valor de “línea base” para suelos una concentración promedio de 20 MP/kg, obtenida por Abassi *et al.* (2021) en suelos desérticos remotos de Irán –al considerar que era la más baja reportada en la literatura–. No obstante, a partir de las publicaciones revisadas se han

identificado concentraciones promedio inferiores, tanto en suelos ribereños (llanura aluvial) como agrícolas de control de Alemania y Canadá, del orden de 0,34 MP/kg (Piehl *et al.*, 2018), 1,88 MP/kg (Webber y Opp, 2020) o 4 MP/kg (Crossman *et al.*, 2020), respectivamente.

Si bien queda patente en la mayor parte de los trabajos revisados una relación entre el número de MP y las fuentes de potencial contaminación asociadas a los usos del suelo, varias son las publicaciones que hacen referencia, con respecto a la abundancia de MP en los suelos, a la heterogeneidad existente incluso en puntos de muestreo próximos (Ljung *et al.*, 2018; Schell *et al.*, 2022). Fruto de esta variabilidad, influenciada también por la proximidad a áreas urbanizadas (densidad de población) e industrializadas, se ha observado que, por ejemplo, según Choi *et al.* (2021), en suelos adyacentes a una vía de comunicación abundan los MP de color amarillo (asociados a la pintura de la carretera) y negro (procedentes del polvo de los neumáticos propio de la tipología plástica predominante: SBR), lo cual es indicativo de la conjunción entre la fuente de contaminación y el uso del suelo. Otra casuística sería la aplicación de lodos de depuración en suelos agrícolas, dado que presentan una mayor concentración de MP que suelos adyacentes en los que no se aplicaron, así como evidencias de su acumulación tras aplicaciones sucesivas (Corradini *et al.*, 2019). Por ello, la continuidad temporal de la fuente de contaminación es otro parámetro a tener en cuenta en este tipo de estudios. Otro ejemplo correspondería a la correlación existente en suelos de uso agrícola entre la utilización de película de acolchado plástico, o la instalación de invernaderos, y los MP detectados posteriormente en el suelo, los cuales tienen en la práctica totalidad de los casos la misma composición química predominante (fundamentalmente PE y en menor medida PP) y color (blanco-transparente y negro) que el utilizado en origen (Isari *et al.*, 2021), siendo el transparente el color predominante detectado en aguas subterráneas. No obstante, Mintenig *et al.* (2019) indican que la correlación entre la presencia de MP en los suelos y las aguas subterráneas asociadas a la vertical de un mismo punto, en la práctica totalidad de los casos, está sujeta a un desfase temporal entre ambos medios de años o décadas, lo que dificulta establecer el origen de los MP en aguas subterráneas, al igual que el área de recarga por la que se hayan introducido pueda estar distante y no corresponder a la misma tipología de uso que la de los suelos suprayacentes. Un último ejemplo ocurre en suelos agrícolas abonados con lodos de depuración o regados con aguas residuales, en los que destaca en la composición química predominante de los MP la presencia de poliéster y nailon, respectivamente –lo cual concuerda con su origen primigenio por el lavado de textiles, llegando posteriormente el agua asociada a la estación depuradora de aguas residuales (EDAR)–.

La resistencia a la tracción de los MP puede ser otro factor a tener en cuenta asociado a su distribución y abundancia. En concreto, en los suelos desérticos predominan los MP que presentan un valor más alto de resistencia a la tracción (por ejemplo: PET), en detrimento de los mayoritarios en suelos más expuestos a precipitaciones y a

la humedad (por ejemplo: PE y PP) –y que presentan una baja resistencia a la tracción– (Abbasi *et al.*, 2021). Por tanto, se ha comprobado que variables climáticas como la lluvia, la humedad ambiental y las altas temperaturas pueden favorecer la degradación de los MP (Ding *et al.*, 2020), así como el viento su transporte. En regiones semiáridas, la escorrentía de aguas superficiales tiene una influencia insignificante en la migración de MP de suelos agrícolas (Schell *et al.*, 2022). En lo que respecta a la dispersión eólica –como fuente de MP procedentes de regiones distantes a través del transporte y el depósito atmosférico (Allen *et al.*, 2019)–, se pone de manifiesto la importancia de determinar el tipo de suelo, asociado a su textura y/o estructura, puesto que el predominio de material cohesivo retiene con mayor fuerza a los MP en el sustrato (Rezaei *et al.*, 2022). Así mismo, el depósito atmosférico puede ser una fuente directa de MP en pozos o captaciones de aguas subterráneas abiertas.

Si bien Rillig *et al.* (2017) indicaron la importancia de considerar, en lo relativo al transporte de los MP, la incidencia que pudiera tener cada tipo de suelo, asociado a su textura y/o estructura, en aproximadamente la mitad de las publicaciones revisadas no se hace referencia a estas propiedades del suelo. No obstante, queda patente que en suelos con textura gruesa es posible la migración de MP a través de los poros del suelo (Zhang *et al.*, 2020; Yu *et al.*, 2021; Schell *et al.*, 2022), pudiendo los desechos plásticos alterar las propiedades del suelo (Souza Machado *et al.*, 2018). Sin embargo, en suelos cohesivos los poros pequeños son desfavorables para la infiltración o transporte de MP (Yu *et al.*, 2021; Schell *et al.*, 2022). Por ello, también se plantea como necesario en este tipo de estudios cuantificar la fracción de poros o el tamaño de los poros del suelo (Webber y Opp, 2020), dado que en áreas con el nivel freático alto y suelos gruesos la transferencia de MP entre ambos medios puede ser posible (Scheurer y Bigalke, 2018) –lo cual quedó patente en cinco de las siete publicaciones de aguas subterráneas revisadas–.

La densidad es otro aspecto a tener en cuenta, puesto que MP con una densidad baja ($<1 \text{ g/cm}^3$) –asociados al PE y al PP– podrían migrar y transferirse más fácilmente en el suelo (Choi *et al.*, 2021), transportándose a través de la escorrentía superficial en presencia de suelos con poros pequeños o migrando a capas profundas en suelos con poros de gran tamaño (Zhang *et al.*, 2020). Así mismo, una menor saturación del suelo favorecería la migración y abundancia de MP en profundidad (Crossman *et al.*, 2020). Por otra parte, en suelos con una mayor densidad aparente los arrastres más cuantiosos se producirían por escorrentía superficial durante eventos de intensas precipitaciones (Crossman *et al.*, 2020) –debido también a que ciertos MP flotarían al tener una densidad menor a la del agua–. Por tanto, es probable que la movilidad de los MP también se vea afectada por el contenido de humedad del suelo (Abbasi *et al.*, 2021), si bien solo fue considerado este parámetro en 3 de las publicaciones revisadas.

Si determinar las propiedades del suelo y las dimensiones de sus poros se antoja fundamental, también lo es el tamaño de los MP, el cual puede ser fruto de una progre-

