

Paleomagnetismo: Lo que las rocas saben (y cuentan) sobre el campo magnético de la Tierra

Silvana Geuna ¹

¹IGEBA (Universidad de Buenos Aires), visitante en IBIGEO.

Desde que los mapas del mundo fueron completándose gracias al conocimiento que el hombre iba adquiriendo de él, en sus largos recorridos por mar y tierra, comenzó a llamar la atención de los más observadores, el hecho de que algunos continentes parecían tener formas complementarias con las de sus vecinos, tal como si fueran piezas desperdigadas de un rompecabezas sin armar. El primero en traducir esta noción a una teoría científica con cierto fundamento fue el meteorólogo alemán Alfred Wegener, en 1912. La teoría de la deriva continental de Wegener considera que los continentes actuales habían estado unidos en el pasado, en una única gran masa continental que denominó "Pangea", y que entre esa Pangea y la actual configuración del planeta, había mediado el desplazamiento de los continentes como si fueran balsas flotando sobre el fondo de los océanos (Fig. 1).

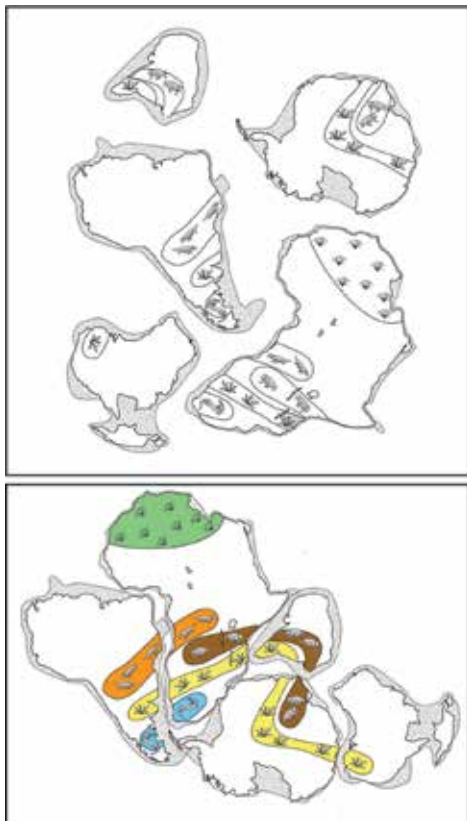


Figura 1: El "rompecabezas" de Wegener. La forma de las masas continentales ajusta por sus bordes como si fueran piezas que alguna vez estuvieron unidas. Las evidencias fósiles de animales y plantas que vivieron en los distintos continentes en épocas pasadas, también indican una antigua conexión. En el panel inferior, el antiguo continente Gondwana, parte de Pangea. Dibujos de USGS, "Wegener puzzling's evidence".

La forma en que “ajustan” los contornos de las piezas del rompecabezas continental no fue la única prueba utilizada por Wegener para su teoría, pero era la más fuerte y evidente hasta para el ojo más desconfiado. El ajuste entre las grandes piezas es muy bueno. Ahora bien, ¿qué ocurre con las piezas pequeñas? ¿y con las que tienen formas demasiado regulares, que ajustarían casi en cualquier lugar?

El problema de las muchas piezas de pequeños tamaños y formas parecidas, es el desafío que afronta un geólogo al intentar reconstruir las posiciones de las masas continentales muy antiguas, aquellas de los tiempos en que los continentes no tenían las mismas formas que vemos hoy. Del mismo modo que con los rompecabezas, es necesario (y más fácil y seguro) buscar pistas en el dibujo del rompecabezas, más que en la forma exterior de las piezas (Fig. 2).

