

¿Cuántas placas hay en el planeta tierra?

How many plates are in Earth?

PEDRO ALFARO¹ Y CARLOS FERNÁNDEZ²

¹ Departamento de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente, Facultad de Ciencias, Universidad de Alicante, 03080-Alicante. E-mail: pedro.alfaro@ua.es

² Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad de Huelva, 21071-Huelva. Email: fcarlos@uhu.es

Resumen El mapa de placas tectónicas que se utiliza habitualmente en los libros de texto incluye las 14 placas que describió Seiya Uyeda en 1978 que, además, fueron utilizadas por los modelos NUVEL 1 y NUVEL 1A. Estos modelos cinemáticos, los más utilizados entre 1990 y 2010, permitieron calcular el movimiento relativo entre estas 14 grandes placas. La irrupción de la geodesia espacial, principalmente de los datos GPS, ha permitido conocer con mucho mayor detalle cómo funciona nuestro planeta. En estos últimos años se ha publicado el modelo MORVEL-56, que divide la litosfera terrestre en 56 placas. Este modelo cinemático, que integra datos de tipo geológico, geofísico y geodésico, permite conocer el movimiento relativo entre todas ellas, y ofrece una imagen más realista de la actividad tectónica del planeta. En este trabajo se analiza, a modo de ejemplo, la actividad tectónica reciente del sector del Mediterráneo oriental y de la península arábiga.

Palabras clave: Cinemática, geodesia, NUVEL, MORVEL, tectónica de placas.

Abstract *The map of tectonic plates frequently used in textbooks include 14 plates previously described by Uyeda in 1978 that were also used by NUVEL 1 and NUVEL 1A models. These kinematic models, the most widely used between 1990 and 2010, allowed calculating the relative velocity among these 14 major tectonic plates. The spatial geodesy, mainly GPS data, offers a more detailed picture of how our planet works. In recent years, the MORVEL-56 model has been published, which divides the lithosphere into 56 tectonic plates. Integrating geological, geophysical and geodetic data, this kinematic model estimates the relative velocity among these 56 plates and offers a more realistic picture of the present tectonic activity of our planet. We describe in this work, as an example, the current geodynamic setting of the Eastern Mediterranean and the Arabian Peninsula.*

Keywords: Kinematics, geodesy, NUVEL, MORVEL, Plate Tectonics.

INTRODUCCIÓN

La pregunta ¿cuántas placas hay en el planeta Tierra?, a pesar de su interés, apenas suele formularse por parte del alumnado de Enseñanza Secundaria. Probablemente se deba a la visión “estática” que la mayoría del alumnado tiene de nuestro planeta. Los procesos geológicos, y también los relacionados con la tectónica de placas, son tan lentos que solemos imaginarnos, a lo largo de su historia pasada y futura, un planeta muy parecido al actual. Sin embargo, una mirada más geológica de la Tierra ayuda a comprender los profundos cambios que han acontecido y los que ocurrirán en el futuro. Esta idea de un planeta en continuo cambio la reflejó magistralmente Bob Thaves, en una de las tiras cómicas de Frank y Ernest (Fig. 1).

De hecho, la Tierra no siempre ha tenido tectónica de placas. El momento en el que se insta-

ló en la Tierra un régimen tectónico global como el actual, así como sus causas, son aspectos muy controvertidos hoy en día y su análisis está fuera del alcance de este trabajo. No obstante, como ejemplo, se puede citar el trabajo de Dewey (2007) (ver tabla en Alfaro et al., 2013), quien sugirió que nuestro planeta comenzó a tener una proto tectónica de placas hace unos 3000 millones de años. También indicó que, a partir de aproximadamente unos 2700 millones de años, esta tectónica de placas primitiva fue cambiando hasta alcanzar, hace unos 600 millones de años, una fase evolutiva similar a la actual. Además, el continuo enfriamiento del planeta conducirá en el futuro al cambio reológico de la litosfera, astenosfera y mesosfera y, por tanto, a la irremediable interrupción del movimiento de estas placas tectónicas. Más detalles de esta evolución se pueden consultar en Fernández et al. (2019).

El mapa actual de las placas tectónicas no es más que una imagen instantánea de una película extraordinariamente lenta a escala humana, pero que ha cambiado, cambia y cambiará continuamente. En plataformas como YouTube (palabras clave: *animation plate tectonics*; se puede añadir también *Scotese*), pueden visionarse animaciones que, en apenas unos segundos o pocos minutos, resumen la evolución pasada y futura de las placas tectónicas. Estos mapas paleogeográficos han sido construidos integrando miles de datos provenientes de: paleomagnetismo (mapas de inversiones magnéticas de la litosfera oceánica y determinación de paleolatitudes a partir de la inclinación magnética), estudios paleogeográficos y paleoclimáticos basados en la distribución de fósiles y ambientes sedimentarios, y a partir de estudios tectónicos que permiten identificar los límites antiguos entre placas tectónicas. El investigador Christopher Scotese ha liderado el proyecto Paleomag que puede consultarse en la web <http://www.scotese.com>, donde es posible conocer los detalles de algunos de estos mapas paleogeográficos (Fig. 2).

Por otra parte, en las últimas décadas la comunidad científica ha avanzado considerablemente en la comprensión del funcionamiento de la tectónica de placas, y de cómo influye en los principales rasgos fisiográfico de nuestro planeta. En Internet existen cada vez más recursos educativos entre los que destacan vídeos y animaciones que ayudan a comprender la actividad tectónica de varias regiones del planeta. Se recomiendan, entre otros muchos, los ofrecidos por IRIS Earthquake Science o los recursos del servicio geológico de los Estados Unidos (USGS).



Fig. 1. Dibujo inspirado en la tira cómica de Frank y Ernest en la que Bob Thaves refleja la idea de un planeta en continuo cambio.

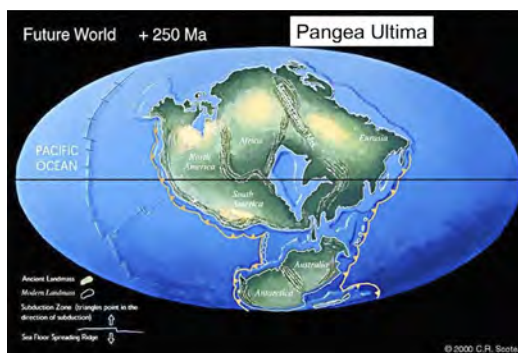


Fig. 2. Mapas tectonopaleogeográficos del proyecto Paleomag elaborados por Christopher Scotese (<http://www.scotese.com>). En la parte superior se muestra ampliada la reconstrucción de Pangea Ultima, una predicción de la posición de los continentes dentro de 250 millones de años.