siva fragmentación sustancial de desechos plásticos más grandes (Choi *et al.*, 2021) –siendo los MP más dañinos que otros desechos plásticos de mayor tamaño (Amrutha y Warriar, 2020)–. Si bien el rango de tamaño considerado en los análisis debería estar definido en cada publicación, en muchos casos existen límites de detección en laboratorio, en función del método analítico –y a su vez del tamiz o filtro utilizado–, que no permiten reportar el tamaño de los MP más pequeños. De las publicaciones revisadas, en general, se observa que el rango máximo de tamaño predominante que abarca la clasificación como MP grandes (entre 1-5 mm) lo presentan los MP detectados en suelos de uso ribereño, urbano y la totalidad de las tipologías asociadas a los suelos de uso agrícola, a excepción de los que presentan residuos o desechos plásticos superficiales (al ser menores de 0,02 mm) –quizá porque solo 1 publicación reporta datos sobre el tamaño predominante de los MP–. En consecuencia, varias son las publicaciones que indican que la capa superior del suelo es la que alberga los MP de mayor tamaño (Liu *et al.*, 2018; Van Schorhorst *et al.*, 2021). No obstante, Schell *et al.* (2022) afirman que no observan una influencia clara del tamaño, la forma y la composición de los MP en su distribución vertical en el suelo. Para el resto de usos del suelo (desértico, industrial, vía de comunicación, pastizal y forestal) el valor del tamaño máximo predominante de los MP detectados en el suelo es $\leq 1 \text{ mm}$, perteneciendo a la clasificación de MP pequeños –al igual que los detectados en la práctica totalidad de las muestras de agua subterránea–. Igualmente, se observa que los MP asociados a suelos de uso agrícola son los que presentan un rango de tamaño predominante más amplio, llegando a ser de entre 0,01 y 5 mm. En el caso de los MP de suelos desérticos, el rango de tamaño predominante está comprendido entre 0,1-1 mm –debido, quizá, a su depósito por transporte eólico (Abbasi *et al.*, 2021)–, afirmando Razei *et al.* (2019) que MP menores de 0,1 mm pueden ser resuspendidos hacia la atmósfera. Finalmente, se aprecia una semejanza en el rango de tamaño predominante de los MP asociado a los suelos de uso ribereño (0,15-5 mm) y a los agrícolas regados con aguas residuales (0,1-3 mm), lo cual puede estar asociado al ser en ambos casos el agua el vector de transporte previo a su depósito.

La forma de los MP, asociada a su geometría, también condiciona el movimiento de los MP y su abundancia. Tal y como se indicó en la evaluación de resultados, los fragmentos asociados a desechos plásticos son la forma predominante de los MP en la práctica totalidad de los usos del suelo considerados en los que se informa sobre este parámetro, a excepción de los suelos desérticos –donde predominan las fibras (Abbasi *et al.*, 2021)–. Ello puede ser debido a que el depósito atmosférico se considera una fuente de fibras en ambientes continentales (Zhang y Liu, 2018), destacando más en aquellos suelos en los que aparentemente no tendría por qué existir una marcada contaminación por MP –como podría ser el caso de los de uso forestal o los agrícolas de control (Choi *et al.*, 2021; Schell *et al.*, 2022)–. En los suelos de uso agrícola tratados con lodos de depuración o regados con aguas residuales la presencia de fibras también queda patente (Scheurer

y Bigalke, 2018; Ding *et al.*, 2020; Weber y Opp, 2020), lo cual concuerda, al igual que se mencionó para su composición química predominante, con su origen primigenio por el lavado de textiles –llegando posteriormente el agua asociada a la EDAR–. En origen, estas fibras también podrían liberarse en zonas residenciales durante el lavado de ropa, llegando además a cursos fluviales, al igual que MP procedentes de otras fuentes, y depositándose en suelos de llanura aluvial en episodios de inundaciones (Amrutha y Warriar 2020; Chen *et al.*, 2020). Por otra parte, el movimiento de las fibras a través de medios porosos implica una mayor complejidad con respecto a otras formas geométricas, especialmente cuanto mayor sea su longitud (Engdahl, 2018) –lo que favorecería su retención dentro de la matriz y dificultaría su migración–. Lo mismo ocurre en acuíferos kársticos por la presencia de superficies irregulares asociadas a la presencia de fracturas y grietas (Panno *et al.*, 2019). No obstante, las fibras son la forma predominante en las publicaciones revisadas asociadas a aguas subterráneas, siendo además, a diferencia de en suelos, la poliamida (PA) el compuesto químico predominante en dos de las publicaciones. Por último, los MP con forma de película predominan especialmente en suelos agrícolas con presencia de acolchado plástico, lo cual se corroboró al coincidir en color y composición química con los empleados en origen, tal y como ya se mencionó anteriormente. La presencia de MP cuya forma predominante sean microesferas o espumas parece escasa, únicamente asociada a suelos agrícolas o suburbanos.

Como se ha indicado anteriormente, la distribución vertical de los MP en los suelos no siempre es uniforme, pudiendo también influir en ella múltiples factores, como las prácticas agrícolas (profundidad de arado o de siembra), la bioturbación (Yu *et al.*, 2021), la presencia de grietas en el terreno o de discontinuidades, conductos o sumideros en las rocas –pudiendo constituir vías de acceso preferente hacia las aguas subterráneas–. Por ello, resulta chocante la disparidad existente en las publicaciones revisadas asociada a los incrementos de profundidad y a la profundidad máxima de muestreo considerada en suelos, siendo esta de: i) 5 cm en suelos de uso desértico o asociados a vías de comunicación; ii) 10 cm en suelos de uso industrial, pastizal, urbano o forestal; iii) 15 cm en suelos agrícolas regados con aguas residuales, o iv) 20 cm en suelos agrícolas con presencia de residuos o desechos plásticos superficiales. Por tanto, sería fundamental estandarizar los incrementos de profundidad en intervalos fijos para así poder realizar comparaciones, dado que en la mayor parte de las publicaciones asociadas a los usos del suelo anteriormente enumerados solo se ha caracterizado la presencia de MP en la capa superficial –siendo muy probable su presencia en capas más profundas–. Ello se fundamenta en que en publicaciones revisadas asociadas a otros usos del suelo en las que se ha alcanzado una mayor profundidad de muestreo la máxima abundancia de MP se encontraba, por ejemplo: i) a 20-30 cm en suelos de llanura aluvial (Weber y Opp, 2020); ii) a 100-120 cm en un perfil asociado a suelos agrícolas con presencia de invernaderos (Sa'adu y Farsang, 2022), o iii) a 20-30

cm en suelos agrícolas con presencia de acolchado plástico (Zhang *et al.*, 2020).

Tal y como se ha indicado ya en varias ocasiones, los MP pueden infiltrarse desde el suelo y parece que también llegar hasta las aguas subterráneas. Por tanto, todo lo enumerado hasta ahora (potenciales fuentes de MP en los suelos y propiedades del suelo y de los MP) es fundamental para comprender su presencia en los acuíferos. No obstante, como se ha extraído de las publicaciones revisadas, pueden existir otros mecanismos de ingreso de los MP a las aguas subterráneas, como puede ser a partir de efluentes de tanques sépticos, fugas del alcantarillado, conexión desde superficie al acuífero subyacente, etc. Pese a que Mintenig *et al.* (2019) plantean que no tendría por qué haber MP asociados a la construcción de una perforación tras el purgado de la misma, los autores de este trabajo hemos observado lo contrario. Durante nuestra experiencia laboral, en más de una ocasión –y en piezómetros previamente purgados de los que ya se habían tomado muestras en anteriores campañas–, hemos detectado a simple vista la presencia de desechos plásticos aparentemente asociados a la tubería de PVC instalada, al tener su mismo color (azul). Su origen podría estar asociado a las imperfecciones de la ranuración (a veces realizada manualmente mediante serrado) o a la instalación de la misma. Por tanto, para este tipo de estudios de MP en aguas subterráneas sería recomendable la toma de muestras en piezómetros con entubación metálica.