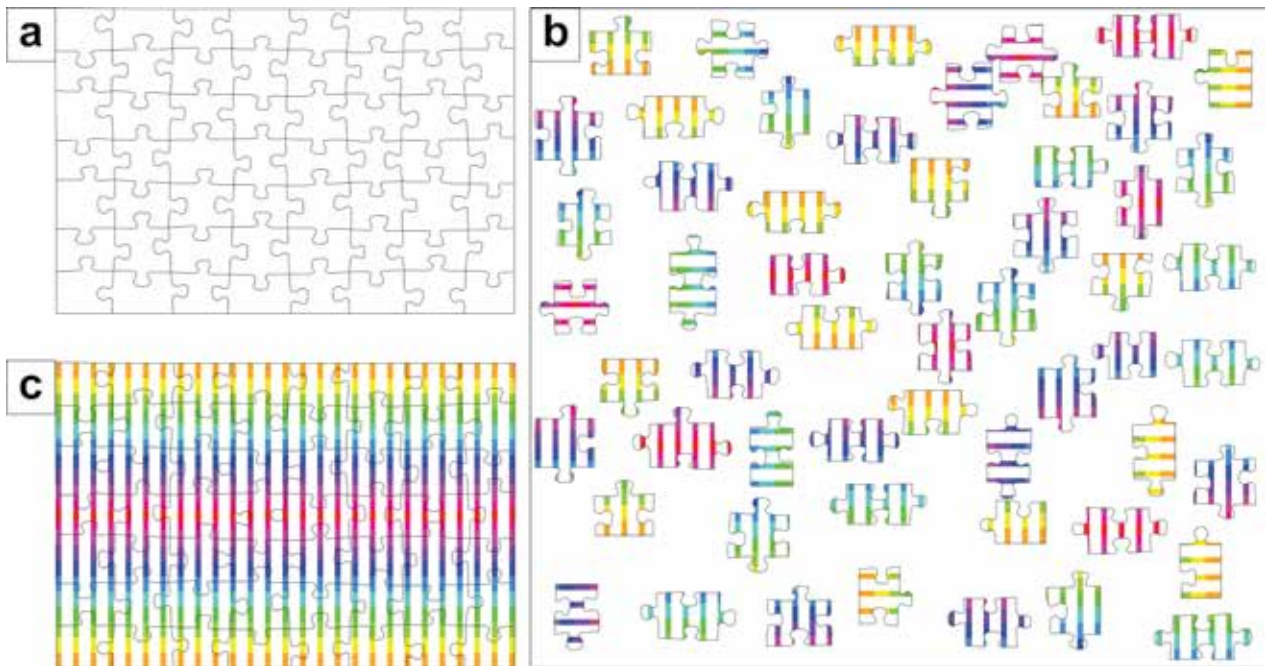


Figura 2: La forma exterior de las piezas no siempre es una pista suficiente para armar el rompecabezas, como en (a), especialmente porque las piezas (continentes) pueden haber cambiado de forma con el tiempo. Contar con un dibujo como el de (b) y (c) ayuda para establecer la dirección arriba/debajo de cada pieza, y a qué fila corresponde cada una. El vector MRN impreso en las rocas cumple la función de este dibujo: la declinación del vector indica cuál era la dirección norte/sur de cada pieza, y la inclinación del vector, a qué latitud se encontraba (en qué “fila”).

En las placas tectónicas, el “dibujo” pueden ser rasgos geológicos visibles en las rocas, en las escalas más diversas; por ejemplo, cadenas montañosas o elementos lineales como sistemas de fallas, que continúan en varias “piezas” o placas, o ciertos tipos de roca o fósiles característicos que están presentes sólo en determinadas placas. De hecho, Wegener usó esta clase de evidencias también para sostener su teoría en 1912.

Hay otro “dibujo” que no es visible en las rocas, pero que puede detectarse realizando un estudio sistemático sobre ellas, que incluye mediciones de sus propiedades magnéticas en el laboratorio. Se trata de la magnetización remanente, que, como veremos a continuación, representa el registro que conserva la roca de cómo era el vector “campo magnético terrestre” (CMT) en el momento en que se formó. Algo así como si pudiéramos leer la orientación de la aguja de una brújula, grabada en la roca misma.

Esto es así porque algunos minerales presentes en las rocas, contienen partículas con momento magnético generado por el movimiento de sus electrones desapareados (que podríamos asimilar a imanes, pero a escala subatómica), y estos momentos magnéticos tienen la capacidad, bajo ciertas circunstancias, de alinearse en la dirección del campo magnético de la Tierra (ver El ferromagnetismo).

