

Geodesia

Geodesia, ciencia matemática que tiene por objeto determinar la forma y dimensiones de la Tierra, muy útil cuando se aplica con fines de control, es decir, para establecer la ordenación de tierras, los límites de suelo edificable o verificar las dimensiones de las obras construidas. La topografía de los terrenos, los elementos naturales y artificiales como embalses, puentes y carreteras, se representan en los mapas gracias a los levantamientos geodésicos. Las mediciones en un estudio topográfico son lineales y angulares, y se basan en principios de geometría y trigonometría tanto plana como esférica. En la actualidad, se utilizan satélites artificiales para determinar la distribución irregular de masas en el interior de la Tierra, así como su forma y dimensiones a partir de las irregularidades en sus órbitas.

2 INSTRUMENTOS DE MEDIDA

Groma egipcio Se cree que la planimetría tuvo su origen en Egipto, ya que la construcción de edificios tan grandes como las pirámides requiere gran habilidad en la medida de ángulos y en el cálculo de distancias. Los primeros equipos de topografía, como este groma egipcio, eran de uso limitado, pero eran aparentemente suficientes para nivelar y medir ángulos de pequeña abertura. El groma consiste en unas piedras que se suspenden en unas varillas dispuestas en ángulo recto. La distancia de los objetos se marcaba según la disposición de las piedras en el plano

Las longitudes horizontales se miden con reglas o cintas calibradas y, a veces, con sistemas electrónicos que registran el tiempo que tardan en desplazarse, entre dos puntos, las ondas de luz o radio. Las mediciones de longitudes verticales se realizan con una mira vertical graduada para determinar las diferencias de nivel y de altitud. El nivel de ingeniero consiste en un telescopio montado sobre un trípode plegable, equipado con un nivel de burbuja y una retícula que se utiliza para ver las graduaciones en la mira. Los ángulos horizontales y verticales se miden con un teodolito, telescopio montado sobre un trípode plegable con un limbo vertical y otro horizontal, cuyos círculos graduados indican los ángulos en grados, minutos y segundos.

Levantamiento de una carretera El ingeniero de la izquierda mira a través del ocular del teodolito hacia la 'mira' que sostiene un segundo ingeniero en la carretera. Las medidas topográficas que se realizan son las distancias horizontales y los ángulos vertical y horizontal. El tercer miembro del equipo toma nota de los datos. Photo Researchers, Inc./Blair Seitz

Los distanció metros, o aparatos electrónicos de medida de distancias, pueden dar resultados muy exactos, con una resolución entre 1 y 6 partes por millón (error relativo). Así, por ejemplo, un error de 5 partes por millón (ppm) representa 5mm/km. También se están desarrollando aparatos electrónicos de gran precisión para la medida de ángulos. Los teodolitos utilizan lentes que permiten un mayor aumento y pueden ser, además, más pequeños que los anteriores. Estos instrumentos son cada vez más exactos, siendo capaces de medir centésimas de segundo de arco. Para nivelaciones diferenciales se usa también un nivel de ingeniero automático, que utiliza un prisma pendular o una luz reflectante.

3 MEDIDAS EN EL PLANO

Los estudios topográficos planos consideran cualquier pequeño segmento del terreno o del agua como un plano horizontal. Tales mediciones suelen proyectarse y calcularse en un sistema de coordenadas rectangular horizontal, con una orientación norte-sur y este-oeste, aunque la cuadrícula puede estar orientada en una dirección arbitraria que resulte más conveniente que la geográfica real. A partir de una estación o punto de origen de coordenadas asignadas, se mide la distancia horizontal hasta otro punto y después hasta otro haciendo un itinerario, para finalmente acercarse de nuevo al punto original o a cualquier otro punto de coordenadas conocidas. Una sucesión de estas líneas o recorridos conforma una línea quebrada o poligonal.

Los ángulos horizontales entre estaciones sucesivas se miden con un teodolito en cada estación o vértice. Por tanto, a partir de una dirección inicial conocida o asignada arbitrariamente, pueden calcularse las direcciones sucesivas. Para determinar las coordenadas de las estaciones en la poligonal se utilizan cálculos de geometría y trigonometría plana. La distancia al norte o al sur de una línea poligonal es su longitud multiplicada por el coseno del ángulo de dirección; la distancia al este o al oeste del itinerario de una línea poligonal es su longitud multiplicada por el seno del ángulo de dirección. Las coordenadas permiten trazar los ejes a cualquier escala en una cuadrícula, y esto puede servir para el posterior trazado o control de otros detalles dibujados en un mapa o carta geográfica.