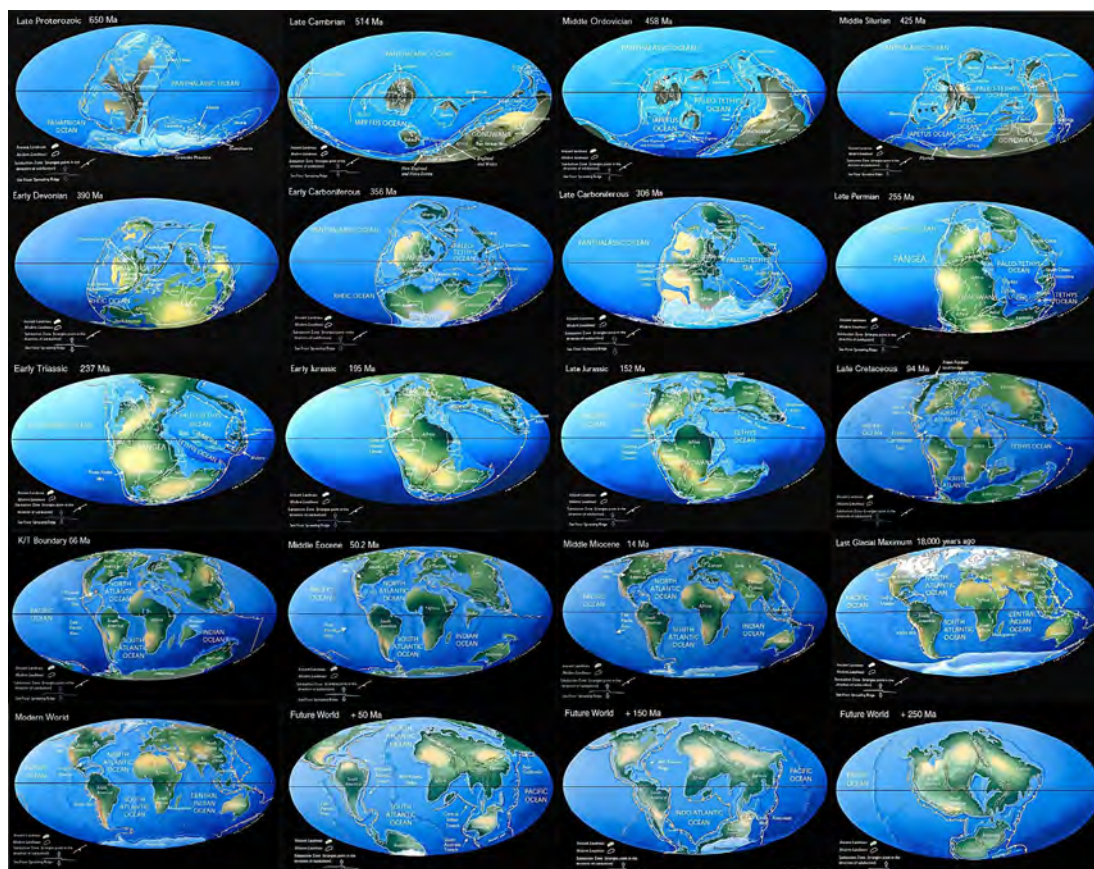
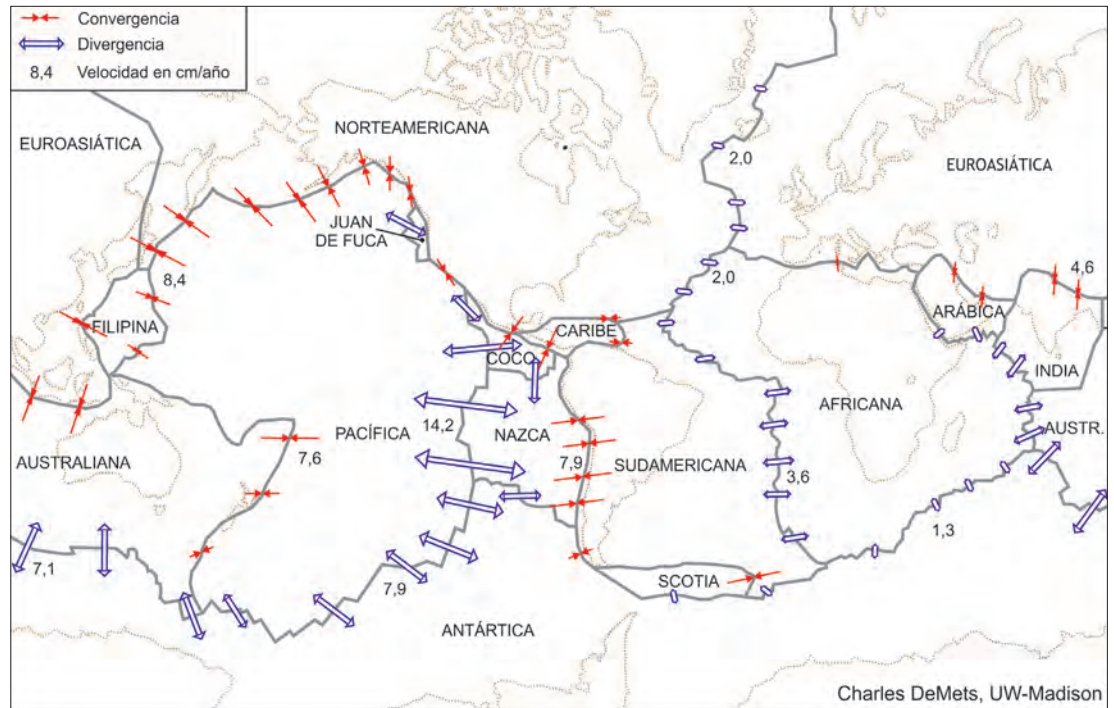


Fig. 3. Mapa de las principales placas tectónicas del modelo NUVEL 1A elaborado por Charles DeMets. Las flechas azules indican divergencia y las rojas convergencia, y su longitud es proporcional a la tasa de desplazamiento.



Este trabajo trata de dar respuesta a la pregunta que se formula en el título. Para ello, describe los modelos cinemáticos más utilizados en las tres últimas décadas, los NUVEL y MORVEL, que estiman cómo y cuánto se mueven las principales placas del planeta. Esta imagen más realista de nuestro planeta la ejemplificamos con el análisis tectónico de una de las zonas más interesantes del planeta: el Mediterráneo oriental y la península arábiga.

EL MAPA ACTUAL DE LAS PLACAS TECTÓNICAS: LOS MODELOS NUVEL Y MORVEL

El mapa de placas tectónicas que aparece en la mayoría de libros de texto incluye las 14 placas que describió Seiya Uyeda en su libro "The new view of the Earth" en 1978, traducido al castellano dos años después. Esta aproximación es válida para niveles educativos de ESO y Bachillerato. Pero las nuevas investigaciones hacen necesaria una visión más realista y próxima a los modelos geodinámicos aceptados actualmente por la comunidad científica.

En primer lugar, es conveniente aclarar lo que entendemos por placa litosférica. Para que un bloque litosférico sea considerado una placa tectónica independiente es necesario que cumpla, al menos, dos requisitos importantes: (1) debe tener unos límites tectónicos (geológicos) bien definidos con fallas o zonas de fallas que la separen de las placas vecinas (es decir, los límites deben atravesar la litosfera o tener dimensiones litosféricas), y (2) debe tener un desplazamiento relativo significativo respecto al resto de placas que la rodean. Con estas premisas, los científicos proponen modelos cinemáticos en los que dividen la litosfera en un número determinado de placas tectónicas.

En los años 90 del pasado siglo se utilizaron modelos de tipo "geológico-geofísico" entre los que destacaron los modelos NUVEL (ver detalles

en Alfaro et al., 2013) (Fig. 3). Pero desde comienzos del siglo XXI, la aportación de los datos GPS ha revolucionado la tectónica de placas, y los nuevos modelos integran cada vez más este tipo de datos geodésicos. La irrupción de los datos GPS está permitiendo a los investigadores conocer de forma mucho más precisa y detallada en cuántas placas está dividida la litosfera. A las 14 placas litosféricas principales definidas por Uyeda (1978) hay que sumarles varias decenas de placas que los científicos han identificado en los últimos años. Entre estos nuevos modelos, destacan los MORVEL (DeMets et al., 2010; Argus et al., 2011). Por ejemplo, el modelo MORVEL-56, define el movimiento relativo de 56 placas tectónicas que, en buena parte, se basan en las definidas previamente por Bird (2003), que dividió la litosfera terrestre en varias decenas de placas utilizando criterios geológicos y tectónicos (Fig. 4).

Es muy probable que a estas 56 placas utilizadas en el modelo MORVEL-56 se les sumen otras tantas en los próximos años, cuando se vayan incorporando a los nuevos modelos más datos geodésicos. La utilización en el aula de mapas más precisos de placas tectónicas permitirá comprender mejor cómo funciona nuestro planeta. Entre otras cuestiones, explicarán la localización de algunos terremotos destructivos alejados de los límites de placa representados en el mapa clásico de Uyeda. El terremoto de Turquía de 1999, que se contextualizará con detalle en el último apartado de este trabajo, es un buen ejemplo. O el terremoto de 2008 de Wenchuan (China), de magnitud 7,9, que causó más de 70000 víctimas mortales. Este terremoto se produjo a unos 1000 km de distancia del límite entre las placas Indoaustraliana y Euroasiática que está representado en el mapa clásico de placas de la figura 3. González et al. (2011) explican el contexto geodinámico de este terremoto (ver las figuras 5, 6 y 7 de su artículo).