Como se ha comprobado en las publicaciones revisadas, y también ha sido expuesto entre otros por Abbasi *et al.* (2021), existen grandes diferencias en lo que respecta a la metodología de muestreo (número de muestras, profundidad, herramientas, almacenamiento o cantidad) y la técnica analítica empleada en buena parte de los trabajos, lo cual también puede haber influido en la variación de la abundancia asociada a las concentraciones de MP detectadas. Por ello, algunos autores como Van Schothorst *et al.* (2021) ya reclamaron una regulación, tanto para las campañas de monitoreo como para la cuantificación analítica de los MP, que garantice unos estándares de calidad. Por ejemplo, en el caso de los suelos, sería recomendable en cada sitio de muestreo: i) tomar una muestra compuesta a partir de muestras simples (Han *et al.*, 2019); ii) utilizar una herramienta metálica –cuyo uso ha sido mayoritario en las publicaciones revisadas–, y iii) el almacenamiento de la muestra tras su recolección en un recipiente con ausencia de composición plástica, siendo mayoritariamente empleados los de acero inoxidable, aluminio o vidrio. En el caso de las aguas subterráneas, se ha comprobado que tampoco existe una metodología de muestreo estandarizada, dado que se han empleado diversas herramientas para la toma de muestras, varias tipologías de almacenamiento tras su toma y un amplio rango en lo que respecta a los volúmenes de agua muestreados y/o procesados –los cuales oscilaron entre 1 y 1000 litros–. En este sentido, Mintenig *et al.* (2019) afirman que cuando se espera un bajo número de MP, se requieren grandes volúmenes de muestra para generar resultados representativos, espe-

cialmente teniendo en cuenta que normalmente la distribución de los MP en agua no es homogénea. No obstante, otro aspecto fundamental en este tipo de estudios es evitar la contaminación cruzada, para lo que suele ser habitual utilizar ropa de algodón, realizar blancos de control, réplicas de muestras, limpiar el material con agua ultrapura, etc.

La técnica analítica mayoritaria utilizada para la identificación de los MP es la FTIR (μ -ATR), tanto en las publicaciones asociadas a suelos (60%) como a aguas subterráneas (57%). Ello puede deberse a la versatilidad que ofrece, al permitir identificar el tipo de polímero, su forma, su tamaño (generalmente $>0,01$ mm) y la concentración asociada al recuento de MP. No obstante, se observa que en las publicaciones más recientes revisadas (de 2019 hasta la actualidad), tanto en suelos (17%) como en aguas subterráneas (14%), se ha empezado a aplicar la tecnología Raman, que permite además identificar MP de hasta 0,001 mm. Esta fue la técnica utilizada en la publicación en la que se reporta la mayor concentración promedio de MP (410.000 MP/kg) y el máximo valor cuantificado (690.000 MP/kg), siendo fundamental en todos los casos no utilizar cantidades muy pequeñas de muestra durante el análisis que puedan motivar un efecto pepita (Ljung *et al.*, 2018). En este sentido, también llama la atención el que se obtuviera un valor de 0 mg/kg en alguna muestra asociada a suelos agrícolas, tanto abonados con lodos de depuración en Dinamarca (Vollertsen y Hansen, 2017) como con presencia de acolchado plástico en China (Zhang *et al.*, 2020), utilizándose en ambos casos la FTIR como técnica analítica. En el caso de la identificación de MP en suelos, también se utilizó la microscopía óptica en 6 publicaciones (17%). Si bien esta técnica parece adecuada en MP mayores de 2 mm (Weber y Opp, 2020), se pueden cometer errores si se pretenden identificar MP de hasta 0,1 mm. Con respecto a la Py-GC/MS, utilizada en 1 publicación de las revisadas en suelos (3%) y en otra en aguas subterráneas (14 %), tiene la ventaja de abarcar un mayor rango de tamaños (incluyendo nanoplásticos) y de reportar el contenido por peso, pero la desventaja de que no es capaz de determinar la forma, el tamaño y el número de partículas. Además, en 1 publicación de las revisadas en suelos (3%) se utilizó TOF-SIMS y LDIR en otra en aguas subterráneas (14 %), lo cual implica que deben establecerse métodos analíticos estandarizados para la identificación de MP que permitan la comparación entre los resultados de cada investigación (Vollertsen y Hasen, 2017).

Horton *et al.* (2017) proponen que es más realista reportar el contenido de MP por peso, al igual que posteriormente Corriadini *et al.* (2019) o Dierkes *et al.* (2019). Sin embargo, en el 73,5% de las publicaciones revisadas se informa de los resultados como MP/kg en suelos y en el 100% como partículas/l en aguas subterráneas –sin considerar que en ambos medios hubo 1 publicación en la que no se reportan resultados–. Por otra parte, Schell *et al.* (2022) ponían de manifiesto las diferencias que podrían existir entre las concentraciones asociadas al recuento de MP y las estimadas basadas en la masa, reportándose los

resultados en ambas unidades en 6 de las publicaciones revisadas en suelos. Todo ello evidencia la ausencia de un protocolo estandarizado para reportar el contenido de MP (Van der Berg *et al.*, 2020; Van Schothorst *et al.*, 2021).

De todo lo anteriormente enumerado puede deducirse que la variabilidad en la metodología utilizada en el muestreo y análisis de MP en cada uno de los trabajos podría condicionar también la elevada variabilidad en las concentraciones detectadas, lo cual dificulta la realización de comparaciones. De hecho, las mayores concentraciones las han reportado 3 estudios que incluyen, en cada uno de los mismos, casos asociados a diferentes usos del suelo (Vollertsen y Hansen, 2017; Zhang y Liu, 2018; Zhou *et al.*, 2019), lo que pudiera sugerir que su metodología identificase una mayor concentración de MP independientemente del uso del suelo. Teniendo en cuenta este hecho y atendiendo a los órdenes de magnitud en las concentraciones y al número de casos de estudio, parece que las mayores concentraciones de MP se encuentran más frecuentemente en suelos agrícolas, observándose puntualmente concentraciones muy elevadas en dos suelos forestales y en un suelo urbano, si bien estas concentraciones puntuales coinciden con los estudios citados anteriormente que reportaban, en general, las mayores concentraciones. Para poder realizar afirmaciones más robustas, sería necesario efectuar un mayor número de trabajos que aborden usos del suelo diferentes a los agrícolas, ya que, como se indicaba al inicio, casi el 70% de los casos extraídos analizan suelos de uso agrícola –aglutinando el resto de usos del suelo identificados poco más del 30% restante–. Por otro lado, para ahondar en la fuente de entrada de MP, hay varios casos en suelos agrícolas en los que hay múltiples fuentes, por lo que es necesario efectuar más trabajos con suelos representativos que consigan discernir entre las prácticas realizadas para confirmar lo identificado en este estudio.

Conclusiones

A partir de 56 casos que abordan la presencia de MP en suelos, extraídos de 35 publicaciones, se concluye que algo más de dos tercios de los mismos están asociados a suelos de uso agrícola, por lo que se pone de manifiesto la necesidad de investigar con más detalle la presencia de MP, además, en suelos dedicados a otros usos. Por otra parte, en la mayoría de los trabajos revisados, queda patente una relación entre las fuentes de potencial contaminación (puntuales y/o difusas) asociadas a los usos del suelo y la presencia de MP, en base a su cantidad, composición química predominante, color o forma característica según el uso del suelo. Así mismo, más de un tercio del total de los casos extraídos se ubican en suelos de China, identificando el desequilibrio existente a nivel mundial en lo relativo al número de investigaciones realizadas en los suelos de cada país. En lo que respecta a la presencia de MP en aguas subterráneas, se antoja como prioritario su estudio en detalle, dado que el número de trabajos existentes es muy limitado, incluso comparado con el número de publicaciones que abordan la presencia de MP en suelos.

Por otra parte, ha quedado patente la necesidad de

establecer una metodología estandarizada de muestreo, tanto en suelos como en aguas subterráneas, dada la diversidad de herramientas, recipientes de almacenamiento, cantidades de muestra o protocolos de control de calidad utilizados en las publicaciones revisadas. Así mismo, en el caso de los suelos, se considera fundamental estandarizar los incrementos de profundidad de muestreo en intervalos fijos para así poder realizar comparaciones, dado que en la mayor parte de las publicaciones revisadas asociadas a un gran número de usos del suelo (desértico, vías de comunicación, industrial, pastizal, urbano, forestal y agrícolas regados con aguas residuales o con presencia de residuos o desechos plásticos superficiales) solo se ha caracterizado la presencia de MP en la capa superficial –siendo muy probable su presencia también en capas más profundas–. Por otra parte, en lo relativo a la abundancia y migración de los MP, se ha evidenciado la importancia de considerar parámetros físicos o mecánicos de los MP (densidad o resistencia a la tracción) y también del suelo (textura, estructura, humedad, porosidad o el tamaño de los poros), así como la influencia de las variables climáticas. Hay que destacar que son escasas las publicaciones revisadas que han tenido en cuenta la conjunción de los parámetros anteriormente enumerados.