El ferromagnetismo. Sólo algunos elementos contienen electrones desapareados en su estructura atómica; estos son los metales de transición como hierro (Fe), níquel (Ni) y cobalto (Co). De todos ellos, el hierro es el más abundante y que forma compuestos de ocurrencia común en la naturaleza. En su movimiento, los electrones desapareados generan un momento magnético. Los numerosos momentos magnéticos presentes en los minerales con hierro se disponen aleatoriamente, salvo que la estructura cristalina del mineral que contiene al hierro tenga cierto apretamiento y geometría particular. Los minerales que tienen esta estructura cristalina peculiar son “ferromagnéticos”; los más comunes en las rocas son:

- o Magnetita, Fe_3O_4 (óxido de hierro en estado Fe^{2+} y Fe^{3+}), y su variedad con Ti (titanio), titanomagnetita
- o Maghemita, Fe_2O_3 (óxido de hierro en estado Fe^{3+} , con estructura cúbica), y su variedad con Ti, titanomaghemita
- o Hematita, Fe_2O_3 (óxido de hierro en estado Fe^{3+} , con estructura hexagonal), y su variedad con Ti, titanohematita o hemoilmenita
- o Goethita, $\text{FeO}(\text{OH})$ (hidróxido de hierro en estado Fe^{3+})
- o Pirrotina, Fe_7O_8 (sulfuro de hierro en estado Fe^{2+} , es ferromagnética solo su variedad monoclinica)

Por ser fuertemente magnéticos, los minerales ferromagnéticos se subdividen en sectores o “dominios magnéticos” cuyas direcciones de magnetización son distintas y tienden a cancelarse mutuamente. El estado “multidominio” es otra característica de los materiales ferromagnéticos, y atenta contra la posibilidad de que exista una magnetización del mineral, que sea paralela a la del campo magnético terrestre. Sólo podrán magnetizarse en la dirección del campo magnético terrestre aquellas partículas ferromagnéticas que sean muy pequeñas, lo suficientemente pequeñas como para no dividirse en dominios magnéticos. Para la magnetita, esto implica tamaños inferiores a la décima de micrón. Es decir, sólo una pequeña parte de los minerales ferromagnéticos podrá magnetizarse en la dirección del campo magnético terrestre; por otra parte, apenas una pequeñísima proporción de estos minerales dentro de las rocas es suficiente como para que actúen como “grabador” de esa dirección. Sólo es necesario contar con un instrumento suficientemente sensible como para medir la señal magnética generada por esos pocos minerales presentes.

Antes de ser los objetos sólidos y fríos que vemos hoy en la superficie terrestre, las rocas pasaron por un proceso de formación que involucró diversos estados. O dicho de otro modo, las rocas no siempre fueron rocas. Las rocas sedimentarias (pelitas, areniscas, conglomerados, calizas) fueron sedimentos sueltos que luego sufrieron consolidación (“diagénesis”), o bien sustancias químicas que alguna vez precipitaron a partir de una solución fluida; las rocas ígneas, por otra parte (basaltos, riolitas, granitos, gabros), fueron alguna vez magma fundido en proceso de cristalización y enfriamiento. A lo largo de todos esos procesos de formación de rocas, los momentos magnéticos de las partículas (es decir, sus “imanes microscópicos”, ver El ferromagnetismo), fueron perdiendo movilidad y/o capacidad de adaptarse y reproducir la dirección del campo magnético terrestre. Partículas cuyos momentos podían ser paralelos al campo magnético terrestre en la roca caliente o inconsolidada, perdieron movilidad a medida que la roca continuaba con su proceso de formación. En cierto momento crítico, la dirección en la que se encontraban alineados los momentos magnéticos se “fossilizó”. Esto significa que las rocas, una vez formadas, son capaces de recordar cuál era la dirección del campo magnético terrestre en el momento en el que se formaron, en que se convirtieron en roca.

