

Aplicación del método científico al extraño caso de las rocas deslizantes (*sailing stones*) de La Mancha

Application of the scientific method to the strange case of the sailing stones from La Mancha

J.P. Rodríguez-Aranda¹, M.E. Sanz-Montero² y Ó. Cabestrero²

1 Dpto. Didáctica CC. Experimentales. Fac. Educación. Univ. Complutense Madrid. C/Rector Royo Villanova s/n. 28040-Madrid. juanparo@ucm.es

2 Dpto. Petrología y Geoquímica. Fac. Geología. Univ. Complutense Madrid. C/ José Antonio Novais, 12. 28040-Madrid (España). mesanz@ucm.es

Resumen: La comprensión del método científico por los estudiantes y la población en general es más fácil si se ilustran sus diferentes fases con ejemplos concretos. El presente trabajo muestra la metodología que se ha seguido para explicar un proceso geológico, concretamente el caso de las rocas deslizantes en las lagunas salinas de La Mancha. El fenómeno consiste en el desplazamiento por arrastre de rocas de varios kilogramos de peso sobre el fondo de las lagunas. Las piedras dejan largos surcos que pueden perdurar meses aun después de que se evapore la lámina de agua. Las fases que se han considerado para la visualización del método son: (1) observación y definición del problema, (2) análisis de datos y establecimiento de hipótesis, (3) contrastación y discusión de hipótesis y (4) determinación de conclusiones y publicación de resultados. No obstante, estas fases no son compartimentos estancos y se han interrelacionado a lo largo de la investigación. Ésta se ha llevado a cabo durante más de tres años y todavía continúa. Las conclusiones e hipótesis genéticas se han publicado en dos artículos de sendas revistas científicas especializadas y en diferentes medios para su divulgación.

Palabras clave: Método científico, fases, discusión, rocas deslizantes, lagunas salinas.

Abstract: *The comprehension of the scientific method for the students and the population in general is easier if its different steps are learned analyzing specific examples. The present work shows the process that has been followed to explain the sailing stones phenomenon in the playa lakes from La Mancha (Spain). That geological phenomenon consists of heavy rocks dragging across the lake bottom. The stones leave long grooves that may remain for months even after the water lamina evaporates. The steps that have been considered in order to visualize the method are: (1) observation and definition of the problem, (2) data analyses and formulation of hypothesis, (3) testing and discussion of hypothesis and (4) drawing conclusions and publication of results. However, these steps are not isolated and have been interrelated throughout the research. This investigation has lasted for more than three years. Main conclusions and hypotheses about the genesis were published in two scientific papers and disseminated through different mass media outlets.*

Key words: *Scientific method, step, discussion, sailing stones, playa lake.*

INTRODUCCIÓN

El método científico es el instrumento básico que utiliza la ciencia para avanzar. Así pues, resulta fundamental que los estudiantes interioricen bien cómo funciona y que la sociedad, en general, sea consciente de su existencia y utilidad. De este modo, se debe concienciar a la sociedad de que las afirmaciones científicas son el producto de un proceso elaborado, muchas veces arduo, y no de una "idea feliz" o una casualidad que ocurrió por azar (p.e. Sabino, 2006). De hecho, numerosas personas piensan que el descubrimiento de la penicilina o de determinados astros sucedió por casualidad y no son conscientes de todo el trabajo que había detrás y del que siguió a la primera observación.

La didáctica y divulgación del método científico está ligada estrechamente a los ejemplos que se utilizan

para ilustrar su comprensión (De Pablo, 2011). Cuanto más claros se encuentren los diferentes pasos de su desarrollo en un caso concreto, tanto más fácil será la asimilación del concepto. Si esto se consigue, el estudiante podrá aplicarlo más tarde a otro fenómeno distinto o similar.