Con el fin de poder realizar comparaciones, también es necesario adoptar un protocolo analítico estandarizado que, partiendo de un mismo límite de detección, permita identificar el tamaño, forma, color, composición química y abundancia de los MP, reportando los resultados en una misma unidad normalizada. Teniendo en cuenta toda la bibliografía analizada en este trabajo, la utilización de mg/kg sería una buena forma de normalizar la cantidad de MP, sin embargo, es necesario conocer también los rangos de tamaños y formas de esos MP para poder realizar comparaciones precisas. Las técnicas analíticas que reportan en mg/kg son técnicas complejas que no determinan tamaños y formas, pero donde la identificación del polímero está bastante consolidada. No obstante, la cuantificación de la masa de los polímeros todavía requiere de desarrollo e investigación, ya que las partículas expuestas a condiciones ambientales en muestras reales están alteradas y, esa alteración, puede interferir en la cuantificación de la masa. Esto implica que estas técnicas solo sirvan para realizar semicuantificaciones y no se puedan utilizar los valores como absolutos. Por otro lado, para poder trabajar con partículas/kg es necesario que se definan rangos de tamaños y formas para que todos los trabajos reporten los resultados siguiendo un criterio común. Por tanto, la selección de una u otra unidad no es una decisión sencilla, requiere de un criterio común y va más allá del alcance de este trabajo. Por último, es necesario establecer cuanto antes unos valores de exposición a los MP según las concentraciones ambientales encontradas que permitan, junto con otros estudios de efectos, evaluar el riesgo para la salud humana y/o la protección de los ecosistemas.

Agradecimientos y financiación

Los autores agradecen a la editora principal, a Teresa Sánchez-García y a una revisión anónima las aportaciones

realizadas para mejorar este trabajo. La presente investigación no ha recibido ayudas específicas provenientes de agencias del sector público, sector comercial o entidades sin ánimo de lucro.

Contribución de autores/as

Elaboración del trabajo, tablas y figuras: RAB. PlanTEAMIENTO y directrices para la investigación, supervisión, revisión y mejora del manuscrito: VMH y RM.

Abreviaturas

Para facilitar la lectura de este trabajo, en la Tabla 6 se especifica el significado de las abreviaturas utilizadas relativas a las técnicas de identificación analítica y a la composición química de los MP.

Referencias

- Abbasi, S., Turner, A., Hoseini, M., Amiri, H., 2021. Microplastics in the Lut and Kavir deserts, Iran. *Environmental Science & Technology*, 55(9): 5993-6000. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c00615>
- Allen, S., Allen, D., Phoenix, V.R., Le Roux, G., Durántez Jiménez, P., Simonneau, A., Binet, S., Galop, D., 2019. Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment. *Nature Geoscience*, 12(5): 339–344. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0335-5>
- Amrutha, K., Warriar, A.K., 2020. The first report on the source-to-sink characterization of microplastic pollution from a riverine environment in tropical India. *The Science of the Total Environment*, 739: 140377. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140377>
- Arthur, C., Baker, J., Bamford, H., 2009. Proceedings of the International Research Workshop on the Occurrence, Effects and Fate of Microplastic Marine Debris. NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-30, University of Washington Tacoma, Tacoma, 49 p.
- Beriot, N., Peek, J., Zornoza, R., Geissen, V., Huerta Lwanga, E., 2021. Low density-microplastics detected in sheep faeces and soil: A case study from the intensive vegetable farming in Southeast Spain. *The Science of the Total Environment*, 755(Parte 1): 142653. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142653>
- Bläsing, M., Amelung, W., 2018. Plastics in soil: Analytical methods and possible sources. *The Science of the Total Environment*, 612: 422-435. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.086>
- Blettler, M.C.M., Ulla, M.A., Rabuffetti, A.P., Garelo, N., 2017. Plastic pollution in freshwater ecosystems: macro-, meso-, and microplastic debris in a floodplain lake. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(11): 581. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6305-8>
- BOE, 2022. Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular. *Boletín Oficial del Estado*, 85 (9 de abril de 2022): 48578- 48733.
- Boucher, J., Friot, D., 2017. Primary Microplastics in the Oceans: A Global Evaluation of Sources. IUCN, Gland, Switzerland, 43 p. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2017.01.en>
- Chen, Y., Leng, Y., Liu, X., Wang, J., 2020. Microplastic pollution in vegetable farmlands of suburb Wuhan, central China. *Environmental Pollution*, 257: 113449. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113449>