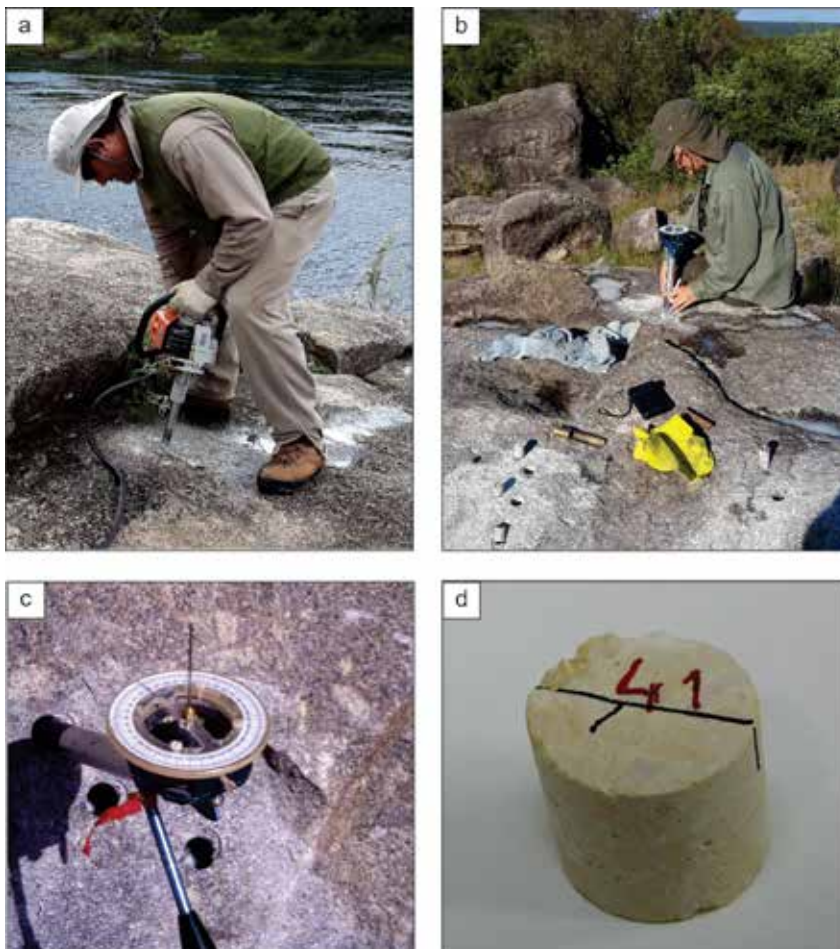


Figura 3: Se obtienen fragmentos de los afloramientos rocosos, ya sea mediante una perforadora portátil, como en (a) o con maza y cortafierro. La orientación en que se encontraba el fragmento se registra con una brújula y un inclinómetro (b, c). Finalmente, se obtienen testigos de roca como el que se observa en (d), de forma cilíndrica y tamaño de una pulgada.

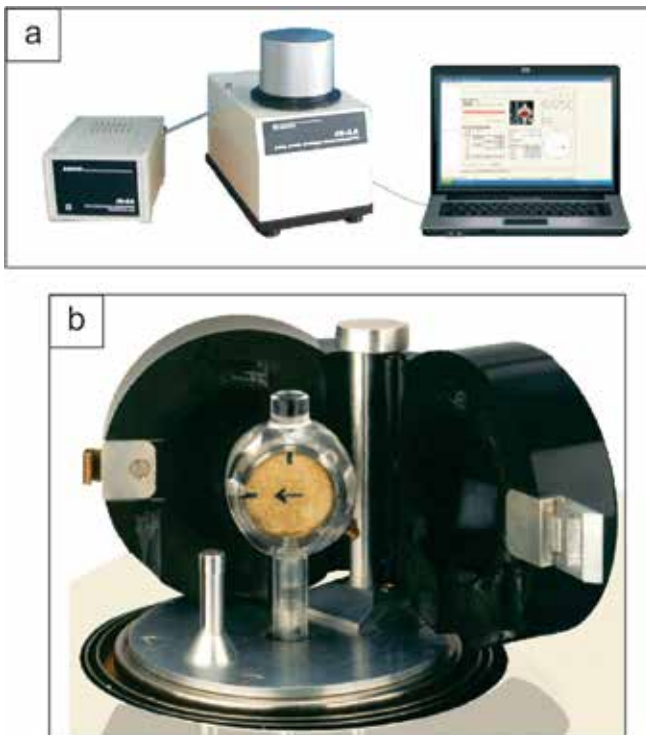


Figura 4: Magnetómetro rotativo JR6. En (b) se observa un detalle del receptáculo en el que se colocan los testigos de roca. Este está aislado del campo magnético externo, por lo que se mide exclusivamente la magnetización remanente del espécimen de roca.

Con posterioridad, a lo largo del tiempo geológico, la roca consolidada experimentará repetidamente movimientos de ascenso, descenso, rotación y traslación, debido a las fuerzas tectónicas que operan sobre la corteza terrestre y la deforman a diversas escalas. Incluso los continentes se desplazan a lo largo de la superficie del globo, tal como postulara Wegener. El vector magnético “fossilizado” dentro de la roca acompañará todos esos movimientos, y actuará como un marcador que permite reconstruir la posición original de la roca, antes de ser deformada y/o desplazada. Como en la superficie terrestre existen rocas de muy diversas edades, desde tan antiguas como el Arqueano (4000 millones de años) hasta tan recientes como las formadas por volcanes activos en tiempos históricos, esto significa que nuestro conocimiento del registro del campo magnético en las rocas abarca todo ese gran espacio temporal.

