TODO LO QUE BRILLA

Cómo *los* **metales** *han* **formado** *nuestra* **historia**

IRENE DEL REAL



Índice

Capítulo 1
La historia subterránea 9

Capítulo 2
El origen del planeta y su tiempo geológico: ¿Qué son y de dónde vienen los metales? 16

Capítulo 3
La revolución permanente: de la edad de los metales a la Revolución Industrial 54

Capítulo 4
Descubrimientos y destellos: de los Curie a la montaña rusa del siglo XX 116

Capítulo 5
Hoy y mañana: la necesidad de un nuevo paradigma de consumo 162

Epílogo
Detengamos la minería, proyectemos un mundo sin metales 201

Para Cecilia, Jorge, Sofri y Ernestina

Capítulo 1
La historia subterránea

Al pensar en los elementos vitales para el desarrollo diario, solemos detenernos en la alimentación o la salud, casi nunca en los metales. Sin embargo, si hacemos el ejercicio de imaginar nuestras vidas sin estos rápidamente nos damos cuenta de que es muy difícil ignorar su importancia. Los metales nos permiten tener cosas esenciales para la cotidianidad como computadores, celulares, materiales de construcción, cables eléctricos, cubiertos para comer, resortes para colchones y un muy largo etcétera. Somos dependientes de ellos: sin metales la sociedad actual no tiene mucho espacio para funcionar, y la cosa se pone aún más compleja cuando reflexionamos sobre el futuro y la evidente urgencia de modificar la manera en la que nos estamos relacionando con el entorno.

Los efectos del cambio climático son cada vez más dramáticos y, aunque ya sabemos que debemos dejar de quemar y consumir combustibles fósiles (y tenemos claro que uno de los pasos clave es transicionar al uso de energías renovables para revertir la crisis), todavía nos queda un largo trecho que avanzar. El paso lógico es consumir energía de origen renovable —solar, eólica, geotérmica— a nivel mundial, darle prioridad a los medios de transporte

eléctricos para alcanzar cero o poca emisión de CO_2 y decirle adiós al petróleo. Y aquí los metales juegan un rol fundamental porque nos permiten contar con paneles solares, autos eléctricos y otros productos imprescindibles para la anhelada transición.

¿Pero de dónde sacamos los metales?

Los metales crecen en los árboles y en su inmensa mayoría no se fabrican en laboratorios, sino se obtienen de la tierra: son recursos no renovables que se acumulan formando depósitos minerales mediante una serie de procesos geológicos complejos que controlan su disposición, transporte, y que —a través de la minería— se extraen desde la subsuperficie. Los depósitos metálicos más importantes del mundo pueden tener hasta miles de millones de años de antigüedad. Así, el impacto que tienen en nuestras vidas se manifiesta de forma sigilosa, pero su relevancia es inmensa. La manera en que se acumulan los metales no es aleatoria y, con el paso de los años, entender cómo se transportan bajo nuestros pies se convirtió en una de mis grandes pasiones como científica.

Como geóloga me dedico a estudiar y comprender las rocas y los minerales, además de los procesos que han moldeado la forma actual de la Tierra. Mientras los biólogos se dedican a entender esa parte del planeta que está viva, los geólogos y geólogas analizamos la materia inorgánica que representan las rocas y la historia que se desarrolla subterráneamente, la composición, la estructura, la dinámica y el origen del planeta.

Nuestro planeta tiene cerca de 4500 millones de años de historia geológica y cambia todos los días. Para ponerlo en escala, los dinosaurios lo habitaban hace tan solo 150 millones de años y nosotros los humanos (*homo sapiens*) hace trescientos mil. Pero existen rocas cuya edad supera los cuatro billones de años que, a través de su química, sus texturas y minerales permiten comprender mejor la evolución de la Tierra, a pesar de que es poca la evidencia que queda del pasado sobre la superficie. (Si ya resulta desafiante encontrar restos que ilustren cómo vivía el hombre

hace unos pocos miles de años, imagínense buscar pistas o datos de cómo evolucionó el planeta durante millones y millones).