- Cho, R., 2011. Our oceans: A plastic soup. <https://news.climate.columbia.edu/2011/01/26/our-oceans-a-plastic-soup/> (11/03/2024).
- Choi, Y.R., Kim, Y.-N., Yoon, J.-H., Dickinson, N., Kim, K.-H., 2021. Plastic contamination of forest, urban, and agricultural soils: a case study of Yeosu City in the Republic of Korea. *Journal of Soils and Sediments*, 21(5): 1962-1973. <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02759-0>
- Cohen, K.M., Finney, S.C., Gibbard, P.L., Fan, J.-X., 2013, actualizada: 2023-04. The ICS International Chronostratigraphic Chart. *Episodes*, 36: 199-204. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2013/v36i3/002>
- Corradini, F., Meza, P., Eguiluz, R., Casado, F., Huerta-Lwanga, E., Geissen, V., 2019. Evidence of microplastic accumulation in agricultural soils from sewage sludge disposal. *The Science of the Total Environment*, 671: 411-420. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.368>
- Crossman, J., Hurley, R.R., Futter, M., Nizzetto, L., 2020. Transfer and transport of microplastics from biosolids to agricultural soils and the wider environment. *The Science of the Total Environment*, 724: 138334. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138334>
- Dierkes, G., Lauschke, T., Becher, S., Schumacher, H., Földi, C., Ternes, T., 2019. Quantification of microplastics in environmental samples via pressurized liquid extraction and pyrolysis-gas chromatography. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 411(26): 6959-6968. <https://doi.org/10.1007/s00216-019-02066-9>
- Ding, L., Zhang, S., Wang, X., Yang, X., Zhang, C., Qi, Y., Guo, X., 2020. The occurrence and distribution characteristics of microplastics in the agricultural soils of Shaanxi Province, in north-western China. *The Science of the Total Environment*, 720: 137525. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137525>
- DOUE, 2019. Directiva (UE) 2019/904 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 5 de junio de 2019, relativa a la reducción del impacto de determinados productos de plástico en el medio ambiente. *Diario Oficial de la Unión Europea*, 155 (12 de junio de 2019): 1- 19. <https://doi.org/10.56398/ajacieda.00274>
- Du, C., Liang, H., Li, Z., Gong, J., 2020. Pollution characteristics of microplastics in soils in southeastern suburbs of Baoding city, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(3): 845. <https://doi.org/10.3390/ijerph17030845>
- ECHA, 2018. Intentionally added microplastics likely to accumulate in terrestrial and freshwater environments. <https://echa.europa.eu/-/intentionally-added-microplastics-likely-to-accumulate-in-terrestrial-and-freshwater-environments> (13/03/2024).
- Engdahl, N.B., 2018. Simulating the mobility of micro-plastics and other fiber-like objects in saturated porous media using constrained random walks. *Advances in Water Resources*, 121: 277-284. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.08.011>
- Eriksen, M., Cowger, W., Erdle, L.M., Coffin, S., Villarrubia-Gómez, P., Moore, C.J., Carpenter, E.J., Day, R.H., Thiel, M., Wilcox, C., 2023. A growing plastic smog, now estimated to be over 170 trillion plastic particles afloat in the world's oceans-Urgent solutions required. *PloS One*, 18(3): e0281596. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281596>
- Feng, S., Lu, H., Tian, P., Xue, Y., Lu, J., Tang, M., Feng, W., 2020. Analysis of microplastics in a remote region of the Tibetan Plateau: Implications for natural environmental response to human activities. *The Science of the Total Environment*, 739: 140087. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140087>
- Fuller, S., Gautam, A., 2016. A procedure for measuring microplastics using pressurized fluid extraction. *Environmental Science & Technology*, 50(11): 5774-5780. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00816>
- Ganesan, M., Nallathambi, G., Srinivasalu, S., 2019. Fate and transport of microplastics from water sources. *Current science*, 117(11): 1879. <https://doi.org/10.18520/cs/v117/i11/1879-1885>
- GESAMP, 2015. Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment. GESAMP, London, 96 p.
- GESAMP, 2016. Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: part two of a global assessment. GESAMP, London, 220 p.
- Gigault, J., Halle, A.T., Baudrimont, M., Pascal, P.-Y., Gauffre, F., Phi, T.-L., El Hadri, H., Grassl, B., Reynaud, S., 2018. Current opinion: What is a nanoplastic?. *Environmental Pollution*, 235: 1030-1034. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.024>
- Gündoğdu, S., Mihai, F.-C., Fischer, E.K., Blettler, M.C.M., Turgay, O.C., Akça, M.O., Aydoğan, B., Ayat, B., 2023. Micro and nano plastics in groundwater systems: A review of current knowledge and future perspectives. *Trends in Analytical Chemistry: TRAC*, 165: 117119. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117119>
- Han, X., Lu, X., Vogt, R.D., 2019. An optimized density-based approach for extracting microplastics from soil and sediment samples. *Environmental Pollution*, 254 (Part A): 113009. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113009>
- Hartmann, N.B., Hüffer, T., Thompson, R.C., Hassellöv, M., Verschoor, A., Daugaard, A.E., Rist, S., Karlsson, T., Brennholt, N., Cole, M., Herrling, M.P., Hess, M.C., Ivleva, N.P., Lusher, A.L., Wagner, M., 2019. Are we speaking the same language? Recommendations for a definition and categorization framework for plastic debris. *Environmental Science & Technology*, 53(3): 1039-1047. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05297>
- Horton, A.A., Walton, A., Spurgeon, D.J., Lahive, E., Svendsen, C., 2017. Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities. *The Science of the Total Environment*, 586: 127-141. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.190>
- Huang, Y., Liu, Q., Jia, W., Yan, C., Wang, J., 2020. Agricultural plastic mulching as a source of microplastics in the terrestrial environment. *Environmental Pollution*, 260: 114096. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114096>
- Huerta Lwanga, E., Mendoza Vega, J., Ku Quej, V., Chi, J. de L.A., Sanchez Del Cid, L., Chi, C., Escalona Segura, G., Gertsen, H., Salánki, T., van der Ploeg, M., Koelmans, A.A., Geissen, V., 2017. Field evidence for transfer of plastic debris along a terrestrial food chain. *Scientific Reports*, 7(1): 14071. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14588-2>
- Isari, E.A., Papaioannou, D., Kalavrouziotis, I.K., Karapanagioti, H.K., 2021. Microplastics in agricultural soils: A case study in cultivation of watermelons and canning tomatoes. *Water*, 13(16): 2168. <https://doi.org/10.3390/w13162168>
- Jeyasanta, K.I., Sathish, N., Patterson, J., Edward, J.K.P., 2020. Macro-, meso- and microplastic debris in the beaches of Tuticorin district, Southeast coast of India. *Marine Pollution Bulletin*, 154: 111055. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111055>
- Klein, S., Dimzon, I.K., Eubeler, J., Knepper, T.P., 2018. Analysis, occurrence, and degradation of microplastics in the aqueous environment. En: *The Handbook of Environmental Chemistry* (Wagner, M., Lambert, S., Eds.). Springer

- International Publishing, 58: 51-67.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-61615-5_3
- Lau, W.W.Y., Shiran, Y., Bailey, R.M., Cook, E., Stuchtey, M.R., Koskella, J., Velis, C.A., Godfrey, L., Boucher, J., Murphy, M.B., Thompson, R.C., Jankowska, E., Castillo Castillo, A., Pilditch, T.D., Dixon, B., Koerselman, L., Kosior, E., Favoino, E., Gutberlet, J., Palardy, J.E., 2020. Evaluating scenarios toward zero plastic pollution. *Science*, 369(6510): 1455-1461.
<https://doi.org/10.1126/science.aba9475>
- Li, R., Liu, Y., Sheng, Y., Xiang, Q., Zhou, Y., Cizdziel, J.V., 2020. Effect of prothioconazole on the degradation of microplastics derived from mulching plastic film: Apparent change and interaction with heavy metals in soil. *Environmental Pollution*, 260: 113988.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.113988>
- Liu, M., Lu, S., Song, Y., Lei, L., Hu, J., Lv, W., Zhou, W., Cao, C., Shi, H., Yang, X., He, D., 2018. Microplastic and mesoplastic pollution in farmland soils in suburbs of Shanghai, China. *Environmental Pollution*, 242: 855-862.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.07.051>
- Ljung, E., Olesen, K.B., Andersson, P.G., Fältström, E., Vollertsen, J., Wittgren, H.B., Hagman, M., 2018. Mikroplaster i kretsloppet. Svenskt Vatten Utveckling, Bromma, 43 p.
- Lv, W., Zhou, W., Lu, S., Huang, W., Yuan, Q., Tian, M., Lv, W., He, D., 2019. Microplastic pollution in rice-fish co-culture system: A report of three farmland stations in Shanghai, China. *The Science of the Total Environment*, 652: 1209-1218. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.321>
- Meixner, K., Kubiczek, M., Fritz, I., 2020. Microplastic in soil—current status in Europe with special focus on method tests with Austrian samples. *AIMS Environmental Science*, 7(2): 174-191. <https://doi.org/10.3934/environsci.2020011>
- Mintenig, S.M., Löder, M.G.J., Primpke, S., Gerdts, G., 2019. Low numbers of microplastics detected in drinking water from ground water sources. *The Science of the Total Environment*, 648: 631-635.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.178>
- Nizzetto, L., Futter, M., Langaas, S., 2016. Are Agricultural Soils Dumps for Microplastics of Urban Origin?. *Environ. Sci. Technol.*, 50: 10777-10779.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04140>
- Panno, S.V., Kelly, W.R., Scott, J., Zheng, W., McNeish, R.E., Holm, N., Hoellein, T.J., Baranski, E.L., 2019. Microplastic contamination in Karst groundwater systems: Microplastic contamination in Karst groundwater systems. *Ground Water*, 57(2): 189-196. <https://doi.org/10.1111/gwat.12862>
- Piehl, S., Leibner, A., Löder, M.G.J., Dris, R., Bogner, C., Laforsch, C., 2018. Identification and quantification of macro- and microplastics on an agricultural farmland. *Scientific Reports*, 8(1): 17950.
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-36172-y>
- Plastics Europe, 2022. Plásticos – Situación en 2022.
<https://plasticseurope.org/es/knowledge-hub/plasticos-situacion-en-2022/> (11/03/2024).
- Rezaei, M., Abbasi, S., Pourmahmood, H., Oleszczuk, P., Ritsema, C., Turner, A., 2022. Microplastics in agricultural soils from a semi-arid region and their transport by wind erosion. *Environmental Research*, 212(Pt B): 113213.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113213>
- Rezaei, M., Riksen, M.J.P.M., Sirjani, E., Sameni, A., Geissen, V., 2019. Wind erosion as a driver for transport of light density microplastics. *The Science of the Total Environment*, 669: 273-281. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.382>
- Rillig, M. C., Ziersch, L., Hempel, S., 2017. Microplastic transport in soil by earthworms. *Scientific Reports*, 7: 1362.
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-01594-7>
- Ripken, C., Kotsifaki, D.G., Nic Chormaic, S., 2021. Analysis of small microplastics in coastal surface water samples of the subtropical island of Okinawa, Japan. *The Science of the Total Environment*, 760: 143927.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143927>
- Sa'adu, I., Farsang, A., 2022. Greenhouse farming as a source of macroplastic and microplastics contamination in agricultural soils: a case study from Southeast-Hungary. *Agrokemia es Talajtan*, 71(1): 43-57.
<https://doi.org/10.1556/0088.2022.00120>
- Samandra, S., Johnston, J.M., Jaeger, J.E., Symons, B., Xie, S., Currell, M., Ellis, A.V., Clarke, B.O., 2022. Microplastic contamination of an unconfined groundwater aquifer in Victoria, Australia. *The Science of the Total Environment*, 802: 149727. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149727>
- Schell, T., Hurley, R., Buenaventura, N.T., Mauri, P.V., Nizzetto, L., Rico, A., Vighi, M., 2022. Fate of microplastics in agricultural soils amended with sewage sludge: Is surface water runoff a relevant environmental pathway?. *Environmental Pollution*, 293: 118520.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118520>
- Scheurer, M., Bigalke, M., 2018. Microplastics in Swiss floodplain soils. *Environmental Science & Technology*, 52(6): 3591-3598. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b06003>
- Selvam, S., Jesuraja, K., Venkatramanan, S., Roy, P.D., Jeyanthi Kumari, V., 2021. Hazardous microplastic characteristics and its role as a vector of heavy metal in groundwater and surface water of coastal south India. *Journal of Hazardous Materials*, 402: 123786. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123786>
- Souza Machado, A.A., Kloas, W., Zarfl, C., Hempel, S., Rillig, M.C., 2018. Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. *Global Change Biology*, 24(4): 1405-1416.
<https://doi.org/10.1111/gcb.14020>
- Su, S., Zhou, S., Lin, G., 2021. Existence of microplastics in soil and groundwater in Jiaodong Peninsula. *E3S web of conferences*, 251: 02045.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125102045>
- Thompson, R.C., Olsen, Y., Mitchell, R.P., Davis, A., Rowland, S.J., John, A.W.G., McGonigle, D., Russell, A. E., 2004. Lost at sea: Where is all the plastic?. *Science*, 304(5672): 838.
<https://doi.org/10.1126/science.1094559>
- Uwamungu, J.Y., Wang, Y., Shi, G., Pan, S., Wang, Z., Wang, L., Yang, S., 2022. Microplastic contamination in soil agroecosystems: A review. *Environmental Advances*, 9: 100273.
<https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100273>
- Van den Berg, P., Huerta-Lwanga, E., Corradini, F., Geissen, V., 2020. Sewage sludge application as a vehicle for microplastics in eastern Spanish agricultural soils. *Environmental Pollution*, 261: 114198.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114198>
- Van Schothorst, B., Beriot, N., Huerta Lwanga, E., Geissen, V., 2021. Sources of light density microplastic related to two agricultural practices: The use of compost and plastic mulch. *Environments*, 8(4): 36.
<https://doi.org/10.3390/environments8040036>
- Vollertsen, J., Hansen, A.A., 2017. Microplastic in Danish wastewater: Sources, occurrences and fate. *The Danish Environmental Protection Agency*, København, 54 p.
- Weber, C. J., Opp, C., 2020. Spatial patterns of mesoplastics and coarse microplastics in floodplain soils as resulting from land use and fluvial processes. *Environmental Pollution*, 267: 115390. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115390>