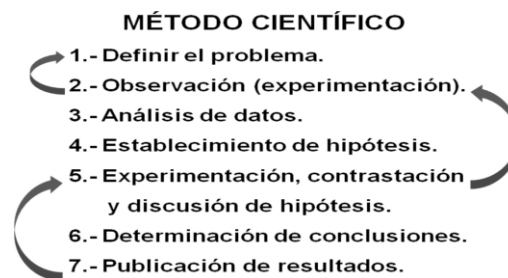


FIGURA 1. Esquema simplificado del método científico. Obsérvese cómo se puede volver atrás en el proceso. La revisión bibliográfica tiene lugar a lo largo de todo su desarrollo.

En el presente trabajo se expone cómo se ha desarrollado por los autores dicho método en el caso concreto de las rocas deslizantes de la Mancha (Sanz-Montero y Rodríguez-Aranda, 2013a; Sanz-Montero et al., 2014). Estas rocas aparecen al final de largos surcos, generalmente serpenteantes excavados sobre el fondo de lagos efímeros someros.

DESARROLLO DEL MÉTODO

Las fases de la metodología científica (Fig. 1) no son compartimentos estancos y, en muchos casos, se puede o se debe volver atrás para retomar el proceso. Así, la definición del problema suele derivar de una observación o experimentación previa. Y, después de la publicación de unos resultados concretos, si la investigación continúa, se contrastarán las conclusiones obtenidas y, frecuentemente, se realizarán nuevas observaciones para precisar, complementar o modificar las hipótesis originales publicadas. Además, paralelamente a cada una de las fases, se lleva a cabo una revisión bibliográfica a diferentes escalas dependiendo de los casos. A continuación, se exponen las diferentes fases que se realizaron en dos investigaciones sucesivas.

Investigación inicial

Observación y definición del problema.

La primera vez que se descubrieron trazas dejadas por piedras deslizantes en La Mancha fue el 28 de Diciembre de 2012, concretamente, en la laguna del Altillo Chica (Lillo, Toledo). Se iban a realizar una serie de mediciones de control (pH, salinidad, temperatura, profundidad, etc.) en la laguna dentro de un proyecto que estudiaba la biomineralización de tapices microbianos y la formación de estromatolitos y microbialitas (Rodríguez-Aranda y Sanz-Montero, 2015). Ese día se observaron decenas de trazas acabadas en rocas y otras tantas terminadas en montones de fango y tapices microbianos deformados (Fig. 2). Los investigadores no habían visto antes el fenómeno y no se lo esperaban dada la escasa lámina de agua y lo plana que era la laguna. Tenían referencias de que era un proceso muy raro y, como comprobaron por la bibliografía, sin una explicación satisfactoria.

Al día siguiente, los geólogos tomaron numerosos datos de forma detallada: fotografías, esquemas, orientaciones de trazas, muestras de sedimento, etc. Pretendían obtener evidencias de la causa que podía mover objetos de varios kilogramos de peso en un ambiente sedimentario tradicionalmente considerado de baja energía. Visitaron también otras lagunas cercanas para comprobar si el fenómeno se había producido en ellas, sin un resultado claro.

Una revisión bibliográfica indicó que el proceso se había descrito de forma detallada sólo en el Oeste de EEUU y allí se había interpretado en relación con ráfagas de viento y placas de hielo (p.e. Messina y

Stoffer, 2000). Por tanto, fueron recabados los parámetros meteorológicos de los últimos cuatro meses en dos estaciones cercanas. Asimismo, las muestras de sedimento tomadas se estudiaron mediante microscopía electrónica y difracción de rayos X.



FIGURA 2. Trazas dejadas por piedras deslizantes y tapices microbianos deformados en la laguna del Altillo Chica. Foto tomada el 28 de Diciembre de 2012.

Las lagunas del Altillo Chica, Altillo Grande y el Longar, que constituyen el humedal de Lillo, fueron monitorizadas en cuatro ocasiones más entre Enero y Junio de 2013. El 19 de Enero de 2013 tuvo lugar una ciclogénesis explosiva en la zona que no movió rocas, pero borró parcialmente las trazas anteriores.

Análisis de datos y establecimiento de hipótesis.