Dedicarse a la geología tiene mucho de detectivesco: buscamos piezas de puzles que nos ayuden a entender el pasado, e interpretamos el presente planteando distintas hipótesis cuya comprobación y sustento requiere de la ayuda de la química y la física. Todo esto la convierte también en una ciencia muy creativa, que requiere abstracción y perspectiva para imaginar, por ejemplo, cómo era la costa de Chile hace ciento veinte millones de años.

Quizá la geología es más laxa que otras ciencias, pero también más humilde en sus propuestas y teorías, ya que quienes nos dedicamos a ella navegamos siempre entre modelos que podemos sugerir que ocurrieron, pero rara vez planteamos verdades absolutas. Y es que la Tierra nunca se queda quieta (y esto los chilenos lo sabemos bien). Mediante los terremotos y las erupciones volcánicas la Tierra nos muestra que bajo nuestros pies hay una maquinaria gigante que la mantiene activa y a nosotros, literalmente, vivos. El sistema que nos rodea es dinámico, inquieto, se mueve: las montañas crecen, las rocas se erosionan, nuestros huesos pueden fosilizarse, los glaciares vienen y van, pero a una velocidad tan lenta que no lo alcanzamos a apreciar. La escala de tiempo geológico está del todo desacoplada a nuestra escala de tiempo como humanos, y esa fue una de mis principales motivaciones para estudiar esto (junto con pasar horas en terreno subiendo y bajando cerros).

Cuando decidí que esto era lo mío mis papás quedaron extrañados. Mi mamá me reclamó que nunca había recogido una piedra en mi vida —lo que es en parte cierto, a diferencia de varios colegas— y mi papá creía que iba a estudiar Derecho por lo buena que salí para alegar y pelear. Pero más allá de sus planes para mí, debo decir que ambos influyeron en mi elección por una carrera científica y en mi interés por conectar la investigación con las necesidades sociales que observaba en el entorno. Crecí en una

familia que se esforzaba por fomentar la curiosidad, donde las revistas científicas y las enciclopedias eran prioritarias para el aprendizaje y las vacaciones consistían en acampar y subir cerros, en conectarnos con la naturaleza. Siempre hubo espacio para la duda, para hacer y responder preguntas, y creo que eso naturalmente devino en una preocupación por cuestionar lo que veía a mi alrededor. Como en su juventud mi papá trabajó en minas, además, también crecí escuchando de él las más increíbles historias sobre pingüinos perdidos en el desierto de Atacama, o alucinantes viajes al interior de minas de carbón, lo que fue consolidando mi amor por la tierra y acercándome a lo gigante e imponente que es la minería, a valorar su peso histórico y el rol que juega en nuestro futuro.

Cuando entré a la universidad hubo un momento que reafirmó que había tomado la decisión correcta. Estaba en la primera salida a terreno de la carrera, era el final del día y con el curso estábamos mirando unas rocas estratificadas en la zona de Lo Valdés, en el Cajón del Maipo, que están llenas de fósiles marinos de más de 100 millones de años. Lo que me asombró fue que esas rocas se habían formado bajo el mar de manera horizontal —como pisos de una torta con bichos marinos— y hoy sus capas eran casi verticales, un estrato al lado del otro. Me impresionó pensar en ese movimiento y en el dinamismo y fuerza de la Tierra, capaz de mover y deformar capas y capas de rocas, construir montañas, desplazar continentes, formar volcanes, cambiar el clima, extinguir especies completas y permitir que nazcan nuevas. ¿Qué puede ser más hermoso que entender el mundo que habitamos? En especial esa parte que no vemos, pero sabemos que existe y que funciona como el motor de nuestra existencia.