Los modelos cinemáticos NUVEL

Durante los años 90 y principios del siglo XXI, el modelo global de tipo “geológico-geofísico” más aceptado ha sido el NUVEL-1A (DeMets et al., 1994) (Fig. 7 de Alfaro et al., 2013), que es un modelo mejorado del NUVEL 1 (DeMets et al., 1990) (Northwestern University **VE**Locity models). Estos modelos son de tipo “geológico-geofísico” por el tipo de información que integran. En la figura 5 se resumen los tres tipos principales de datos utilizados: (1) tasas de expansión en dorsales, (2) direcciones de fallas transformantes, y (3) mecanismos focales. Para la construcción de los modelos NUVEL, los más utilizados entre 1990 y 2010, DeMets et al. (1990, 1994) utilizaron 1122 datos en 22 límites de placas: 277 índices de expansión en dorsales, 121 direcciones de fallas transformantes y 724 mecanismos focales. A partir de estos datos calcularon las velocidades relativas entre 14 placas tectónicas (las que aparecen habitualmente en los libros de texto que están representadas en la figura 3).

En un buscador de Internet, utilizando palabras clave como “plate motion calculator” es posible acceder a programas sencillos con los que se pueden calcular estas velocidades relativas entre placas. En las primeras posiciones aparece la página web de UNAVCO, que está patrocinada entre otras instituciones por la NASA, pero es algo compleja y sólo recomendable para niveles universitarios avanzados. Una página más sencilla es la de la Universidad de Tokio (http://ofgs.aori.u-tokyo.ac.jp/~okino/platecalc_new.html) que permite utilizar los modelos

NUVEL, además de los MORVEL, que se describirán en el siguiente apartado.

Con estos programas se pueden diseñar actividades sencillas para que el alumnado cuantifique, a través de estos sencillos programas informáticos, cuál es el desplazamiento relativo entre las grandes placas del planeta. Como ejemplos, se sugieren dos actividades. En el cuadro de la figura 6 proponemos una primera actividad en la que el alumnado debe calcular el movimiento relativo de su centro educativo respecto a varias ciudades del planeta.

Los movimientos de las placas tectónicas se realizan sobre la superficie aproximadamente esférica de la Tierra. Las consecuencias de este hecho son sorprendentes (algunas de ellas se detallan en el artículo de Fernández, 2019, en este mismo monográfico). Se propone ahora una segunda actividad en la que el alumnado (preferentemente de bachillerato o primeros cursos universitarios) va a comprobar una de estas consecuencias: el hecho de que la naturaleza convergente, divergente o transformante de un límite de placas dado puede cambiar a lo largo del mismo, aunque éste no varíe esencialmente de dirección ni se produzca un cambio en el movimiento relativo entre las placas separadas por dicho límite. Es una de las consecuencias de que los desplazamientos relativos entre las placas sean rotaciones alrededor de un eje que corta a la superficie del planeta en los llamados polos eulerianos o de rotación. Se sugiere considerar el límite entre las placas de Nubia y Euroasiática en su parte occidental, como se explica en el cuadro dedicado a esta actividad 2 y se ilustra en la figura 7

ACTIVIDAD 1

CUÁNTO SE MUEVE MI CENTRO DOCENTE RESPECTO A VARIAS PLACAS TECTÓNICAS

Calcula el desplazamiento entre el centro de enseñanza y varias ciudades del planeta. Se sugiere utilizar, por ejemplo, las ciudades de:

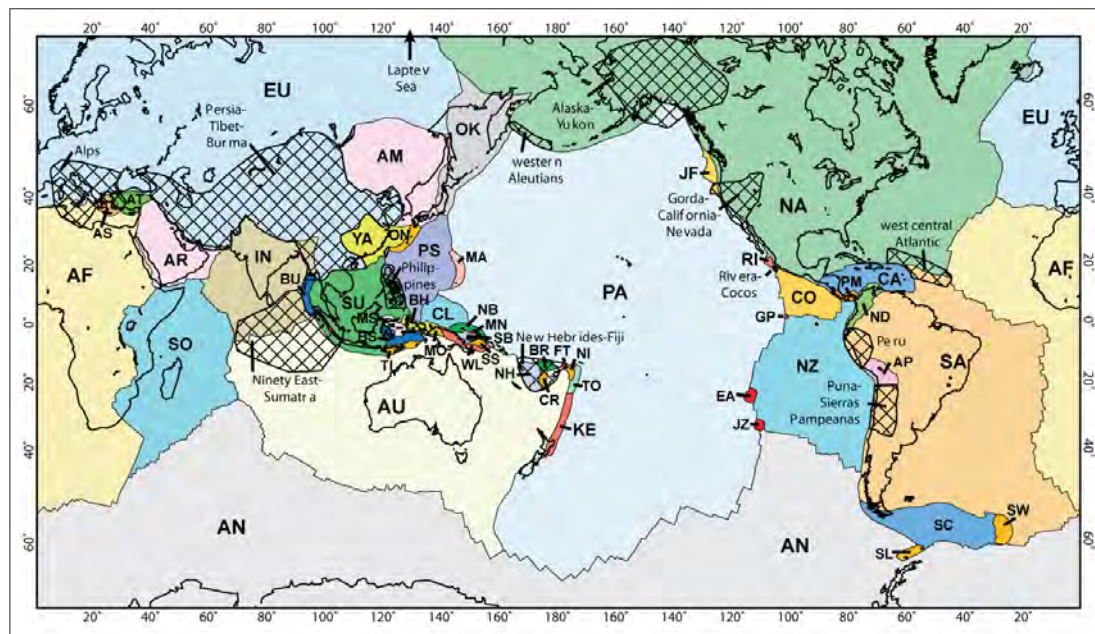
- (1) París o cualquier otra ciudad europea (el movimiento relativo será cero porque están en la misma placa, en la placa Euroasiática).
- (2) Nueva York o cualquier otra ciudad americana, que permitirá calcular el movimiento relativo producido principalmente por la dorsal atlántica (se obtendrán valores de aproximadamente 2 cm/año de separación).
- (3) Marrakech o cualquier otra ciudad africana, que permitirá calcular el movimiento convergente entre las placas de Eurasia y de Nubia (antigua placa africana). Se obtendrán valores de aproximación de alrededor de 0.5 cm/año.

Los valores obtenidos representan el movimiento relativo entre las placas Euroasiática (si se eligen centros educativos de la península ibérica o de las islas Baleares) o de Nubia (si se eligen centros de las islas Canarias) y las placas tectónicas sobre las que se sitúan las ciudades seleccionadas por los estudiantes.

Si se quiere profundizar más, el programa también proporciona la posición del polo de Euler y la velocidad angular relativa entre placas (ver detalles de Fernández, 2019, en este número).

Nota: Las Islas Canarias requieren un tratamiento diferente ya que pertenecen a la placa de Nubia (parte occidental de la antigua placa africana).

Fig. 4. Mapa de las placas tectónicas que definió Bird en 2003. Este mapa fue la base utilizada por el modelo MORVEL-56. Fuente: Bird (2003) en la revista *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. Se recomienda consultar la versión digital.



ACTIVIDAD 2

CÓMO SE MUEVE EL NOROESTE DE LA PLACA DE NUBIA CON RESPECTO A EURASIA

Calcula el desplazamiento relativo de distintos puntos del noroeste de la placa de Nubia (cuyas coordenadas se detallan en la figura 7) con respecto a la placa de Eurasia. Para ello, utiliza los mismos programas de cálculo de velocidades relativas que se hayan empleado para la actividad 1. Los puntos pueden ser establecidos por cada uno mediante la herramienta de selección de marcadores de posición de Google Earth, que indica también las coordenadas geográficas (latitud y longitud) de los puntos. Se recomienda cambiar las preferencias de Google Earth, de modo que las coordenadas se den en grados decimales, en lugar del formato convencional de grados, minutos y segundos. De este modo, no será necesaria ninguna transformación previa para introducir los datos de coordenadas en los programas de cálculo de movimientos entre placas. En la figura 7 se han seleccionado 10 puntos repartidos de forma más o menos equidistante entre el estrecho de Gibraltar y las islas Azores. Obviamente, cada cual puede escoger los puntos que mejor le convengan.