En lugar de una poligonal puede utilizarse una triangulación, midiendo sólo una línea de base, pero calculando después todos los ángulos en una cadena de triángulos y las coordenadas de los vértices sucesivos. En la actualidad, el avance de la distanciometría electrónica permite observar todos los ángulos y todos los lados (triangulación y trilateración). La elección de la poligonal o de la triangulación dependerá del tipo de terreno en el que estemos trabajando.

4 LEVANTAMIENTO GEODÉSICO

Para áreas extensas, las mediciones topográficas tienen en cuenta la forma básica de la Tierra, el geoide (casi esférica), por lo que se las denomina levantamientos geodésicos. Se basan en un meridiano norte-sur verdadero definido por el eje de rotación de la Tierra y se apoyan en la geometría esférica. En Estados Unidos, por ejemplo, existen sistemas de coordenadas planas en casi todos los estados, con conversiones de coordenadas planas a coordenadas geodésicas realizadas mediante relaciones tabuladas. Un ejemplo típico de esta clase de alzado es el trazado de un camino o carretera de muchos kilómetros de recorrido, con lo cual necesita un ajuste geodésico para evitar la acumulación de errores provocados por la convergencia de los meridianos.

5 LEVANTAMIENTOS CATASTRALES

Los levantamientos catastrales del terreno se realizan para establecer los límites de su extensión, colocando indicadores y postes en los vértices para determinar las coordenadas de dichos puntos y obtener, así, la información necesaria del área y sus límites. Estas medidas tienen que constar en los datos de escritura de un terreno, y también son necesarias para trazar y reflejar en un gráfico las áreas de la propiedad. Los levantamientos topográficos de propiedades se realizan con un elevado grado de precisión, colocando en las esquinas hitos permanentes visibles y recuperables. Estos indicadores son convenientes para el registro público de la propiedad y para asegurar el título de propiedad correcto para el propietario legítimo del terreno. Además de las técnicas de levantamiento topográfico, los topógrafos o agrimensores deben conocer la legislación sobre la propiedad; la ley exige, generalmente, que estos profesionales estén registrados.

6 LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO

Los levantamientos topográficos son tridimensionales y utilizan técnicas de levantamiento geodésico plano y otras especiales para establecer un control tanto vertical como horizontal. La configuración del terreno y de los elementos artificiales o naturales que hay en él se localizan a través de medidas que se representan en una hoja plana para configurar un mapa topográfico. Las curvas de nivel, que unen puntos de igual altitud, se utilizan para representar las altitudes en cualquiera de los diferentes intervalos medidos en metros.

Muchos mapas topográficos se realizan gracias a la fotogrametría aérea; utilizan pares estereoscópicos de fotografías tomadas en levantamientos y, más recientemente, desde satélites artificiales como los spot. En las fotografías deben aparecer las medidas horizontales y verticales del terreno. Estas fotografías se restituyen en modelos tridimensionales para preparar la realización de un mapa a escala. Se requieren cámaras adecuadas y equipos de trazado de mapas muy precisos para representar la verdadera posición de los elementos naturales y humanos, y para mostrar las alturas exactas de todos los puntos del área que abarcará el mapa. En un plano

topográfico la altitud se representa mediante curvas de nivel, que proporcionan una representación del terreno fácil de interpretar.

7 LEVANTAMIENTO DE PLANOS PARA LA CONSTRUCCIÓN E INGENIERÍA

Las mediciones de ingeniería establecen puntos de control mediante poligonales, líneas de base u otros métodos con el fin de obtener la información necesaria para los diseños de obras de ingeniería (levantamientos) y para posicionar los elementos constructivos, basándose en los planos del proyecto que utilizan esos puntos de control (replanteos). Los levantamientos topográficos y los mapas a los que dan lugar proporcionan información sobre la localización horizontal y sobre las altitudes, necesarios para diseñar estructuras como edificios, embalses, canales, carreteras, puentes, tendidos eléctricos o colectores. Para levantar los planos de estas obras se parte de los mismos puntos de control utilizados en los levantamientos topográficos originales.

Los levantamientos geodésicos de construcciones implican la orientación y supervisión de mediciones de ingeniería que se coordinan en el levantamiento de planos y en la construcción de cualquier estructura.

8 LEVANTAMIENTOS CARTOGRÁFICOS Y CARTOGRAFÍA

Se denominan levantamientos geodésicos cartográficos a aquéllos que localizan puntos de control y obtienen detalles para la confección de mapas o cartas. Las cartas y los mapas a pequeña escala (que representan áreas extensas) son combinaciones de mapas a escala más grande de los cuales se eliminan y simplifican muchos detalles; a este proceso se le llama generalización cartográfica. Los mapas litorales representan la costa, pero de ésta muestran sólo los elementos que pueden ser importantes para la navegación y que están situados a lo largo de la línea de costa e informan de las profundidades del agua (líneas batimétricas). Las cartas aeronáuticas sólo muestran los rasgos geográficos más relevantes, como pueden ser las barreras, rutas aéreas, radiofaros y otros elementos de orientación como las vías de ferrocarril o carreteras.