De este modo me empecé a enamorar de la geología. Y cuando terminé la carrera me di cuenta de que quería seguir aprendiendo, pero sin desconectarme del mundo real donde la geología

sirve un propósito más práctico que teórico. Así decidí hacer un posgrado en Geología Económica, un área fascinante y diversa que estudia cómo se forman los depósitos minerales metálicos y no metálicos, incluyendo conocimientos específicos sobre la dinámica de la corteza terrestre y el manto que permiten entender cómo funciona el planeta. La forma en que se mueven y acumulan los metales en la corteza depende directamente de la tectónica de la tierra, de si hay o no volcanismo, de qué tipo de deformación existe bajo la superficie, e incluso de cómo era la atmósfera al momento de originarse ciertos depósitos, y la geología económica contempla todas estas variables en sus análisis.

Con el tiempo me especialicé en la materia y disfruté lo hermoso de aprender cómo funciona el mundo que nos rodea, pero en medio de mis estudios de doctorado empecé a cuestionar el verdadero aporte de mi trabajo. ¿Qué utilidad tenían mis investigaciones para la sociedad? Comparaba lo que hacía con la labor de conocidos y amigos que se desempeñaban en otras áreas profesionales, y veía que, mientras sus empleos tenían un impacto inmediato en la vida de las personas, las principales beneficiadas con mis investigaciones eran las empresas mineras. ¿A eso me quería dedicar? ¿A entender y valorar nuestro planeta para terminar ayudando a grandes empresas a lucrar?

Me costó mucho verle el sentido a lo que estaba haciendo, pero tras una larga temporada de terreno por Tierra Amarilla, comprendí la relevancia que mis investigaciones podrían tener para el presente y futuro de nuestra sociedad. Cuando estaba por terminar mi trabajo en las cercanías de Copiapó, recibí una visita de mi profesor guía que quería discutir sobre algunas de las cosas que estaba viendo en terreno. Como ha sido mi mayor mentor y es una persona con una inmensa energía e inteligencia, luego de conversar sobre mi investigación decidí comentarle mis dudas, la crisis que estaba viviendo, y averiguar de qué forma estábamos ayudando al mundo con lo que hacíamos.

Una vez más me sorprendió con su capacidad para ver hacia dónde va la cosa y su respuesta se convirtió en uno de los pilares de mi trabajo: los metales que extrae la minería son la materia prima que sostiene nuestro desarrollo, el ingrediente básico para nuestro funcionamiento. Casi todo lo que construimos y usamos está compuesto de metales, y nosotros como geólogos ayudamos a buscarlos y a extraerlos. Tenemos un rol en la cadena de necesidades sociales bastante alejado de la primera línea, pero no por eso menos importante. Aún existen lugares en el mundo donde no hay electricidad, donde se necesitan construir hospitales, caminos o un mejor acceso a la tecnología, todo eso necesita materia prima, necesita metales. Me gusta pensar que nuestro aporte es para que nuestra sociedad pueda seguir desarrollándose y lograr un nivel de vida más equitativo.

Por siglos hemos observado desastres medioambientales y sociales donde la minería ha sido protagonista, lo que ha generado —con justa razón— que no cuente con la mejor fama. Es difícil superar las imágenes de un buldócer removiendo glaciares para construir un camino minero en Pascua Lama, o de la rotura del enorme tranque de relave en Brasil que generó un desastre natural y terminó con la vida de varias personas; pero lo cierto es que seguiremos necesitando los metales que se buscan extraer y siempre en mayor cantidad. Por eso debemos transformar desde ya la minería y dejar de proteger un *status quo* que no nos permitirá avanzar. La necesidad de este recurso es global y Chile juega un rol vital en su cobertura, puesto que hoy extrae casi el 30 por ciento del cobre mundial y tiene una de las mayores reservas de litio en el mundo. Detener el suministro de cobre en Chile implica detener el de una buena parte del planeta (pegándole más duro a aquellos países que están en vías de desarrollo); y optar por el litio implica —a pesar de las justificadas preocupaciones acerca de su impacto en el medioambiente— apostar por la electromovilidad y la transición energética.