Los valores obtenidos permiten hacerse una idea del campo de desplazamiento relativo de la placa de Nubia en su vértice noroccidental. Si los representamos en el mapa de la figura 7, podemos comprobar que la orientación de los vectores de velocidad con respecto al límite de placas Nubia-Eurasia cambia de unos puntos a otros. Se dan tres posibilidades:

- (1) En la parte oriental de la zona representada en la figura 7, la placa de Nubia se desplaza acercándose (oblicuamente) a la euroasiática. Se trata de un límite de placas convergente (transresivo dada la oblicuidad mencionada anteriormente y observable en la figura). En este sector se supone que se situó el epicentro del famoso "terremoto de Lisboa" de 1755. Sería interesante establecer un debate con el alumnado acerca de las posibles características de ese terremoto a la luz de la información tectónica obtenida en esta actividad.
- (2) En la parte central se observa un segmento en el que los vectores de velocidad son paralelos al límite. Se trata de la definición clásica de un límite transformante. Nubia y Eurasia se desplazan paralelamente al límite entre ellas. Puede comprobarse que estamos ante una transformante dextrorsa. Puede pedirse al alumnado que busque información sobre la falla de Gloria y su significado tectónico.
- (3) Finalmente, en una pequeña región del extremo occidental del límite, justo antes de alcanzarse la unión triple entre Nubia, Eurasia y Norteamérica, la placa de Nubia se separa oblicuamente de la de Eurasia. Por tanto, estamos ante un límite divergente, el "rift" de Terceira. ¿Será casualidad que en este sector divergente se encuentre la región volcánica de las islas Azores?

Los modelos cinemáticos MORVEL

En el año 2010 Charles DeMets, Richard Gordon y Donald Argus publicaron el modelo MORVEL y un año más tarde el modelo MORVEL-56. MORVEL es el acrónimo de **Mid-Ocean Ridge VELOCITY**, ya que más del 75% de los datos utilizados provienen de las dorsales. El modelo MORVEL calcula las velocidades angulares relativas, a escala geológica, de 25 de las principales placas tectónicas que cubren el 92% de la superficie terrestre (DeMets et al., 2010). El modelo MORVEL-56 añade 31 nuevas placas de menor tamaño, situadas en su mayoría en el SE asiático (océano Pacífico), que es la zona actual más compleja desde un punto de vista geodinámico (Fig. 8).

Las velocidades angulares relativas entre estas 56 placas las calcularon a partir de integrar numerosos datos geológicos, geofísicos, sismológicos y geodésicos. Los datos utilizados son del mismo tipo que los NUVEL, es decir: (1) tasas de expansión de las dorsales oceánicas, (2) direcciones de las fallas transformantes, y (3) dirección horizontal de desplazamiento durante grandes terremotos obtenida a partir de sus mecanismos focales. Además, los modelos MORVEL incluyen una cuarta fuente de información, cada vez más valiosa, que es la proporcionada por las redes GPS.

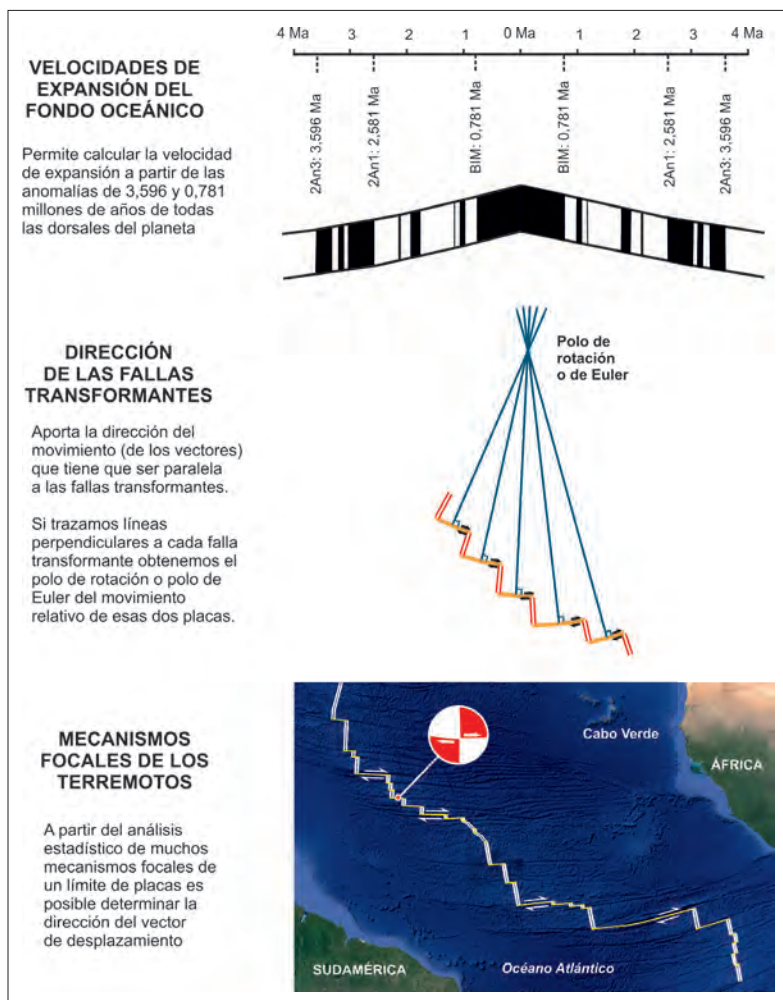
Para calcular las tasas de expansión de las dorsales se utilizaron dos marcadores (anomalías magnéticas muy conocidas presentes en todos los fondos oceánicos del planeta) con una edad de 3.16 millones de años y de 780000 años. En cinco de estas placas sin datos geológicos se tuvieron que utilizar exclusivamente datos GPS. En cualquier caso, el número de datos utilizado por MORVEL superaba con creces el usado para los modelos NUVEL-1 (1990) y NUVEL-1A (1994).

La geometría de las placas en estos modelos es determinada a partir de la sismicidad producida por las grandes fallas situadas en sus límites y, en ocasiones, por criterios geológicos (tectónicos y geomorfológicos). Bird (2003) realizó un análisis exhaustivo de la geometría de 52 placas, que constituyen la base de la mayoría de las placas definidas en los modelos MORVEL.

Al igual que con los modelos NUVEL, se puede acceder a estos modelos en buscadores de Internet utilizando en este caso las palabras clave "MORVEL Plate Tectonics". Encontraremos información detallada en la página web de estos modelos (DeMets et al., 2010; Argus et al., 2011) (http://geoscience.wisc.edu/~chuck/MORVEL/motionframe_mrvt.html).

UNA VISIÓN MODERNA DE LA TECTÓNICA DE PLACAS: EL EJEMPLO DEL MEDITERRÁNEO ORIENTAL Y LA PENÍNSULA ARÁBIGA

La región del Mediterráneo oriental y de la península arábiga es una de las zonas más interesantes de nuestro planeta desde un punto de vista tectónico. En el mapa clásico de placas tectónicas, en esta región se incluyen tres grandes placas: Eurasia, África y Arabia (al Este se sitúa también la placa Indoaustraliana). Sin embargo, los estudios científicos de las dos últimas décadas muestran que ese puzzle litosférico está constituido por más piezas. Un claro



ejemplo es el de Turquía (bloque de Anatolia) que en los mapas clásicos pertenece a la placa Euroasiática (Fig. 3). Como veremos a continuación, Anatolia es una placa independiente de Eurasia (Figs. 9 y 10).