9 LEVANTAMIENTO GEODÉSICO MARÍTIMO

Los levantamientos y confección de mapas marítimos, de los ríos, puertos o lagos, con el fin de establecer las profundidades para facilitar una navegación más segura, se realizan mediante sondeos manuales en observaciones llevadas a cabo desde los puntos de control de la costa. Los sondeos con sonar, efectuados de forma simultánea a la localización por radar del buque oceanográfico de sondeo, permiten también el trazado rápido y exacto de los mapas. Más lejos de la costa la localización será siempre menos precisa; los aparatos Loran y los satélites de navegación se utilizan para conseguir la localización más exacta posible de las embarcaciones en alta mar cuando éstas cuentan con equipamientos modernos.

10 LEVANTAMIENTO DE PLANOS DE MINAS

Los levantamientos de minas se utilizan para establecer la ubicación superficial y los límites de una concesión minera. Durante las operaciones en las minas, el levantamiento ayuda a establecer la ubicación exacta de los trabajos bajo tierra en vertical y en horizontal, a plantear las conexiones entre los túneles y a guiar la ejecución de estos últimos. Es un trazado tridimensional que, en esencia, apenas difiere del levantamiento topográfico superficial.

Geología (del griego, geo, 'tierra' y logos, 'conocimiento', por lo tanto, tratado o conocimiento de la Tierra), campo de la ciencia que se interesa por el origen del planeta Tierra, su historia, su forma, la materia que lo configura y los procesos que actúan o han actuado sobre él. Es una de las muchas materias relacionadas como ciencias de la Tierra, o geociencias, y los geólogos son científicos de la Tierra que estudian las rocas y los materiales derivados que forman la parte externa de la Tierra. Para comprender estos cuerpos, se sirven de conocimientos de otros campos, como la física, la química y la biología. De esta forma, temas geológicos

como la geoquímica, la geofísica, la geocronología (que usa métodos de datación) y la paleontología, ahora disciplinas importantes por derecho propio, incorporan otras ciencias, y esto permite a los geólogos comprender mejor el funcionamiento de los procesos terrestres a lo largo del tiempo.

Aunque cada ciencia de la Tierra tiene su enfoque particular, todas suelen superponerse con la geología. De esta forma, el estudio del agua de la Tierra en relación con los procesos geológicos requiere conocimientos de hidrología y de oceanografía, mientras que la medición de la superficie terrestre utiliza la cartografía (mapas) y la geodesia (topografía). El estudio de cuerpos extraterrestres, en especial de la Luna, de Marte y de Venus, también aporta pistas sobre el origen de la Tierra. Estos estudios, limitados en un primer momento a las observaciones telescópicas, recibieron un gran impulso con la exploración del espacio (véase Astronáutica) que se inició en la década de 1960.

Como ciencia mayor, la geología no sólo implica el estudio de la superficie terrestre, también se interesa por el interior del planeta. Este conocimiento es de interés científico básico y está al servicio de la humanidad. De esta forma, la geología aplicada se centra en la búsqueda de minerales útiles en el interior de la tierra, la identificación de entornos estables, en términos geológicos, para las construcciones humanas y la predicción de desastres naturales asociados con las fuerzas geodinámicas que se describen más adelante.

2 HISTORIA DEL PENSAMIENTO GEOLÓGICO

Los pueblos antiguos consideraban muchas características y procesos geológicos como obra de los dioses. Observaban el entorno natural con miedo y admiración, como algo peligroso y misterioso. Así, los antiguos sumerios, babilonios y otros pueblos, pese a realizar descubrimientos notables en matemáticas y astronomía, erraban en sus investigaciones geológicas al personificar los procesos geológicos. Las leyendas irlandesas, por ejemplo, sugerían que los gigantes eran responsables de algunos fenómenos naturales, como la formación por meteorización de las columnas basálticas conocidas ahora como la Calzada de los Gigantes. Estos mitos también eran corrientes en las civilizaciones del Nuevo Mundo; por ejemplo, los pueblos indígenas americanos pensaban que los surcos en los flancos de lo que se llegó a conocer como Torre del Diablo en Wyoming eran las huellas de las garras de un oso gigante.