Pero, la verdad, es que Chile es mucho más que cobre y litio: tiene una riqueza mineral grandiosa que exploraremos desde distintos escenarios. El mundo necesita con urgencia cambiar y adaptarse a un nuevo estilo de vida que conviva amablemente con el medioambiente y la sociedad, y para eso debemos ser conscientes de qué y cómo cambiar, entender hacia dónde debiesen apuntar los gobiernos y lograr un sincretismo entre los requerimientos globales y las individualidades propias de cada territorio. Los metales son clave para el devenir, y la forma en que los usamos y extraemos es uno de los cambios prioritarios en la lista. La minería está entrelazada con toda nuestra existencia, así que antes que desaparecer necesita reformas radicales que nos permitan crecer de manera más sustentable y sostenible en el tiempo.

Es un tema complejo, pero apasionante, y voy a tratar de revisar cómo los metales nos han acompañado en nuestra historia, cómo se entrelazan con la ciencia, cómo fueron pilares para grandes guerras y esenciales para nuestra supervivencia. Mi única aspiración es que podamos tener una opinión más informada al respecto, ya sea de amor o de odio, pero que nos ayude a tomar decisiones en el futuro.

Capítulo 2

El origen del planeta y su tiempo geológico: ¿Qué son y de dónde vienen los metales?

Hoy conocemos de nuestra evolución como humanos y de la evolución de la Tierra, pero ¿sabemos realmente de dónde vienen los metales y cómo se crearon? El astrónomo y legendario comunicador científico Carl Sagan decía que somos polvo de estrellas —también lo dice una canción de Jorge Drexler, el cantante favorito de mi papá— y tenía un punto en ello, ya que los elementos de la tabla periódica, de los que todo y todos estamos hechos, se formaron por diversos procesos relacionados con el nacimiento y muerte de estrellas y, en conjunto, configuraron el esqueleto de nuestra existencia.

Las primeras estrellas de nuestro universo eran simplemente nubes de hidrógeno y helio, los elementos iniciales de la tabla y también los más livianos, cuyos átomos se crearon a partir del Big Bang. Al aumentar la presión y temperatura en el centro de estas, los átomos de hidrógeno y helio «no se sentían estables», por lo que debieron fusionarse para conseguir permanencia a través de átomos de elementos más pesados, como el carbono y

el oxígeno. Las estrellas no son infinitas y llega un punto, cercano a su muerte, en que sus centros se convierten en espacios aún más densos, lo que implica más y más presión para los átomos de los elementos livianos, que los lleva a seguir fusionándose hasta alcanzar elementos como el hierro, número 26 en la tabla.

Con la muerte masiva de las estrellas se forma una supernova, un evento explosivo que libera los átomos de elementos más pesados y les permite volver a juntarse con otros para dar origen a una nueva estrella. Lo que queda detrás de una supernova es una estrella de neutrón, tan-tan densa que puede concentrar la masa de un sol y medio en una pelota de solo quince kilómetros de diámetro. Otra aproximación: una cucharadita de té de una estrella de neutrón pesa diez millones de toneladas.

Muchas de las estrellas son sistemas binarios, consisten en dos estrellas entrelazadas por gravedad que orbitan una sobre la otra. Imagínense dos estrellas muertas, convertidas en estrellas de neutrón, densas como ellas mismas orbitando juntas. Eventualmente, la fuertísima gravedad de estos gigantes densos hará que el baile entre ambos termine en el mega choque que los astrónomos han denominado kilonova. Este evento, que seis años atrás era un mero supuesto teórico, fue detectado en 2017 por un telescopio y pudimos verlo por primera vez a «tan solo» ciento treinta millones de años luz de distancia. La densidad creada por una kilonova es suficiente para crear los elementos más pesados de la tabla periódica, y se estima que de uno de estos eventos sale diez veces el tamaño de la Tierra en oro (es probable que esa cadenita o joya de oro que andan usando, se haya fabricado con metales provenientes de una de esas colisiones entre estrellas).

A propósito —con la excepción de las aliaciones— todos los metales forman parte de la tabla periódica. Si consideramos los metaloides, de los 118 elementos que la componen, 94 son metales con características diversas y de distinto tipo: alcalinos (como el sodio), alcalinotérreos (como el magnesio) y metales de

transición (los más abundantes). A su vez, los metales de transición se subdividen en lantánidos, actínidos y transactínidos.