El estudio de la memoria magnética (o “remanencia magnética”, o “magnetismo remanente”) de las rocas se conoce como Paleomagnetismo. Para hacer un estudio paleomagnético es necesario tomar muestras de los afloramientos rocosos, anotando cuidadosamente la posición que tenía cada muestra en el propio afloramiento (Fig. 3). Las muestras se remueven y transportan hasta el laboratorio, donde un magnetómetro especialmente diseñado es capaz de medir las propiedades del vector “remanencia magnética” de cada muestra, es decir, su orientación y módulo (Fig. 4). Llamaremos a este vector “magnetismo remanente natural” o MRN.

Si el vector MRN permaneció inalterado desde la formación de la roca, entonces será aproximadamente paralelo a la dirección del paleomeridiano, y tendrá una inclinación acorde con la paleolatitud. Es decir, el vector será vertical si fue “grabado” cuando la roca en ciernes se encontraba en el polo, o será horizontal si estaba en el ecuador (ver el CMT). A la latitud de Salta, por ejemplo, el campo magnético terrestre promedio es un vector que apunta hacia el norte (paralelo al meridiano), con una inclinación de unos 43 grados, hacia arriba.

El CMT: El campo magnético terrestre se comporta como si fuera producto de un gigantesco imán situado en el centro de la Tierra, y cuyos polos están alineados con la dirección del eje de rotación terrestre (Fig. B). Por eso los polos magnéticos coinciden aproximadamente con los polos geográficos, y las líneas de fuerza del campo magnético siguen una trayectoria desde el sur hacia el norte, groseramente paralelas a los meridianos. Las líneas de fuerza cortan a la superficie del globo con distintos ángulos, dependiendo de la latitud: son verticales en los polos, horizontales en el ecuador, y oblicuas en latitudes intermedias. El vector “campo magnético terrestre (CMT)” es tangente a las líneas de fuerza del campo en cada lugar; su orientación en el espacio es definida con el ángulo de declinación (el ángulo que forma la proyección del vector en la horizontal, con el norte geográfico) y el de inclinación (el ángulo que se forma con el plano horizontal). Ahora bien, el “imán” responsable del CMT (que en realidad es el metal líquido en movimiento en el núcleo externo terrestre) no es fijo ni estacionario, sino que cambia con el tiempo. En consecuencia, el polo magnético cambia lentamente su posición en una especie de bamboleo, que se denomina “variación secular” porque ocurre a lo largo de los años y siglos. Sin embargo, si consideramos el camino experimentado por el polo a lo largo de un tiempo suficientemente largo, vemos que la trayectoria discurre alrededor del polo geográfico, y que éste último coincide con la dirección del polo magnético promediado en el tiempo.

Dicho de otro modo, si analizamos el registro del campo magnético terrestre en una película de varios miles de años de duración, y no en una fotografía instantánea, veremos que los polos, ecuador y meridianos magnéticos coinciden con los geográficos, es decir, con el sistema de referencia que usamos en nuestros mapas. Por ese motivo, los estudios paleomagnéticos se basan en el estudio de una sucesión de rocas suficientemente extensa, como para que su formación abarque varios miles de años. Para ver la película en lugar de la foto, el estudio paleomagnético se basa en muchas, muchas muestras de roca.