- Yu, Y., Flury, M., 2021. Current understanding of subsurface transport of micro- and nanoplastics in soil. *Vadose Zone Journal*, 20: e20108. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20108>
- Yu, L., Zhang, J., Liu, Y., Chen, L., Tao, S., Liu, W., 2021. Distribution characteristics of microplastics in agricultural soils from the largest vegetable production base in China. *The Science of the Total Environment*, 756: 143860. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143860>
- Yu, H., Zhang, Y., Tan, W., Zhang, Z., 2022. Microplastics as an emerging environmental pollutant in agricultural soils: Effects on ecosystems and human health. *Frontiers in environmental science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.855292>
- Zalasiewicz, J., Waters, C.N., Ivar do Sul, J.A., Corcoran, P.L., Barnosky, A.D., Cearreta, A., Edgeworth, M., Gałuszka, A., Jeandel, C., Leinfelder, R., McNeill, J.R., Steffen, W., Summerhayes, C., Waprich, M., Williams, M., Wolfe, A.P., Yonan, Y., 2016. The geological cycle of plastics and their use as a stratigraphic indicator of the Anthropocene. *Anthropocene*, 13: 4-17. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2016.01.002>
- Zhang, G.S., Liu, Y.F., 2018. The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwestern China. *The Science of the Total Environment*, 642: 12-20. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.004>
- Zhang, S., Liu, X., Hao, X., Wang, J., Zhang, Y., 2020. Distribution of low-density microplastics in the mollisol farmlands of northeast China. *The Science of the Total Environment*, 708: 135091. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135091>
- Zhang, P., Yuan, Y., Zhang, J., Wen, T., Wang, H., Qu, C., Tan, W., Xi, B., Hui, K., Tang, J., 2023. Specific response of soil properties to microplastics pollution: A review. *Environmental Research*, 232: 116427. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116427>
- Zhou, Y., Liu, X., Wang, J., 2019. Characterization of microplastics and the association of heavy metals with microplastics in suburban soil of central China. *The Science of the Total Environment*, 694: 133798. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133798>
- Zhou, B., Wang, J., Zhang, H., Shi, H., Fei, Y., Huang, S., Tong, Y., Wen, D., Luo, Y., Barceló, D., 2020. Microplastics in agricultural soils on the coastal plain of Hangzhou Bay, east China: Multiple sources other than plastic mulching film. *Journal of Hazardous Materials*, 388: 121814. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121814>
- Zhou, Q., Zhang, H., Fu, C., Zhou, Y., Dai, Z., Li, Y., Tu, C., Luo, Y., 2018. The distribution and morphology of microplastics in coastal soils adjacent to the Bohai Sea and the Yellow Sea. *Geoderma*, 322: 201-208. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.02.015>

MANUSCRITO RECIBIDO: 31-03-2024

REVISIÓN RECIBIDA: 20-05-2024

ACEPTACIÓN DEL MANUSCRITO REVISADO: 10-06-2024

NORMAS DE PUBLICACIÓN EN LA REVISTA DE LA SOCIEDAD GEOLÓGICA DE ESPAÑA

La Revista de la Sociedad Geológica de España es una **publicación semestral de acceso abierto** de la Sociedad Geológica de España que da cabida a trabajos de investigación científica, en español o en inglés, en relación con cualquier área de las Ciencias de la Tierra. Los trabajos de geología de la Península Ibérica y áreas próximas son particularmente bienvenidos, además de los relacionados con la Historia de la Geología, el Patrimonio Geológico, y temáticas similares. Los trabajos de revisión o recopilación de información de temas específicos con una perspectiva científica actualizada, también serán valorados para su posible publicación en la revista. Los trabajos deberán ser originales, es decir, no publicados (o no aceptados) en otra revista, sea íntegramente o por partes y/o en otro idioma. Todos los artículos serán revisados, al menos, por dos especialistas y por el Comité Editorial.