Las direcciones de los vientos, las orientaciones de las trazas y sus respectivas frecuencias se representaron en diagramas circulares. De este modo, se pudo establecer una relación clara entre dichos factores y determinar el momento de formación de las trazas, que ocurrió del 7 al 14 de Noviembre de 2012. Por otro lado, los datos de temperatura del aire y agua no indicaban episodios de congelación en la laguna. Las observaciones sobre el terreno y los análisis de muestras revelaron que los tapices microbianos estaban bien desarrollados y que representaban superficies de bajo rozamiento. Se precisó igualmente la relación temporal y espacial de las trazas con otras estructuras sedimentarias hidrodinámicas como *ripples* de corriente y huellas de rodadura de cantos.

Análogamente al caso del hielo, se desechó un posible movimiento de las piedras por aguas de arroyada, ya que la mayoría se habían desplazado saliendo de la laguna a contrapendiente. Asumido el viento como motor de las piedras y como causa de la fragmentación y desplazamiento de los tapices microbianos, se elaboró una hipótesis alternativa a las principales ideas propuestas en EEUU. El viento producía corrientes de agua en la laguna, aunque su profundidad fuera de unos pocos centímetros. Las corrientes, a su vez, generaban *ripples* y movían por rodadura cantos pequeños. Si la intensidad de las ráfagas era suficiente, superior a 40 km/h, podían originar el arrastre de piedras de varios kilogramos de peso, romper los tapices microbianos y desplazarlos. El movimiento de las rocas estaba favorecido por la

reducción del coeficiente de rozamiento que aportaban los tapices: mucus deslizante constituido por sustancias extracelulares (EPS), gran contenido en gases de metabolismo de bacterias (CO_2 , O_2 , H_2S) y movimiento solidario del tapiz transportando rocas encima. Esta hipótesis se consolidó en Abril de 2013. Además, se estableció que las rocas procedían de las orillas de la laguna (Paleozoico y Mioceno) y del propio substrato mioceno y plioceno del lago efímero; no obstante, los agricultores de los campos colindantes han podido introducir en el vaso lacustre algunas piedras de forma artificial.

Contrastación y discusión de hipótesis.

La hipótesis fue contrastada mediante la comparación con las previamente enunciadas por otros autores. Como las que decían que las piedras viajaban dentro o sobre placas de hielo, o bien empujadas por ellas. Se revisó nuevamente la bibliografía y se vio que procesos similares a los observados ocurrían en zonas costeras. También se revisaron las fotografías y se comprobó que las trazas se realizaron en un medio saturado en agua, dadas las estructuras de deformación del sedimento, por ejemplo, rebordes o *levees* a los lados de los surcos dejados por las piedras en su desplazamiento. Se llevaron a cabo experimentos de laboratorio con fuentes de aire y diferentes objetos sobre distintas superficies para comprobar cómo se vencían las fuerzas de rozamiento. Los objetos que se movían con más facilidad se hallaban sobre trapos que asemejaban tapices microbianos. Analizados los datos climáticos de la zona, se vio que los episodios de formación de trazas parecían estar ligados a tormentas de finales del otoño e invierno, pues eran los momentos donde había agua en la laguna y los vientos soplaban con más fuerza y en las direcciones más favorables. Por tanto, se planteó una nueva campaña de observaciones entre Noviembre de 2013 y Marzo de 2014.

Determinación de conclusiones y publicación.

Se consideró conveniente publicar los resultados de la investigación, ya que estaban suficientemente fundamentados. El artículo se mandó a la revista *Sedimentary Geology* el 2 de julio de 2013. El 22 de octubre ya se encontraba disponible en internet y en diciembre la revista lo publicó en papel (Sanz-Montero y Rodríguez-Aranda, 2013a). También en diciembre se publicó un artículo de divulgación sobre el tema (Sanz-Montero y Rodríguez-Aranda, 2013b).

Contrastación y discusión de hipótesis.