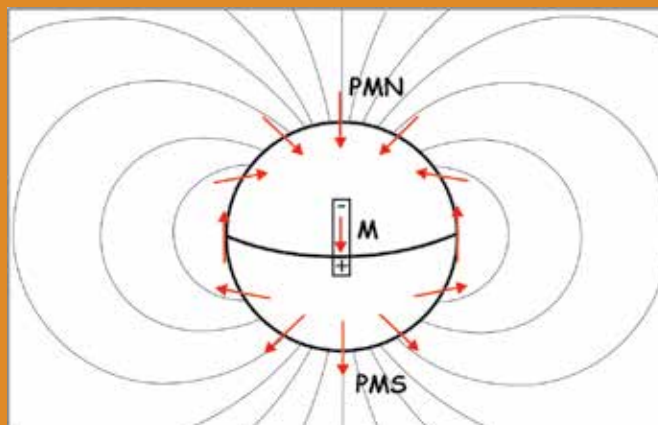


Figura B: El campo magnético de la Tierra en una vista ecuatorial, en su estado de polaridad “normal” (el que tiene actualmente). Las flechas rojas representan la dirección del vector campo magnético. Esta dirección es tangente a las líneas de fuerza del campo, se dirige siempre hacia el norte, y es la dirección que adoptaría la aguja de una brújula con completa libertad de movimiento. PMN y PMS son los polos magnéticos norte y sur, respectivamente. “M” es el momento del imán imaginario situado en el centro de la Tierra, capaz de generar un campo magnético tal como el que se dibuja. En realidad no es un imán lo que existe en el núcleo terrestre, sino metal líquido en movimiento. En los períodos de polaridad opuesta a la actual o “reversa”, PMN y PMS invierten su posición, y por lo tanto los vectores cambian de sentido. Figura adaptada de Cox y Hart (1986).

Pero ¿qué pasa si las rocas se formaron hace mucho tiempo? Lo más probable es que hayan sido movidas de su posición original. El movimiento puede incluir desplazamiento de miles de kilómetros, si el tiempo transcurrido fue suficiente para que la “deriva” continental haya sido grande.

Por otra parte, existen evidencias de que el polo magnético (promedio) siempre estuvo aproximadamente en el mismo sitio, salvando las variaciones seculares y las inversiones de su polaridad. Entonces, si el polo está en el mismo sitio, pero la dirección del vector MRN de la roca no coincidiera con el vector promedio del campo magnético terrestre actual del lugar, entonces la diferencia en declinación e inclinación entre ambos vectores puede usarse como medida del desplazamiento experimentado por la roca (ver el CMT).

Figura 5. Mapa de las provincias geológicas del noroeste argentino. Se indica la distribución actual de los afloramientos del Grupo Mesón, de edad cámbrica, que aparecen especialmente en la Cordillera Oriental. Simplificado a partir de Barrientos Ginés et al. (2018). Las estrellas marcan la ubicación en que se obtuvieron muestras para estudios paleomagnéticos en la Formación Campanario, que integra el Grupo Mesón: (1) Santa Victoria Oeste (Franceschinis et al. 2016); (2) Matancillas, río Iruya (Spagnuolo et al. 2008); (3) Parada El Cóndor (Spagnuolo et al. 2012).



Los cambios de polaridad del CMT: Además de la variación secular, el campo magnético terrestre experimenta otra clase de cambios más sorprendentes, y de los cuales sólo conocemos a partir de las evidencias que han dejado en las rocas: se trata de las inversiones de polaridad. El registro magnético fósil de las rocas indica que han existido períodos, más largos o más cortos, en los que los polos del campo magnético terrestre estaban invertidos con respecto a la posición que tienen actualmente. La frecuencia de las inversiones ha variado a lo largo del tiempo, con períodos de 5-7 reversiones en un millón de años, y períodos de varios millones de años sin ninguna reversión. La última inversión ocurrió hace 780.000 años, y se estima que fue un proceso rápido, que se completó en unos pocos miles de años (quizás en el orden de 10.000 años). El estudio del registro de las inversiones de polaridad en una secuencia de rocas de edad desconocida, permite su correlación y el establecimiento de edades relativas (Magnetoestratigrafía).

El procesamiento de las muestras en el laboratorio demostró que el vector MRN, una vez limpio de magnetizaciones más modernas que se pudieran haber superpuesto a la original, apuntaba con buena consistencia en una dirección aproximada hacia el E-NE, con una inclinación de unos 20-40° hacia abajo, en todas las localidades estudiadas. Esta dirección es muy diferente a la del campo magnético terrestre actual en la zona, y da la pauta de que toda el área experimentó una importante rotación en algún momento de los 500 millones de años que median entre la formación de las rocas y el presente. La información geológica disponible indica que la Cordillera Oriental habría formado parte de un bloque cortical mayor conocido como "Pampia" durante el Cámbrico. Pero no sólo Pampia experimentó movimientos; también sufrieron complejas traslaciones todas las demás masas continentales, de manera que la reconstrucción paleogeográfica es una tarea similar a la del rompecabezas de páginas anteriores. Se trata de situar cada pieza con su dirección "norte-sur" paralela a los meridianos actuales, en la latitud correcta (es decir, en la fila correspondiente), y luego, jugar con el resto de las piezas para obtener el mejor ajuste. La figura 6 muestra un posible resultado de este procedimiento, en el que el mejor ajuste de todos los datos disponibles se obtiene cuando Pampia se coloca adosada al extremo sur de África. Por lo tanto, para llegar a su posición actual, Pampia debería haberse desplazado varios miles de kilómetros deslizándose a lo largo del borde del continente Gondwana, una de las partes del viejo supercontinente Pangea. De acuerdo con los datos geológicos disponibles hasta la fecha, ese desplazamiento podría haber ocurrido hace más de 350 millones de años, durante la Era Paleozoica.