PREPARACIÓN DEL MANUSCRITO

Organización del texto

El texto se elaborará siguiendo la Plantilla RSGE (formato DOC), disponible <https://recyt.fecyt.es/index.php/RevSocGeoEsp/index>. El texto seguirá este orden: 1) Título en español e inglés. 2) Nombre y apellidos de autores/as. 3) Dirección postal y electrónica completa de autores/as. 4) Resumen en español e inglés, de 200 palabras para el idioma del manuscrito, de 400 en el segundo idioma. 5) Palabras clave (3 a 5, en español y en inglés). 6) Título corto para el encabezamiento, en el idioma del manuscrito. 7) Texto principal. Los encabezamientos del texto principal se ordenarán jerárquicamente en tres tipos, sin numeración alguna: **Apartado**, *Subapartado de primer orden* y *Subapartado de segundo orden*, con punto y seguido el texto. En el texto, se incluirán sólo citas de trabajos publicados o en prensa, con el apellido de autores/as y año de publicación en orden cronológico (ej., Pérez, 2004; Mateos y Jiménez, 2007; Teixell *et al.*, 2007). Las figuras y tablas se indicarán de forma correlativa (ej., Fig. 1, Fig. 2, Figs. 3-5, Tabla 1, Tabla 2...etc.). 8) Agradecimientos y financiación. Se citarán los agradecimientos personales y a las personas que han revisado el trabajo. Además, es necesario indicar las fuentes de financiación del estudio. 9) Contribución de autores/as. Se especificará, en un párrafo corto, la contribución individual de cada persona. 10) Referencias. Deberán ir ordenadas alfabéticamente por el apellido de autores/as y cronológicamente, en el caso de que se repitan. Deberán indicarse las referencias que dispongan de DOI con un enlace tipo <https://doi.org/...> (según los ejemplos indicados abajo). 11) Pies de figuras y tablas.

Arce Durante, J.M., Fernández Tomas, J., Monteserín López, V., 1977. Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 24 (Mondónedo). IGME, Madrid.

Díaz Martínez, E., 1988. El Cretácico Inferior del sector de Jubera (norte de la Sierra de Los Cameros, La Rioja). II Congreso Geológico de España, Comunicaciones, 1: 67-70.

Lobo, F.J., Hernández-Molina, F.J., Somoza, L., Díaz del Río, V., 2001. The sedimentary record of the post-glacial transgression on the Gulf of Cadiz continental shelf (Southwest Spain). *Marine Geology*, 178: 171-195. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(01\)00176-1](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(01)00176-1)

Ortega Gironés, E., Gil Ibarguchi, J.I., 1983. La Unidad de Malpica-Tuy. En: Libro jubilar, J.M. Ríos. Geología de España, Tomo I, (J. Comba, Ed.). IGME, Madrid, 430-440.

Parra, J., 2001. Análisis paleoambiental de los sistemas continentales y el vulcanismo asociado del Neógeno del Valle del Cajón en los Andes Occidentales (Catamarca, República Argentina). Tesis Doctoral, Univ. Huelva, 272 p.

Woodroffe, C.D., 2002. Coasts. Cambridge University Press, New York, 623 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9781316036518>

Figuras y tablas

Para el diseño de tablas y figuras (incluyendo dibujos y fotografías) se tendrá en cuenta el tamaño de caja de la revista (248 x 170 mm). Las figuras y tablas pueden ocupar la anchura de una columna (82 mm) o de una página (170 mm). Las tablas irán en formato DOC. El tamaño de letra deberá ser como mínimo de 7 pts. y la anchura de línea oscilará entre 0,3 y 1,5 pts. Las partes de una figura se denotarán con letras mayúsculas (A, B, C, etc.). Los dibujos deben tener una buena calidad en cuanto a tramas, tonos de grises y leyendas. Las fotografías deben ser claramente visibles, tener contraste suficiente y acabado brillante, y deben contener escalas u objetos que sirvan de referencia.

Extensión del manuscrito

Como norma general, la extensión del manuscrito, incluyendo texto y espacio equivalente de figuras y tablas, no podrá exceder 20 páginas. Una página de la Plantilla RSGE (en fuente Times New Roman 10, a espacio simple) equivale a unas 1000 palabras aproximadamente.

ENVÍO Y REVISIÓN DEL MANUSCRITO

El manuscrito será enviado electrónicamente a la Editora Principal (Nieves López-González) a través de la plataforma de Envío de Artículos en <https://sociedadgeologica.org/publicaciones/revista-sge> en 2 documentos: 1) el texto en formato DOC (*Plantilla RSGE*), y 2) las figuras y tablas en un documento PDF y numeradas correlativamente. En la plantilla, se deberá proporcionar el nombre, institución y correo electrónico de 5 posibles revisores/as. Existe la posibilidad de vetar a personas, siempre que esté debidamente justificado.

La Editora Principal valorará la adecuación del manuscrito a las normas de publicación. Si el trabajo se ajusta a las normas, será enviado para su revisión a 2 especialistas y, en caso de discrepancia, se remitirá a una tercera persona. Teniendo en cuenta la opinión de las personas que han revisado el trabajo, la Editora Principal decidirá si el trabajo es aceptado o requiere de modificaciones menores, moderadas o importantes, o si es rechazado. En caso de que sea aceptado con modificaciones, el manuscrito original deberá ser corregido siguiendo las observaciones de los/las revisores/as. La nueva versión del documento será enviada a la Editora Principal, quien valorará la necesidad de una segunda revisión o, en su caso, lo aceptará definitivamente.

MANUSCRITO ACEPTADO

Una vez aceptado el manuscrito se enviará por correo electrónico a la Editora Principal (nieves.lopez@ieo.csic.es), la versión final de las tablas (en formato DOC) y de las figuras (en formato JPG o TIFF), en archivos individuales. Si se usa el formato TIFF y la figura sólo contiene dibujos de líneas, la resolución deberá ser de 600 ppp. Si la figura tiene trama de grises o es en color, la resolución deberá ser de 300 ppp. Los/las autores/as recibirán: 1) las pruebas de imprenta para la corrección de erratas, sin que se acepten modificaciones del texto original, y 2) el documento de Transferencia del Copyright a la Sociedad Geológica de España. Para resolver cualquier duda pueden contactar con la Editora Principal por correo electrónico: nieves.lopez@ieo.csic.es.

PUBLICATION RULES OF THE JOURNAL OF THE GEOLOGICAL SOCIETY OF SPAIN

The Journal of the Geological Society of Spain is an **open access biannual publication** of the Geological Society of Spain. This journal publishes original research contributions in Spanish or English that cover all Earth Science topics, in particular those concerning the Iberian Peninsula and nearby areas, as well as those related to the History of Geology, Geological Heritage, and similar topics. Review papers or compilations on specific topics with an up-to-date scientific perspective will also be considered for possible publication in the journal. The submitted manuscripts must be original research papers that have not been published (or not accepted) totally or partially elsewhere, in any language. All the papers will be reviewed by a minimum of two referees and by the Editorial Board.

MANUSCRIPT PREPARATION

Text organization

The text is to be formatted using the **RSGE Template** (DOC format), which is available <https://recyt.fecyt.es/index.php/RevSoc-GeoEsp/index>. It should be organized as follow: 1) Title in English and Spanish. 2) Name and surnames of authors. 3) Full postal and electronic addresses of authors. 4) Abstract in Spanish and English, not exceeding 200 words in the language of the main text, and no more than 400 words in the second language. 5) Keywords (3 to 5, in Spanish and English). 6) Short title to use as header, in the language of the main text. 7) Main text. Headings should be hierarchically sorted into three types without any numbering: **Section**, *First-order subsection* and *Second-order subsection*, with dot and followed by the text. In the main text, cite only published or in press publications. Any cited publications should be referred to the authors' surname and year of publication, arranged chronologically (e.g., Pérez, 2004; Mateos and Jiménez, 2007; Teixell *et al.*, 2007). The figures and tables must be sequential (e.g., Fig. 1, Fig. 2, Fig 3-5, Table 1, Table 2...etc.). 8) Acknowledgements and funding. Personal acknowledgements and those to the persons who have reviewed the work will be cited. In addition, it is necessary to indicate the funding sources of the study. 9) Author contributions. The individual contributions of each author must be provided in a short paragraph. 10) References. The list of references should be arranged alphabetically by authors' surnames and chronologically in case of repetition. References with a DOI should be indicated with a link such as <https://doi.org/...> (see examples below). 11) Figure and table captions.