Se estableció contacto con la Dra. Messina, que había trabajado en EEUU (Messina y Stofer, 2000), para que diera su opinión sobre la hipótesis propuesta. Dicha investigadora manifestó su acuerdo con las ideas sugeridas y corroboró la presencia de tapices microbianos en el Valle de la Muerte (EEUU).

Segunda investigación

Fases de observación y definición del problema.

En esta segunda investigación se pretendía precisar qué factores influían en el transporte de rocas. Fundamentalmente, se quería saber la manera de vencer el coeficiente de rozamiento estático para iniciar el desplazamiento de objetos, ya que el rozamiento dinámico estaba reducido por la presencia de tapices microbianos. Por tanto, se pretendía observar y filmar, si era posible, el movimiento de piedras durante una tormenta. Una vez consultadas las previsiones meteorológicas para episodios de ciclogénesis explosivas, se visitó la laguna del Altillo Chica el 4 y el 28 de enero y el 10 de febrero de 2014. En dichas fechas se realizaron observaciones y mediciones antes, durante y después de las tormentas. No se pudo observar el movimiento de rocas pesadas, aunque sí de tamaño gravilla, menores de 3 cm, y cómo éstas generaron marcas de corriente. Asimismo, se midieron velocidades de viento y corrientes de agua, se fotografió y filmó la formación de estructuras sedimentarias y se tomaron muestras de agua para el cálculo de sólidos en suspensión. Vientos de 45 km/h generaban corrientes de 7 km/h en una lámina de agua de apenas 5 cm de profundidad.

Análisis de datos y establecimiento de hipótesis.

No se pudo observar directamente el movimiento de ninguna roca, probablemente, porque la duración de las ráfagas de viento superiores a 40 km/h no fue suficiente, porque el agua estaba muy turbia y dificultaba las observaciones y/o porque las piedras se movieron en otras zonas del cuerpo de agua distintas a las que se estaban monitorizando.

Las piedras que sobresalían unos centímetros sobre el nivel del agua de la laguna eran socavadas a su alrededor por las corrientes, de forma similar a lo que ocurre con los pilares de los puentes, debido a las turbulencias que se localizan en su proximidad. Al comparar esas marcas de socavación con las depresiones que se hallan al inicio de las trazas se notó que eran muy parecidas en morfología y en las estructuras sedimentarias asociadas (Fig. 3). Se concluyó, entonces, que la excavación alrededor de las rocas que sobresalían del agua las preparaba para ser desplazadas por las corrientes inducidas por el viento.

Otra hipótesis novedosa postulada a partir de los datos obtenidos es que en este tipo de ambientes se pueden formar con relativa frecuencia estructuras hidrodinámicas de alta energía. De este modo, se debe tener cuidado al interpretar la presencia de facies que indican alta velocidad de corriente dentro de las rocas antiguas depositadas en medios lacustres someros, aparentemente de baja energía.

Contrastación y discusión de hipótesis.

Las conclusiones obtenidas se contrastaron mediante bibliografía con los experimentos llevados a cabo en el laboratorio por distintos autores y en ambientes sedimentarios actuales (véase Sanz-Montero et al., 2015). Por otro lado, se revisaron de nuevo todas

las observaciones de 2012, 2013 y 2014 para comparar huellas de socavamiento alrededor de piedras y los puntos de inicio de las trazas de rocas deslizantes. El resultado fue satisfactorio.



FIGURA 3. Comparación entre una huella de socavamiento en media luna alrededor de una roca generada en una tormenta y una depresión localizada en el punto inicial de una traza. Se han marcado con flechas los lugares con acumulación de gravilla.

Determinación de conclusiones y publicación.

En agosto de 2014 se envió un artículo a la revista *Earth Surface Processes and Landforms*. El 16 de diciembre ya se podía consultar en internet y en Marzo de 2015 se publicó en la revista. A raíz de dicho trabajo, varios medios de información (periódicos, radio, televisión, revistas *on line* de divulgación científica) se hicieron eco del fenómeno. En Febrero de 2016, se publicó un artículo de divulgación sobre el tema (Sanz-Montero et al., 2016a).

Contrastación y discusión de hipótesis.