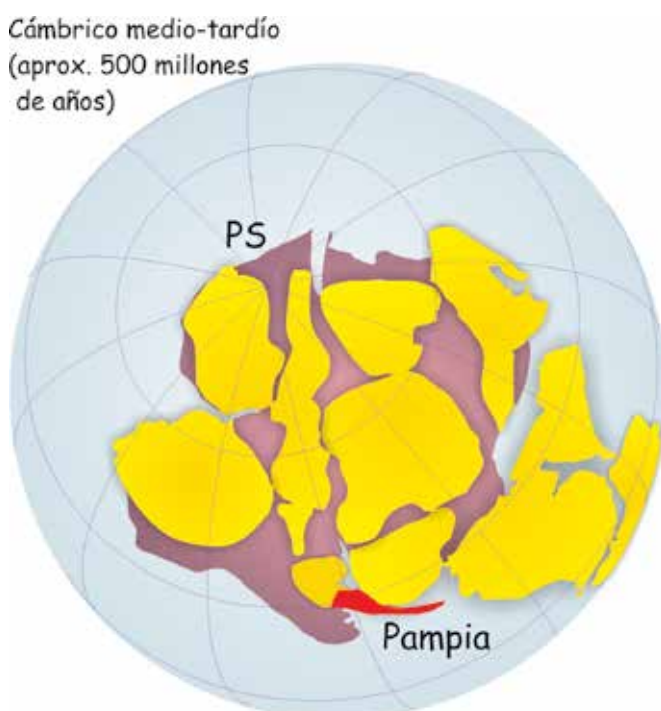
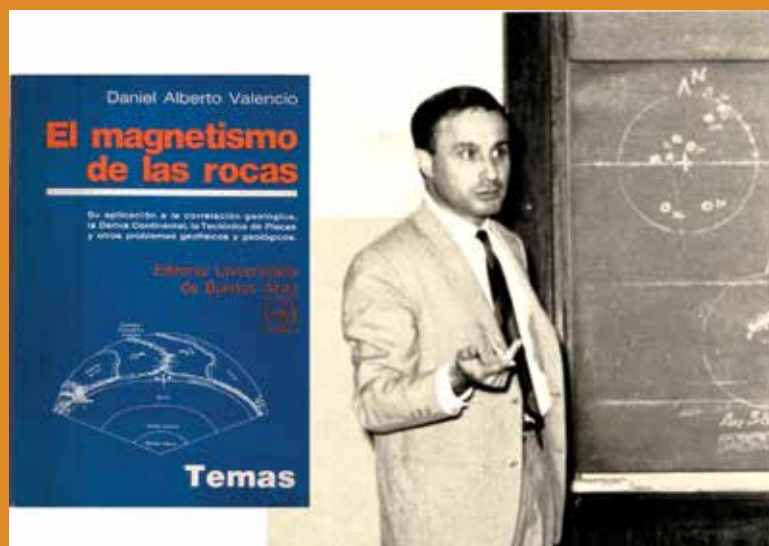


Figura 6. Reconstrucción paleomagnética para el Cámbrico medio-tardío (aproximadamente 500 millones de años atrás). PS es la posición del polo sur; en amarillo, las masas continentales tal como se supone que eran en el Cámbrico; en castaño, el contorno actual de África y América del Sur (sin Patagonia) como referencia. En rojo, la posición interpretada para Pampia (que incluye la Cordillera Oriental y parte de las Sierras Pampeanas), adosada al extremo sur de África. Modificado de Franceschinis et al. (2016).