Arce Durante, J.M., Fernández Tomas, J., Monteserín López, V., 1977. Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 24 (Mondónedo). IGME, Madrid.

Díaz Martínez, E., 1988. El Cretácico Inferior del sector de Jubera (norte de la Sierra de Los Cameros, La Rioja). II Congreso Geológico de España, Comunicaciones, 1: 67-70.

Lobo, F.J., Hernández-Molina, F.J., Somoza, L., Díaz del Río, V., 2001. The sedimentary record of the post-glacial transgression on the Gulf of Cadiz continental shelf (Southwest Spain). *Marine Geology*, 178: 171-195. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(01\)00176-1](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(01)00176-1)

Ortega Gironés, E., Gil Ibarguchi, J.I., 1983. La Unidad de Malpica-Tuy. In: Libro jubilar, J.M. Ríos. Geología de España, Tomo I, (J. Comba, Ed.). IGME, Madrid, 430-440.

Para, J., 2001. Análisis paleoambiental de los sistemas continentales y el vulcanismo asociado del Neógeno del Valle del Cajón en los Andes Occidentales (Catamarca, República Argentina). Doctoral Thesis, Univ. Huelva, 272 p.

Woodroffe, C.D., 2002. Coasts. Cambridge University Press, New York, 623 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9781316036518>

Figures and tables

The page size of the journal, 248 x 170 mm, should be considered when preparing figures (both drawings and photographs) and tables. The figures and tables can occupy either one column (82 mm width) or the whole width of the page (170 mm width). Lettering should be a minimum of 7 pt. Line widths should range from 0.3 to 1.5 pt. Tables shall be in DOC format. Figure parts should be denoted by uppercase letters (A, B, C, etc.). Line drawings must be of good quality in terms of patterns, grey tones and legends. Photographs should be clear, have good contrast and a glossy aspect, and employ some indication of scale.

Manuscript length

As a general rule, manuscripts must not exceed 20 pages, including text and the equivalent space for figures and tables. One single-spaced RSGE Template page, written with font Times New Roman 10, contains approximately 1000 words.

MANUSCRIPT SUBMISSION AND REVISION

Manuscripts should be submitted electronically through <https://sociedadgeologica.org/publicaciones/revista-sge> to the Editor-in-chief (Nieves López-González) in 2 separated files: 1) the text in DOC format (*RSGE Template*), and 2) the figures and tables in a PDF document and numbered sequentially. In the template, the name, address and email of 5 possible reviewers should be provided. When justified, opposed reviewers can be named.

The Editor-in-chief evaluates the manuscript to ensure that it follows the requirements of the journal. If the manuscript receives a positive evaluation, it will be sent for review to 2 referees, but given conflicting reviews, the manuscript will be sent to a third referee. Once revised, the Editor-in-chief will decide whether the manuscript is accepted or requires minor, moderate or major modifications, or it is rejected. If it is accepted with modifications, the original manuscript must be adapted following the reviewers' suggestions. The new version of the manuscript will be sent to the Editor-in-chief, who will assess whether there is a need for additional revisions or if it is acceptable for publication.

ACCEPTED MANUSCRIPT

Once the manuscript is accepted, the authors will send by email to the Editor-in-chief (nieves.lopez@ieo.csic.es), the final version of the tables and figures in separated files. Tables must be in DOC format and figure files must be provided as JPG or TIFF files. For TIFF format figures containing only lines drawings, a resolution of 600 dpi is required. For greyscale or colour figures, a resolution of 300 dpi is sufficient. Authors will receive: 1) the print proofs, to be checked for typesetting/editing, and 2) the Copyright Transfer to the Geological Society of Spain. Questions should be directed to the Editor-in-chief by email: nieves.lopez@ieo.csic.es.

SOCIEDAD GEOLÓGICA DE ESPAÑA

La **Sociedad Geológica de España** fue fundada en 1985 y tiene como fines la promoción, fomento y difusión del conocimiento, progreso y aplicaciones de la Geología, el asesoramiento en materia científica y educativa a las Instituciones y Entidades que lo requieran, y la representación de los intereses científicos de la comunidad geológica de España a nivel internacional. Sus miembros tienen derecho a participar en todas las actividades organizadas por la Sociedad, a optar a ocupar cualquiera de sus cargos directivos y a recibir gratuitamente las publicaciones periódicas de la Sociedad: Geogaceta y Revista de la Sociedad Geológica de España.

JUNTA DE GOBIERNO

(Presidente) **Juan Antonio Morales González**

Departamento de Ciencias de la Tierra
Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad de Huelva
Campus del Carmen, Avda. de las Fuerzas Armadas s/n, 21071 Huelva (España)
Tel: +34 959 219 815; e-mail: jmorales@dgeo.uhu.es

(Secretario) **Miguel Gómez Heras**

Departamento de Geología y Geoquímica
Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid
C/ Francisco Tomás y Valiente 7 (Módulo 06-406), 28049 Madrid (España)
Tel: +34 914 975 407; e-mail: miguel.gomezheras@uam.es

(Tesorera) **Blanca M^a Martínez García**

Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC)
C/ Ríos Rosas 23, 28003 Madrid (España)
Tel: +34 913 495 968; e-mail: blanca.martinez@igme.es

(Vicepresidenta) **Ana Ruiz Constán**

(Vicesecretario) **Ramón Casillas Ruiz**

(Secretario 2º) **José Eugenio Ortiz Menéndez**

(Vocales) **Álvaro Jiménez Berrocoso**

Ángel Salazar Rincón

Francisco Manuel Alonso Chaves

Manuel Díaz Azpiroz

Pilar Mata Campo

Pedro Huerta Hurtado

Raquel Martín Banda

SEDE ADMINISTRATIVA

Sociedad Geológica de España:
Facultad de Ciencias, Universidad de Salamanca, Plaza de la Merced s/n, 37008 Salamanca, (España)
<http://www.sociedadgeologica.org>

Suscripciones: Toda la correspondencia debe ser dirigida a la Sede Administrativa de la Sociedad. El precio de la suscripción anual es de 67 € para España y Portugal y 76 € para el resto del mundo.

REVISTA DE LA SOCIEDAD GEOLÓGICA DE ESPAÑA

Volumen 37, Número 1, (2024)

CÁNDIDO MANUEL GARCÍA CRUZ

Consideraciones históricas sobre el origen del concepto de facies sedimentaria /
Some historical regards concerning the origin of the concept of sedimentary facies ... 3

ANDRÉ SINGER, FRANCK A. AUDEMARD M., JOSÉ ANTONIO RODRÍGUEZ A. Y LUZ MARÍA RODRÍGUEZ D.
Origen y trayectoria del Departamento de Ciencias de la Tierra de FUNVISIS,
Venezuela: sus primeros 50 años (1972-2022) / *Birth and path of the FUNVISIS'*
Earth Sciences Department, Venezuela: Its first 50 years (1972-2022) 10

YASMANI CEBALLOS IZQUIERDO, JOHANSET ORIHUELA, CARLOS RAFAEL BORGES-SELLÉN
Checklist of cuban meteor-wrongs / *Listado de pseudometeoritos cubanos 32*

GERMÁN JAVIER TOMAS Y ADRIÁN JAVIER ACUÑA

Estudio preliminar de la Cuenca Austral a partir de biomarcadores obtenidos
de diversos crudos / *Preliminar study of the Austral Basin based on biomarkers*
obtained from different crude oils 45

RODRIGO ANDRÉS-BERCIANOS, VIRTUDES MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ Y RAFFAELLA MEFFE

Impacto de los usos del suelo y otros parámetros sobre la presencia de
microplásticos en el suelo y en el agua subterránea: una revisión crítica / *Impact*
of land use and other parameters on the presence of microplastics in soil and
groundwater: a critical review 56