Desde diciembre de 2012 hasta marzo de 2016 se han registrado al menos 10 episodios diferentes de formación de trazas de rocas deslizantes en las lagunas de Lillo. En diciembre de 2014 se observaron claramente por primera vez trazas recién formadas en la laguna del Altillo Grande, aparte de en el Altillo Chica. En enero de 2015, durante una tormenta en El Longar, se comprobó como una roca de unos 0,8 kg se arrastró 30 cm. De todos estos datos se deduce que el fenómeno no es tan raro si las condiciones son las adecuadas. En el verano de 2015 se grabaron diferentes vídeos en la zona de *splash* de playas asturianas donde se observaba la formación de socavamiento por el oleaje alrededor de cantos y su posterior deslizamiento. Proceso similar al que se propone para el desplazamiento de rocas.

Por otro lado, en junio de 2015 se realizó un viaje de trabajo a Racetrack Playa en el Valle de la Muerte para comparar las trazas que allí se encuentran con las que se generan en las lagunas manchegas. El resultado indica que ambos tipos de trazas son muy similares, aunque en EEUU se mueven comúnmente rocas de más de 20 kg y en La Mancha de hasta 8 kg.

Además, se ha escrito una réplica (Sanz-Montero et al., 2016b) a un artículo publicado en la revista *Aeolian Research* en el que se proponía al viento como único agente en el movimiento de las rocas de Racetrack Playa, sin considerar las corrientes de agua ni el hielo.

CONSIDERACIONES FINALES

En el presente artículo se ha temporalizado y se ha descrito de manera real el proceso del método científico para el caso concreto de las rocas deslizantes de La Mancha. El proceso es complejo si se considera la investigación en conjunto pues las diferentes fases teóricas se entrelazan. No obstante, la esencia del método se mantiene y los pasos de la investigación se ajustan generalmente a los estipulados. La ilustración del método con un ejemplo concreto permite una mejor comprensión de sus fases.

AGRADECIMIENTOS

Ministerio de Economía y Competitividad, proyectos CGL2011-26781 y CGL2015-66455-R.

REFERENCIAS

- De Pablo, M.A. (2011): Aprendiendo geología mediante la investigación en el aula. *Actas I Congr. Docentes C. Nat. Ed.: Santillana*: 139-144.
- Messina, P. y Stoffer, P. (2000): Terrain analysis of the Racetrack Basin and the sliding rocks of Death Valley. *Geomorphology*, 35: 253-265.
- Rodríguez-Aranda, J.P. y Sanz-Montero, M.E. (2015): Tapices microbianos: los organismos que fabrican estromatolitos. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 23.2: 206-217.
- Sabino, C.A. (2006): *Caminos de la ciencia: una introducción al método científico*. Ed.: Lumen Humanitas. 208 p.
- Sanz-Montero, M.E., Rodríguez-Aranda, J.P. (2013a): The role of microbial mats in the movement of stones on playa lake surfaces. *Sedimentary Geology*, 298: 53-64.
- Sanz-Montero, M.E. y Rodríguez-Aranda, J.P. (2013b): Piedras que se mueven solas en una laguna manchega. *Unidad Inf. Científica y Divulg. Invest. OTRI, UCM*. 3 p.
- Sanz-Montero, M.E., Cabestrero, Ó. y Rodríguez-Aranda, J.P. (2015): Sedimentary effects of flood-producing windstorms in playa lakes and their role in the movement of large rocks. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40-7: 864-875.
- Sanz-Montero M.E., Cabestrero Ó., Rodríguez-Aranda J.P. (2016a): ¿Qué causa el deslizamiento de piedras (sailing stones) sobre el fondo de lagos? Desde La Mancha al Valle de la Muerte. *Unidad Inf. Científica y Divulg. Invest. OTRI, UCM*. 3 p.
- Sanz-Montero M.E., Cabestrero Ó., Rodríguez-Aranda J.P. (2016b): Comments on Racetrack Playa: Rocks moved by wind alone. *Aeolian Research*, 20: 196-197.