Si analizamos el mapa tectónico de Reillinger et al. (2006) (Fig. 10) se comprueba que, además de Anatolia, en esa región del planeta aparecen diferenciadas de la placa Euroasiática otras placas de pequeño tamaño como la del Mar Egeo, Caucaso, Irán o Lut. También se puede observar en este mapa de Reillinger et al. (2006) que la antigua placa africana está dividida en dos (Nubia y Somalia) a lo largo del valle del rift africano oriental, o que la placa de la India aparece separada de Australia.

En este apartado describimos en detalle algunos de los rasgos más significativos del relieve del Mediterráneo oriental y de la península arábiga. Este ejemplo regional pretende mostrar el enorme potencial que tiene la tectónica de placas para explicar cómo funciona nuestro planeta, y para entender el porqué de los principales rasgos del relieve terrestre. Además, como complemento para el alumnado de niveles universitarios, sugerimos el visionado de la conferencia del Prof. Jolivet que impartió en el congreso de la EGU de Viena en el año 2017 (se puede acceder al enlace de la plataforma YouTube utilizando palabras clave como "Jolivet EGU" "Jolivet Tectonics" o "Jolivet Mediterranean") (<https://www.youtube.com/watch?v=cqK-CbuM3Eo>), que se solapa con la zona analizada en el sector del Me-

Fig. 5. Se muestran los tres conjuntos principales de datos en los que se basaron los modelos cinemáticos MORVEL: (1) tasas de expansión del fondo oceánico, (2) dirección de fallas transformantes, y (3) mecanismos focales.

Fig. 6. Algunas imágenes compuestas de la página web del modelo cinemático MORVEL-56 (<http://geoscience.wisc.edu/~chuck/MORVEL/>).

Options:

1. Home page
2. Motion calculators
3. MORVEL information
4. Magnetic profiles
5. Transform faults
6. GPS velocities
7. MORVEL source data

8. Citation & acknowledgment

9. MORVEL angular velocities
10. NNR-MORVEL56 angular velocities
11. ERRATA (Table 4)
12. Plate boundaries

Two-letter plate codes needed for calculator

XX: No-Net-Rotation frame	AS: Aegean Sea	AM: Amur	AP: Altiplano	AT: Anatolia	AN: Antarctic	AR: Arabia	AU: Australia
BR: Bahrol Reef	BS: Banda Sea	BH: Birds Head	BU: Burma	CP: Capricorn	CA: Caribbean	CL: Caroline	
CO: Cocos	CR: Conway Reef	EA: Easter	EU: Eurasia	FT: Futuna	GP: Galapagos	IN: India	
JZ: Juan Fernandez	JF: Juan de Fuca	KE: Kermadec	LW: Lwandle	MQ: Macquarie	MN: Manus	MO: Mook	
MA: Mariana	MS: Molucca Sea	NZ: Nazca	NA: N. America	NH: New Hebrides	NI: Niuafo'ou	ND: North Andes	
NB: North Bismarck	NU: Nubia	OK: Okhotak	ON: Okinawa	PA: Pacific	PM: Panama	PS: Philippine Sea	
Rt: Rivera	SW: Sandwich	SC: Scotia	SL: Shetland	SS: Solomon Sea	SM: Somalia	SA: S. America	
SB: S. Bismarck	SU: Sundaland	SR: Sur	TI: Timor	TO: Tonga	WL: Woodlark	YZ: Yangtze	

Step 1: Select stationary and moving plates (use 'xx' for fixed NNR frame).

Fixed plate: Enter two-letter code from list above -

Moving plate: Enter two-letter code from list above -

Step 2: Input coordinates for velocity calculation.

Type or cut-and-paste latitude, longitude pairs in decimal or integer degrees, one pair per line.

WARNING: Latitudes should be geocentric (spherical Earth) rather than geodetic.

Example 1: 45°N, 50°E should be entered 45, 50 or 45.0, 50.0
 Example 2: 30.4°S, 120.6°W should be entered -30.4, -120.6

(Limit of 1000 lines per request)

Send to velocity calculator | Restablecer

Global plate geometry

Western Pacific plate geometry

Fig. 7. Planteamiento y resultado de la actividad 2. Con Google Earth se han establecido y obtenido las coordenadas geográficas de varios puntos a lo largo del límite noroccidental de la placa de Nubia (tabla e imagen Google Earth en la mitad superior de la figura). El uso de los programas de cálculo de las velocidades relativas entre las placas (en este caso, de la placa de Nubia con respecto a la de Eurasia) permite obtener los vectores de desplazamiento actuales de la placa de Nubia vista desde Eurasia (placa supuesta fija) en esos puntos, así como las coordenadas del polo de rotación (euleriano) que rige ese movimiento (tablas en la mitad inferior de la figura). Dibujando esos vectores en la imagen de Google Earth (imagen inferior), junto con el trazado del límite entre Nubia y Eurasia, es posible deducir las características tectónicas de cada segmento del límite y entender con mucha más profundidad su cinemática, relieve, sismicidad, vulcanismo, etc. Estos resultados permiten también plantear una serie de preguntas adicionales al alumnado, algunas de las cuales se sugieren en el texto principal.

Datos de partida

	Latitud	Longitud
Punto 1	35.520155°	-7.750073°
Punto 2	35.497821°	-10.567433°
Punto 3	35.776428°	-13.597763°
Punto 4	36.156058°	-16.350879°
Punto 5	36.385557°	-19.205951°
Punto 6	36.638851°	-21.657814°
Punto 7	36.905728°	-24.106586°
Punto 8	37.479688°	-26.108349°
Punto 9	38.152831°	-27.967079°
Punto 10	39.063064°	-29.431562°

(Positiva hacia el norte) (Negativa hacia el oeste)

Resultados (MORVEL)

	Dirección	Módulo
Punto 1	311.6°	4
Punto 2	304.1°	4
Punto 3	294.2°	4
Punto 4	284.2°	4
Punto 5	273.8°	4
Punto 6	264.9°	4
Punto 7	256.5°	4
Punto 8	250.5°	4
Punto 9	245.8°	4
Punto 10	243°	5

(Desde el norte y hacia el este) (mm/año)

Polo Euleriano			
Latitud (°)	Longitud (°)	Módulo (°/ma)	
Veloc. Angular	21.71°	-20.24	0.1301

Unión triple Nubia-Eurasia-Norteamérica

Placa de Eurasia

Placa de Nubia

Polo euleriano (Nubia-Eurasia)

diterráneo oriental (Grecia y Turquía). Esta conferencia también ofrece información muy interesante sobre el Mediterráneo occidental, que no se describe en este trabajo.

A continuación, se ofrecen algunas claves sencillas que ayudan a comprender cómo funciona esta región desde un punto de vista de la tectónica de placas, basándose en algunos trabajos científicos (p.ej. Reilinger et al., 2006; Regard et al., 2010, o Gallen et al., 2014; entre otros). Esta imagen tectónica simplificada puede ser utilizada, por ejemplo, en bachillerato y primeros cursos universitarios.

La falla del Norte de Anatolia, un límite de placas muy activo

En el año 1999 ocurrió en Turquía un terremoto de magnitud 7.4 que causó unas 20000 víctimas mortales. El terremoto se produjo en la falla del Norte de Anatolia, una gran falla de salto en dirección dextrorsa que desplaza el bloque de Anatolia (Turquía) hacia el oeste respecto al resto de la placa Euroasiática (Figs. 9 y 10) con una velocidad de 25 mm/año. Esta falla ha sido responsable de buena parte de los grandes terremotos históricos ocurridos en Turquía. Los nuevos modelos geodinámicos la consideran un límite de placas transformante que desplaza lateralmente las placas de Eurasia y Anatolia.

La profundidad del golfo Pérsico versus la del mar Rojo y la del golfo de Adén

La península de Arabia está rodeada al NE por el golfo Pérsico, y al sur por el mar Rojo y el golfo de Adén. El océano Índico se adentra en el continente a lo largo de estos brazos de mar estrechos. Sin embargo, sus características, su origen y su evolución futura son muy diferentes.