No está de más mencionar que algunos de los elementos de la tabla periódica los creamos nosotros los humanos de manera sintética a través de reactores nucleares, pero la gran-gran mayoría provienen de eventos estelares de enorme escala, donde todo parte y termina como polvo de estrellas.

El arribo terrestre: conociendo el planeta

Nuestro planeta se formó con metales incluidos, pero existen algunas discrepancias respecto a cuáles y cuántos. Mientras algunos investigadores sostienen que todos los metales que tenemos vienen desde sus orígenes, otros afirman que buena parte de estos —y principalmente los más cercanos a la superficie— llegaron vía choque de meteoritos.

Alrededor de 4600 millones de años atrás, nuestro sistema solar era una nube de polvo y gas conocida como nébula solar. La gravedad hizo lo suyo y logró que esta nube colapsara sobre sí misma y comenzara a girar, proceso que dio paso a la formación del Sol en medio de la nébula y generó que el material remanente se empezara a juntar formando cada vez partículas de mayor tamaño. Vientos solares resultantes de este nacimiento barrieron con gran parte de los elementos más ligeros —como el hidrógeno y el helio—, dejando atrás un material rocoso que se transformó en pequeños mundos terrestres similares al nuestro. A mayor distancia del Sol, menos viento llegaba, evitando así el movimiento de los elementos más ligeros y propiciando la formación de planetas gigantes, como Júpiter y Saturno, compuestos más bien de gas. La repetición de este proceso de manera prolongada creó el sistema solar que conocemos.

La Tierra surgió de la colisión entre asteroides y elementos pesados, que se fueron entrelazando. Durante esa primera etapa

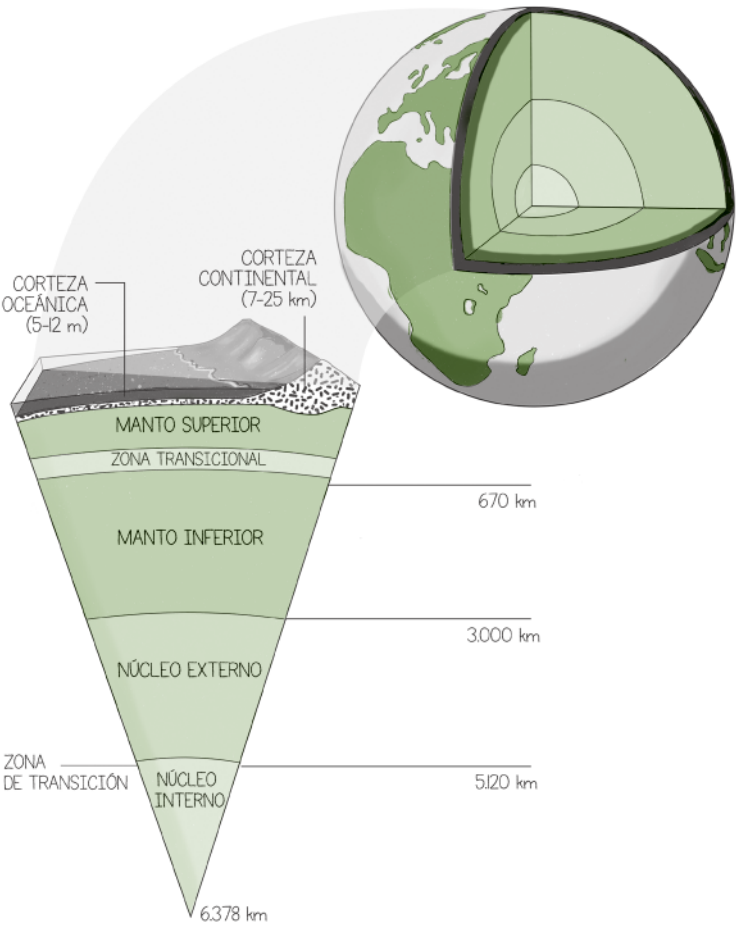
se formó el núcleo, gracias a que el material más denso (y, por ende, los elementos más pesados) se hundió hacia el centro de la proto-tierra y el material liviano quedó más cerca de la superficie, formando distintas capas. Con esto queda claro que nuestro planeta no es homogéneo, algo muy importante si consideramos que los billones de años que lleva segmentándose por capas también sirven para explicar por qué y dónde encontramos concentraciones anómalas de metales.