Sin dudas, la posibilidad de hipotetizar sobre la situación geográfica de nuestra región en tiempos remotos resulta, como mínimo, estimulante y curiosa. Pero el camino del conocimiento científico no se detiene en la simple curiosidad, sino que abre la puerta a su característica más poderosa: la predicción. Conocer la trayectoria que siguieron las placas geológicas en el tiempo, y la manera en que interactuaron entre ellas, permite predecir, por ejemplo, en qué lugares ocurrieron cierta clase de colisiones o separaciones, y en qué momentos. Es decir, el geólogo puede predecir qué rocas pueden haberse formado en cierto borde de placa, dónde, y qué edad tendrían. Y además, qué clase de yacimientos de interés económico pueden haberse formado en relación con esos procesos. Apenas un ejemplo del modo en que el conocimiento científico puede, a la larga, ser aplicado en actividades redituables para la sociedad.

Daniel Valencio, el primer paleomagnetista de la Argentina: El uso de las propiedades magnéticas de las rocas en paleogeografía fue sugerido por primera vez alrededor de 1950, por el grupo de investigación de la Universidad de Cambridge liderado por el físico británico Keith Runcorn, como modo de verificar la deriva de los continentes propuesta por Wegener. La técnica paleomagnética se fue perfeccionando rápidamente y su aplicación se difundió en numerosos laboratorios distribuidos mundialmente. Los primeros estudios paleomagnéticos en la Argentina fueron realizados por uno de los discípulos de Runcorn, Keneth Creer, en 1958. Poco después, en 1962, tomó la posta el Ing. Daniel Alberto Valencio, el primer investigador argentino en Paleomagnetismo, quien, luego de un período de formación en Cambridge, se instaló en el Departamento de Ciencias Geológicas de la Universidad de Buenos Aires y fundó el Laboratorio de Paleomagnetismo que hoy lleva su nombre. Sus instalaciones forman parte del actual IGEBA (UBA-CONICET). Con sus estudios sobre el paleomagnetismo el Ing. Daniel Valencio, junto a su joven discípulo Juan Vilas, fueron los introductores de los conceptos de la Tectónica de Placas en la comunidad geocientífica de la Argentina en la década de los sesenta.



El Ing. Daniel Valencio mientras dictaba clases en la Universidad de Buenos Aires. En el recuadro, su libro "El magnetismo de las rocas", publicado en 1980 por la Editorial Universitaria de Buenos Aires (EUDEBA).

REFERENCIAS

- Barrientos Ginés, A.V., Aparicio González, P., Bercheñi, V.A., y Moya, M.C. 2018. Estratigrafía y sedimentología de las unidades ordovícicas del tramo central de la sierra de Mojotoro, Cordillera Oriental, Noroeste Argentino. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 74: 609-625.
- Cox, A. y Hart, R.B. 1986. *Plate tectonics, how it works*. Blackwell Sci. Pubs., 392 pp. Oxford, Reino Unido.
- Franceschinis, P.R., Rapalini, A.E., Escayola, M.P., y Luppo, T. 2016. Paleomagnetic studies on the late Ediacaran–Early Cambrian Puncoviscana and the late Cambrian Campanario formations, NW Argentina: New paleogeographic constraints for the Pampia terrane. *Journal of South American Earth Sciences*, 70: 145-161.
- Spagnuolo, C.M., Rapalini, A.E., y Astini, R.A. 2008a. Paleogeographic and tectonic implications of the first paleomagnetic results from the Middle–Late Cambrian Mesón Group: NW Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 25: 86-99.
- Spagnuolo, C. M., Rapalini, A. E., y Astini, R. A. 2012. Assembly of Pampia to the SW Gondwana margin: A case of strike-slip docking? *Gondwana Research*, 21: 406-421.
- Turner, J. C.M., 1960. Estratigrafía de la Sierra de Santa Victoria y adyacencias. *Boletín de la Academia Nacional de Ciencias de Córdoba*, 4: 163-196.
- USGS, Teaching companion exercise, “Wegener’s puzzling evidence”, https://volcanoes.usgs.gov/vsc/file_mgr/file-139/This_Dynamic_Planet-Teaching_Companion_Packet.pdf. Consultado 31 julio 2019.
- Valencio, D.A. 1980. *El magnetismo de las rocas: su aplicación geológica, la deriva continental, la tectónica de placas y otros problemas geofísicos y geológicos*. EUDEBA, 351 pp., Buenos Aires.