Una actividad sorprendente para al alumnado es la utilización de Google Earth activando la capa "Relieve". Al arrastrar el cursor a lo largo del mar Rojo y del golfo de Adén podrán comprobar cómo varían los valores de profundidad (elevación) que Google Earth muestra en la parte inferior de la pantalla. El mar Rojo es muy profundo, llegando a superar los 2200 metros, mientras que en el golfo de Adén la profundidad es todavía mayor alcanzado un máxi-

mo de 2700 metros. Al hacer lo propio en el golfo Pérsico, podrán conocer que la profundidad máxima es de 90 metros. ¿A qué se debe esta diferencia tan radical?

Tanto en el mar Rojo como en el golfo de Adén se está produciendo una extensión de casi 2 cm/año que adelgaza la litosfera y produce, incluso, nueva litosfera oceánica. Esta nueva litosfera oceánica y parte de la litosfera continental adelgazada, por isostasia, se hundieron permitiendo la entrada de las aguas del océano Índico que forman estos dos brazos de mar estrechos y profundos. Por el contrario, el golfo Pérsico está situado en una zona en la que las placas Arábiga y Euroasiática convergen a una velocidad de algo más de 2 cm/año. Las estructuras que hay en el golfo Pérsico son estructuras contractivas desarrolladas en corteza continental (Fig. 11), que hacen que el relieve esté elevado por isostasia. Mientras el mar Rojo y el golfo de Adén serán cada vez más anchos, el golfo Pérsico se irá cerrando y desaparecerá en unos pocos millones de años. Si se mantienen los valores de convergencia actuales, el golfo Pérsico se cerrará en menos de 3 millones de años por su extremo SE (estrecho de Ormuz), convirtiéndose primero en un mar interior y posteriormente (en menos de 10 Ma) en una zona emergida.

La placa tectónica del mar Egeo y la isla volcánica de Santorini

El mar Egeo tiene dos características tectónicas principales: (1) es una zona sometida actualmente a extensión con una litosfera continental adelgazada, y (2) ha tenido una actividad volcánica notable que continúa en la actualidad. Junto a la famosa isla volcánica de Santorini, las islas de Methana, Milos, Kos y Nisyros dibujan el característico arco de islas (el alumnado lo puede visionar en Google Earth) (Fig. 12). A estas pequeñas islas volcánicas hay que añadirle el vulcanismo submarino, de mucha mayor entidad, que se distribuye en el fondo del Mar Egeo.

¿Cómo se ha formado este mar con abundantes manifestaciones de rocas ígneas? En el Mediterráneo oriental, en la región de la isla de Creta y el mar Egeo, la placa de Nubia (África) subduce bajo

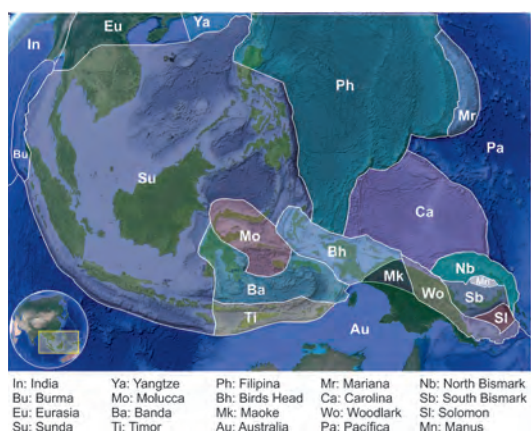


Fig. 8. Placas utilizadas por el modelo MORVEL-56 en la SE asiático, la zona más activa y compleja del planeta en la actualidad. Se han dibujado sobre un fondo de Google Earth.



Fig. 9. Mapa tectónico simplificado del límite de placas entre Eurasia, Nubia y Arabia. Muestra la indentación de Arabia en Eurasia, y la expulsión hacia el oeste de Anatolia (tectónica de escape) que se desplaza como una placa independiente respecto a Eurasia. Con flechas negras se ha señalado la rotación que están sufriendo las placas de Arabia y Anatolia.

Fig. 10. Mapa tectónico modificado del trabajo de Reilinger et al. (2006) de la región de Arabia y el Mediterráneo oriental. Se recomienda consultar la versión digital.

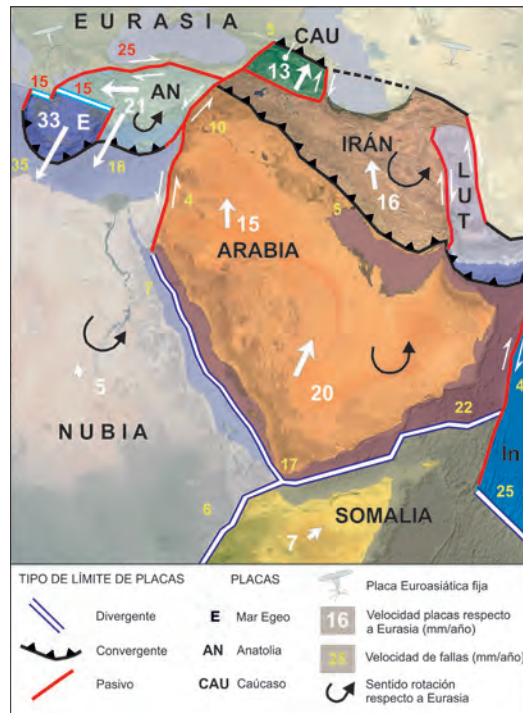
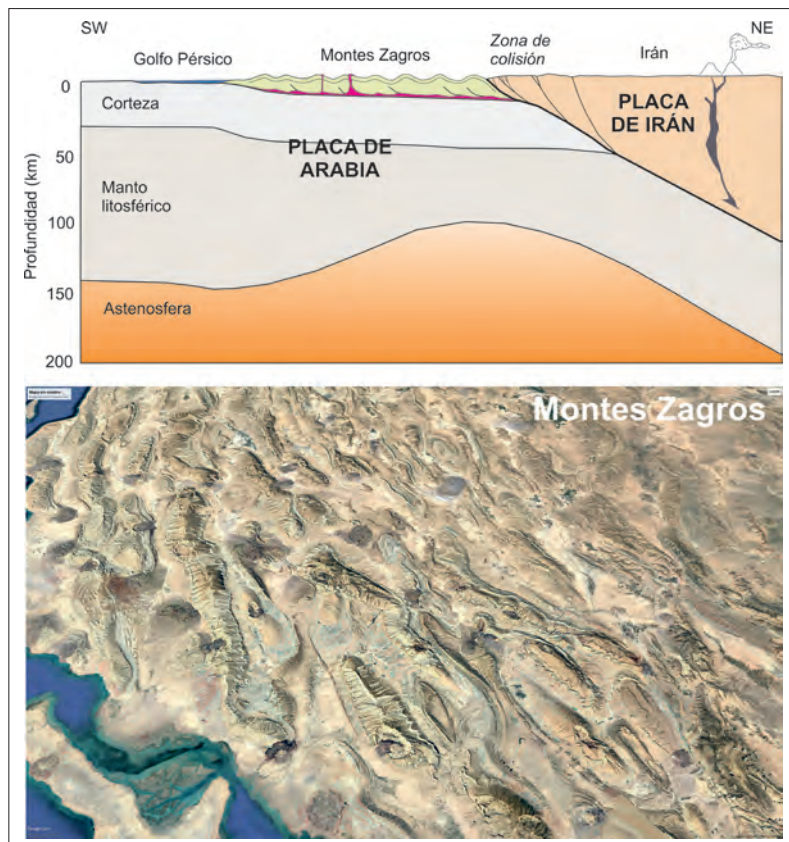


Fig. 11. Sección esquemática de la zona de colisión entre las placas de Irán y de Arabia, que está formando actualmente los montes Zagros. En la parte inferior se observa una imagen de Google Earth de este espectacular orógeno.

la placa del mar Egeo (Grecia). La subducción genera magmatismo que se manifiesta en superficie a través de varias islas volcánicas que se han mencionado anteriormente. En muchas zonas de subducción, es habitual que en las placas cabalgantes se desarrollen zonas de extensión que adelgazan la litosfera y hundan el relieve, generando cuencas sedimentarias marinas conocidas como cuencas



retro-arco o tras-arco (cuencas situadas detrás del arco volcánico). En estas cuencas tras-arco se ubican mares (reciben el nombre de mares marginales) como el mar del Caribe, el mar de Scotia, el mar de China o el mar de Japón. El mar Egeo se sitúa sobre una de estas cuencas tras-arco, sometida actualmente a extensión que adelgaza la litosfera y hunde el relieve. Esta zona adelgazada, que se separa de Anatolia (Turquía), ha sido definida por los científicos como una placa tectónica independiente (Figs. 10 y 12).