Como una cáscara de huevo, la corteza cubre el planeta en su parte externa, con un grosor de entre cinco y setenta kilómetros, y corresponde al lugar que los seres humanos habitamos. Bajo esta delgada corteza, existen tres mil kilómetros de espesor de lo que llamamos manto, el componente principal de la Tierra.

El manto y la corteza son composicional y fisicoquímicamente diferentes: el primero es más profundo y presenta condiciones de presión y temperatura mayores. Por último, la capa más profunda es el núcleo, que dividimos en dos partes: un núcleo exterior compuesto de forma principal por hierro y níquel fundido, y un núcleo interior sólido de más de dos mil kilómetros de diámetro que, en el grueso, se compone de hierro y crece alrededor de un milímetro por año, enfriando con lentitud el planeta.

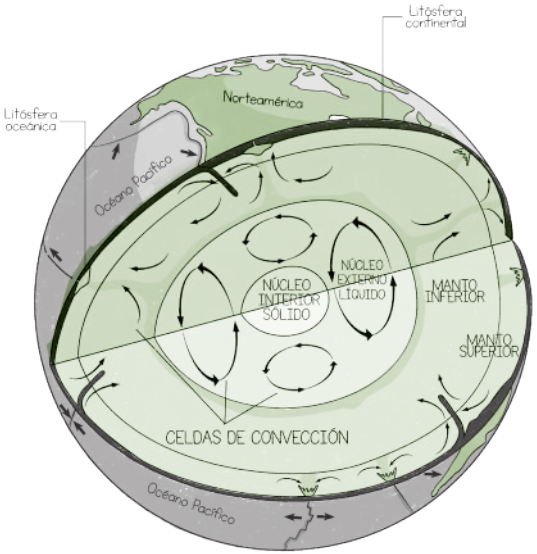
Las capas se componen de distintas maneras. Por ejemplo, si observáramos el núcleo identificaríamos con claridad el hierro y el níquel, pero también la presencia de otros metales como el oro, el platino, el cobalto —que, al no ser comunes en la corteza, han sido llamados «metales preciosos»— y el azufre. Mientras el núcleo exterior —que está en estado líquido— tiene una viscosidad bastante baja que lo hace más maleable y fácil de deformar; el sólido núcleo interno gira a una velocidad más rápida de la que gira la Tierra, generando celdas de convección responsables de crear su campo magnético.

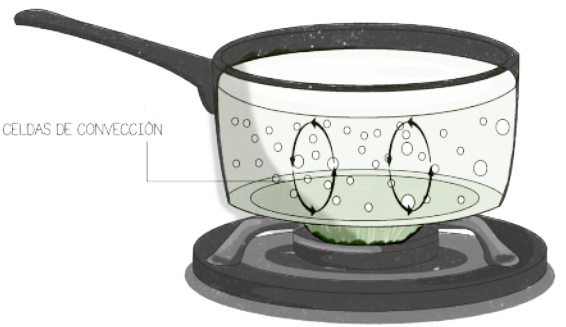
Porque la convección es uno de los conceptos más importantes en la materia.



¿Les ha pasado que prenden la estufa en la casa y se dan cuenta de que está más calentito cerca del techo que del suelo? O al hervir agua, ¿han notado que las burbujas de vapor suben desde el fondo de la olla? Esto ocurre porque con el calor el material se expande, pierde densidad y tiende a subir. Lo mismo pasa al interior de la Tierra: sea dentro del núcleo líquido o en las cámaras magmáticas, aquellas partes de mayor temperatura de la corteza suben y las de

menor tienden a bajar, y al estar en zonas de mayor profundidad se vuelven a calentar hasta subir y viceversa. Este vaivén produce la llamada «celda de convección»: un ciclo de material caliente que sube, se enfría, baja, vuelve a calentarse y vuelve a subir. Es la nafta del planeta y la razón por la que tenemos placas tectónicas.