El mar Muerto y las montañas de Palmira

La falla transformante del mar Muerto (*Dead Sea Transform*), también conocida como falla de Levante, desplaza las placas de Arabia y de África con una velocidad de entre 4 y 6 mm/año. A lo largo de su trazado se encuentra el mar Muerto, relieve situado a algo más de 400 metros por debajo del nivel del mar. Unos 200 km al norte se encuentran las montañas de Palmira que se elevan por encima de los 1000 metros. Ambos relieves se han formado por las irregularidades de la traza de esta gran falla transformante que crea una región transtensiva que se hunde (mar Muerto) y una región transpresiva que se eleva (montañas de Palmira). Un esquema simplificado que ayuda a entender cómo se están formando estos dos relieves activos se muestra en el artículo de Alfaro et al. (1997) (ver Fig. 9).

El Cáucaso, las montañas más altas de Europa

La cordillera del Cáucaso, situada entre Europa del este y Asia occidental (entre los mares Negro y Caspio), tiene una longitud de unos 1200 km y varios picos que superan los 5000 metros. Su cima, el monte Elbrus (un volcán), con 5642 m, es considerada la montaña más alta de Europa. El orógeno del Cáucaso es el resultado de la convergencia entre las placas Arábiga y Euroasiática con una velocidad de unos 17 mm/año (Reilinger et al., 2006). Estudios geodésicos de detalle han calculado que el acortamiento que está acomodando el Cáucaso es de unos 10 mm/año. El resto de la deformación se acomoda algo más al norte, en un contexto tectónico complejo, con la existencia de las pequeñas placas del Cáucaso y de Irán (Reilinger et al., 2006).

Los montes Zagros, un paraíso tectónico

La colisión entre las placas de Arabia y de Eurasia (o la placa de Irán en los nuevos modelos geodinámicos) es responsable de la formación de los montes Zagros, una de las cordilleras activas más espectaculares del planeta. La colisión entre ambas placas se inició aproximadamente hace 35 Ma, mientras que el espectacular tren de pliegues de la parte exterior de los montes Zagros (la más próxima al Golfo Pérsico) comenzó hace unos 12 Ma (Fig. 11). En la actualidad, este plegamiento sigue siendo activo debido a la convergencia entre ambas placas que se acercan con una velocidad de entre 2.4 cm/año en el NW, 2.8 cm/año en el sector central y 3.5 cm/año en el SE, en el sector de Omán (Reilinger et al., 2006).

Isla de Creta

La isla de Creta se sitúa en las proximidades de la zona de subducción de la placa de Nubia bajo la placa del Mar Egeo (Fig. 12). En concreto, se localiza al sur del arco volcánico del Egeo (Islas de Santorini, Methana, Milos, Kos y Nisyros) y al norte de la fosa situada bajo el mar Mediterráneo oriental. Aunque Creta se encuentra en un límite convergente de placas, en superficie se reconocen fallas normales resultado de la extensión superficial de la corteza. Contrariamente a lo esperado en una región en extensión, la isla de Creta está caracterizada por una elevación regional que explica, entre otros rasgos del relieve, la existencia de esta isla. ¿Es compatible la extensión superficial con el levantamiento regional? La convergencia entre las dos placas se acomoda en profundidad, en la zona de acoplamiento de las dos placas (zona de subducción), generando la elevación regional. Este proceso tectónico es compatible con otro más superficial que produce extensión y explica la existencia de varias fallas normales en la región (Gallen et al., 2014). La coexistencia de extensión superficial en contextos convergentes (y contractivos) es habitual en muchas zonas del planeta como los Apeninos o el mar de Alborán, entre otros muchos ejemplos.

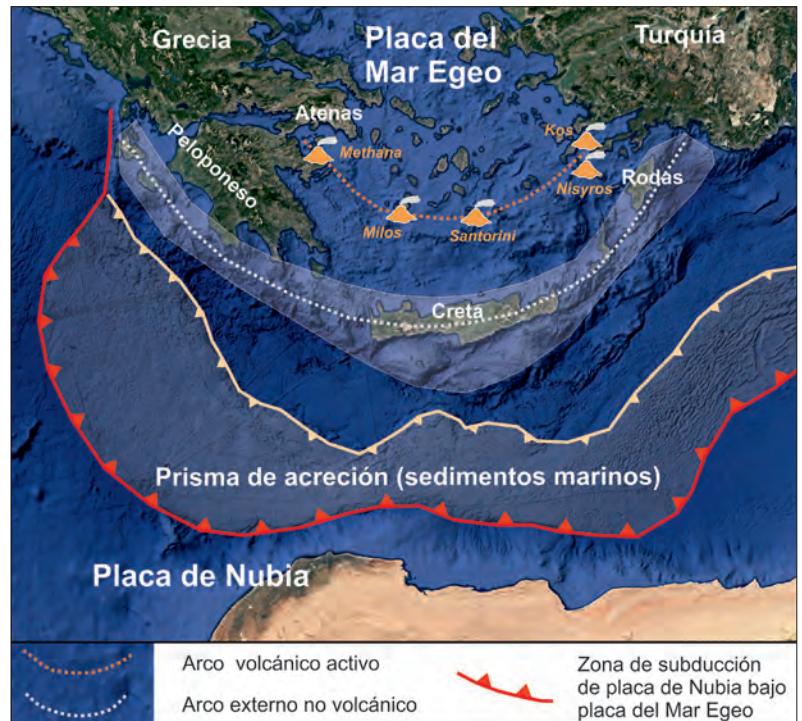
El mar Negro y el mar Caspio

Una de las singularidades del relieve de la región limítrofe entre Europa y Asia es la presencia del mar Negro y del mar Caspio. Tienen unas características muy diferentes. El Mar Negro está conectado con el mar Mediterráneo y es más profundo, llegando a superar los 2200 metros. Por el contrario, el mar Caspio, el mayor lago de nuestro planeta, es mucho más somero que el mar Negro, con una profundidad media de 170 metros, y un nivel del agua situado unos 25 metros por debajo del nivel medio de los océanos. Aunque el sector meridional del mar Caspio es algo más profundo con un valor máximo de -995 m.

¿A qué se debe el relieve de estas dos grandes depresiones? Existe una gran controversia científica para explicar el porqué del relieve tan deprimido de estas dos grandes regiones situadas en el sector meridional de la placa Euroasiática. Para algunos científicos estas zonas todavía preservan litosfera oceánica (mar Negro) del antiguo océano paleoTethys que no llegó a subducir. Sin embargo, otros autores lo achacan a una etapa extensional que se produjo en la región durante el Cretácico y que produjo un importante adelgazamiento de la litosfera y la creación de nueva litosfera oceánica. En ambos casos, tanto si hay antigua litosfera oceánica mesozoica como si existe una litosfera adelgazada, se produce un hundimiento del relieve por isostasia.

La península de Omán: zona de tránsito entre el golfo Pérsico y el golfo de Omán

Omán se sitúa en la zona de transición entre una zona de colisión (sector del golfo Pérsico) y una zona de subducción situada al Este (golfo de Omán). En la prolongación de la península de Omán hacia el norte, en Irán, se observa un espectacular cambio de dirección de las estructuras de los montes Zagros (una actividad recomendable es que el alumnado visite la



región con Google Earth). En superficie se observan varias fallas activas (Jiroft-Sabzevaran) que, para varios autores (ver Regard et al., 2009), son la expresión superficial de una gran zona de falla dextrorsa de escala litosférica. De hecho, sus dimensiones litosféricas permiten a varios investigadores dividir la litosfera en dos pequeñas placas: Irán al oeste y Lut al este (Fig. 10).

CONSIDERACIONES FINALES

Podemos imaginarnos la emoción de Alfred Wegener si hubiese podido conocer en cuántas piezas está dividido el puzzle litosférico terrestre o los detalles de cómo y cuánto se mueven las placas tectónicas. Medio siglo después de la formulación de la tectónica de placas, la comunidad científica ha logrado integrar los datos geológicos, geofísicos y geodésicos para ofrecer modelos a escala planetaria y regional que permiten comprender razonablemente bien cómo funciona nuestro planeta. Y lo han conseguido con un detalle inimaginable para los grandes pioneros de esta teoría que revolucionó la geología y las ciencias de la Tierra, como el propio Wegener, Tuzo Wilson, Harry H. Hess, Arthur Holmes, Xavier Le Pichon, Frederick Vine, Drummond Matthews, Dan McKenzie, John Dewey o Allan V. Cox, entre otros muchos.

El conocimiento detallado de este puzzle litosférico, no sólo de las grandes piezas, sino de otras cuantas decenas más pequeñas, está permitiendo explicar el porqué de los grandes terremotos, la localización de los volcanes activos, la distribución de los grandes cinturones de rocas, los grandes rasgos del relieve terrestre o los eventos clave que cambiaron el clima en la historia de nuestro planeta.

La irrupción de nuevas técnicas geodésicas, especialmente la del GPS, ha impulsado de forma espectacular el conocimiento sobre el número de

Fig. 12. Mapa de la zona de subducción entre las placas de Nubia y del mar Egeo. Se han señalado las posiciones del prisma de acreción (sedimentos submarinos), el arco externo no volcánico y el arco volcánico activo. Se ha utilizado como base una imagen de Google Earth.

placas tectónicas y su movimiento relativo. En el momento en el que se publica este monográfico, es el modelo MORVEL-56 el que ofrece una imagen más realista de nuestro planeta, con 56 placas tectónicas. Sin embargo, este modelo es sólo una transición hacia otros modelos más precisos que nos depararán unos próximos años apasionantes. Los nuevos datos científicos permitirán concretar el número de piezas de este extraordinario puzle de placas tectónicas, precisar la geometría de cada una de ellas (sus límites) y estimar el movimiento relativo entre todas ellas.

Además, los datos geodésicos están demostrando que las placas no tienen un comportamiento completamente rígido, sino que sufren, en mayor o menor medida, una deformación interna. La cuantificación de esta deformación interna aportará en los próximos años, a lo largo y ancho de nuestro planeta, modelos tectónicos cada vez más precisos.

BIBLIOGRAFÍA

Alfaro, P., Andreu, J.M., González, M., López, J.A. y Pérez, A. (2007). Un estudio integrado del relieve terrestre. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 15.2, 112-123.

Alfaro, P., Alonso-Chaves, F., Fernández, C. y Gutiérrez-Alonso, G. (2013). La tectónica de placas, teoría integradora sobre el funcionamiento del planeta. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 21.2, 168-180.

Argus, D.F., Gordon, R.G. y DeMets, C. (2011). Geologically current motion of 56 plates relative to the nonet rotation reference frame. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 12, Q11001, doi:10.1029/2011GC003751.

Bird, P. (2003). An updated digital model of plate boundaries. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 4, 1027, doi: 10.1029/2001GC000252.

DeMets, C., Argus, D. y Gordon, R. MORVEL and NNR-MORVEL56 plate velocity estimates and information. http://geoscience.wisc.edu/~chuck/MORVEL/motionframe_mrvl.html

DeMets, C., Gordon, R.G. y Argus, D.F. (2010). Geologically current plate motions. *Geophys. J. Int.*, 181, 1-80.

DeMets, C., Gordon, R.G., Argus, D.F. y Stein, S. (1990). Current plate motions. *Geophys. J. Int.* 101, 425-478.

DeMets, C., Gordon, R.G., Argus, D.F. y Stein, S. (1994). Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal timescale. *Geophys. Res. Lett.*, 21, 2191-2194.

Dewey, J.F. (2007). The secular evolution of plate tectonics and the continental crust: An outline. *Geological Society of America Memoirs*, 200, 1-7.

Fernández, C., Alfaro, P., Alonso-Chaves, F. y Gutiérrez-Alonso, G. (2019). Qué mueve las placas tectónicas. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 27.3.

Fernández, C., Alonso Chaves, F.M. y Anguita, F. (2013a). Astenosfera: ser o no ser. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 21.1, 2-15.

Gallen, S.F., Wegmann, K.W., Bohnenstiehl, D.R., Pazzaglia, F.J., Brandon, M.T. y Fassoulas, C. (2014). Active simultaneous uplift and margin-normal extension in a forearc high, Crete, Greece. *Earth and Planetary Science Letters*, 398, 11-24. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2014.04.038>

González, M., Alfaro, P. y Brusi, D. (2011). Los terremotos "mediáticos" como recurso educativo. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 19.3, 330-342.

Kearey, J.F. (2007). The secular evolution of plate tectonics and the continental crust: An outline. En: *4-D Framework of Continental Crust* (Eds.: R.D. Hatcher, M.P. Carlson Jr., J.H. McBride y J.R. Martínez-Catalán). Geological Society of America Memoir, 200, 1-7.

Kearey, P. y Vine, F.J. (1990). *Global Tectonics*. Blackwell Science, 334 p.

Minster, J. B. y Jordan, T. H. (1978). Present-day plate motions. *Journal of Geophysical Research*, 83 (10), 5331-5354.

Pedrinaci, E., Alcalde, S., Alfaro, P., Almodóvar, G.R., Barrera, J.L., Belmonte, A., Brusi, D., Calonge, A., Cardona, V., Crespo-Blanc, A., Feixas, J.C., Fernández-Martínez, E., González-Díez, A., Jiménez-Millán, J., López-Ruiz, J., Mata-Perelló, J.M., Pascual, J.A., Quintanilla, L., Rábano, I., Rebollo, L., Rodrigo, A. y Roquero, E. (2013). Alfabetización en ciencias de la Tierra. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 21.2, 117-129.

Regard, V., Hatzfeld, D., Molinaro, M., Aubourg, C., Bayer, R., Bellier, O., Yamini-Fard, F., Peyret, M. y Abbassi, M.R. (2010). The transition between Makran subduction and the Zagros collision: recent advances in its structure and Active deformation. *Special Publication - Geological Society of London*, 330, 41-64.

Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R., Ozener, H., Kadirov, F., Guliev, I., Stepanyan, R., Nadariya, M., Hahubia, M., Mahmoud, S., Sakr, K., ArRajehi, A., Paradissis, D., Al-Aydrus, A., Prilepin, M., Guseva, T., Evren, E., Dmitrova, A., Filikov, S.V., Gomez, F., Al-Ghazzi, R. y Karam, G. (2006). GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of Geophysical Research*, 111, B05411. doi:10.1029/2005JB004051

Reilinger, R., McClusky, S., Paradissis, D., Ergintav, S. y Vernant, P. (2010). Geodetic constraints on the tectonic evolution of the Aegean region and strain accumulation along the Hellenic subduction zone. *Tectonophysics*, 488, 1-4, 22-30.

Scotese, C.R. *Paleomap Project*. <http://www.scotese.com>

Universidad de Tokio. *Plate motion calculator*. http://ofgs.aori.u-tokyo.ac.jp/~okino/platecalc_new.html

Uyeda, S. (1978). *The new view of the Earth*. Ed. W.H. Freeman.

Wilson, J.T. (1966). Did the Atlantic close and then reopen? *Nature*, 211, 676-681. ■

Este artículo fue recibido el día 8 de abril de 2019 y aceptado definitivamente para su publicación el 28 de julio de 2019.