Otro concepto fundamental es el de campo magnético. Algunos dirán: ¿Y qué me importa a mí esto? Bueno, sin campo magnético seguro estaríamos todos muertos, ya que es el gran escudo del planeta. Su rol consiste en deflactar el viento solar que viene cargado de partículas listas para destruir la capa de ozono, capa que nos protege de los dañinos rayos ultravioleta. Para hablar sobre su formación, debemos volver a la convección, en específico a la que ocurre dentro del núcleo externo. Recordemos que este se compone principalmente de hierro y níquel, dos metales con una enorme carga catiónica, y al correr celdas de convección en esta zona se empieza a generar una corriente eléctrica denominada geodínamo. El campo magnético forma dos polos sobre la superficie de la Tierra: el norte y el sur magnético, que tienen cargas opuestas, como un imán. Las líneas de este campo magnético viajan de norte a sur y de sur a norte en un loop invisible a nuestros ojos, protegiéndonos de los vientos solares.

El manto, que se sitúa entre la corteza y el núcleo, tiene bastante más diversidad que este último y se compone en su mayoría por minerales silicatados como el olivino, granate y piroxeno, minerales compuestos con sílice, oxígeno y otros elementos. Su temperatura y presión aumentan a mayor profundidad y, aunque se le considera principalmente roca sólida, su viscosidad tiende a variar y a hacerlo más móvil, en especial en las zonas cercanas a los bordes de las placas tectónicas y las plumas mantélicas.

Siguiendo el principio de convección que ya conocemos, en el curso de millones de años las rocas que lo componen adquieren la capacidad de moverse, y esta transferencia de calor y material dentro del manto es el principal determinante de los paisajes y la morfología que vemos en la superficie del planeta. La actividad en el manto mueve las placas tectónicas, contribuye al volcanismo, al crecimiento de la superficie marina, a la generación de terremotos y a la formación de montañas (orogenia).

Los lugares y motivos por los que encontramos metales se vinculan de manera íntima con distintos procesos geológicos que suelen ocurrir a profundidad, durante miles de millones de años, y con los movimientos de masa internos que estos provocan en el manto y la corteza terrestre. El tiempo geológico es como un desacople de nuestra interacción temporal, funciona casi con total independencia. Y es que para entenderlo basta con darnos cuenta de que la Tierra tiene más de cuatro billones de años y nosotros solo un microsegundo dentro de su historia, lo que exige olvidarnos por un momento del tiempo humano para así entender sus propias velocidades. Y no es fácil pensar el tiempo en dos escalas diferentes. Si nos dicen que una persona tiene cien años pensamos en su senilidad, pero una roca de la misma edad es un bebé recién nacido.

La parte exterior de nuestro planeta es la litósfera, que está rota en más de quince placas que cubren la superficie formando una especie de tetris y se sitúan sobre el magma fundido llamado astenosfera. La convección de la astenósfera y la litósfera hace que las placas se muevan, y es esta interacción entre placas tectónicas la responsable de la formación de cordilleras, fallas, volcanes y terremotos. Los bordes de estas placas pueden generar nueva corteza, o hacer que la corteza densa existente entre en contacto con la menos densa y vuelva al manto, haciendo las veces de cinta transportadora.

Nuestra corteza es una cáscara fina que solo representa el 1 por ciento de la masa total del planeta y contiene toda la vida que hay en él. Se compone de roca sólida y minerales, y es la más joven de las capas de la tierra. A través de millones de años, el manto se fue enfriando y de este modo diferenciando, pero había elementos que no se sentían «cómodos» mientras el manto se iba enfriando y solidificando, y se fueron yendo a la parte residual. Imaginemos estos elementos dentro de un magma donde también habían fluidos (agua y gases): esta procesión de abandono del manto lo llamamos desgasificación, y aquellos elementos que se iban escapando los