2.1 Desde la antigüedad hasta la edad media

Uluru, Australia Uluru, también llamado Ayers Rock, está considerado como uno de los monolitos, o masa de roca individual, más grandes del mundo. Tiene una longitud de unos 2,4 km y una altura de 348 metros. Las paredes de muchas de sus cuevas están cubiertas por pinturas realizadas hace miles de años por artistas aborígenes. Photo Researchers, Inc./Hans Reinhard/OKAPIA

De modo similar, en la Grecia y Roma antiguas, muchos de los dioses estaban identificados con procesos geológicos. Por ejemplo, las erupciones volcánicas de Sicilia eran atribuidas a Vulcano. Se atribuye al filósofo griego Tales de Mileto, del siglo VI a.C., la primera ruptura con la mitología tradicional. Consideraba los fenómenos geológicos como sucesos naturales y ordenados que pueden ser estudiados a la luz de la razón y no como intervenciones sobrenaturales. El filósofo griego Demócrito hizo progresar esta filosofía con la teoría según la cual toda la materia se componía de átomos. Basándose en esta teoría, ofreció explicaciones racionales de todo tipo de procesos geológicos: los terremotos, las erupciones volcánicas, el ciclo del agua, la erosión y la sedimentación. Sus enseñanzas fueron expuestas por el poeta romano Lucrecio en su poema De la naturaleza de las cosas. Aristóteles, uno de los filósofos de la naturaleza más influyentes de todos los tiempos, descubrió en el siglo IV a.C. que las conchas fósiles encajadas en estratos de roca sedimentaria eran similares a las encontradas en las playas. Con esta observación supuso que las posiciones relativas de la tierra y del mar habían fluctuado en el pasado y comprendió que estos cambios requerirían grandes periodos de tiempo. Teofrasto, discípulo de Aristóteles, contribuyó al pensamiento geológico escribiendo el primer libro de mineralogía. Se llamaba De las piedras, y fue la base de la mayoría de las mineralogías de la edad media y de épocas posteriores.

2.2 El renacimiento

El renacimiento marcó el verdadero inicio del estudio de las ciencias de la Tierra; la gente empezó a observar los procesos geológicos mucho más que los griegos clásicos lo hicieron. Si Leonardo da Vinci no fuera tan conocido como pintor o ingeniero, lo sería como pionero de las ciencias naturales. Se dio cuenta, por ejemplo, de que los paisajes están esculpidos por fenómenos de erosión, y de que las conchas fósiles de las piedras calizas de los Apeninos eran los restos de organismos marinos que habían vivido en el fondo de un mar antiguo que debía de haber cubierto Italia.

Después de Leonardo, el filósofo naturalista francés Bernard Palissy escribió sobre la naturaleza y el estudio científico de los suelos, de las aguas subterráneas y de los fósiles. Los trabajos clásicos sobre minerales de este periodo fueron escritos, sin embargo, por Georgius Agricola, un alemán experto en mineralogía que publicó *De re metallica* (1556) y *De natura fossilium* (1546). Agricola recopiló los desarrollos más recientes de geología, mineralogía, minería y metalurgia de su época; sus trabajos fueron traducidos con profusión.

2.3 Siglo XVII

Niels Stensen, un danés más conocido por la versión latina de su nombre, Nicolaus Steno, sobresale entre los geocientíficos del siglo XVII. En 1669 demostró que los ángulos interfaciales de los cristales de cuarzo eran constantes, con independencia de la forma y del tamaño de los cristales y que, por extensión, la estructura de otras especies cristalinas también sería constante. Así, al llamar la atención sobre el significado de la forma de los cristales, Steno sentó las bases de la ciencia cristalográfica. Sus observaciones sobre la naturaleza de los estratos de roca le llevaron a formular la ley de la superposición, uno de los principios básicos de la estratigrafía (ver más adelante).

2.4 Siglos XVIII y XIX

Calzada de los Gigantes Según la leyenda, las columnas de basalto de la Calzada de los Gigantes eran antiguas piedras utilizadas por los gigantes para cruzar el canal entre Irlanda y Escocia. Según evidencias geológicas, los científicos creen que las distintas columnas se formaron durante la fase de enfriamiento y contracción de una corriente de lava. Photo Researchers, Inc./F. Le Diascorn/Rapho

El pensamiento geológico del siglo XVIII se caracterizó por los debates entre escuelas opuestas. Los plutonistas, que proponían que todas las rocas de la Tierra se solidificaron a partir de una masa fundida y que luego fueron alteradas por otros procesos, se oponían a los neptunistas, cuyo principal exponente fue el geólogo alemán Abraham Gottlob Werner. Werner proponía que la corteza terrestre consistía en una serie de capas derivadas de material sedimentario depositadas en una secuencia regular por un gran océano, como en las capas de una cebolla. Por el contrario, el geólogo escocés James Hutton y los plutonistas, como eran llamados sus seguidores, distinguían las rocas sedimentarias de las intrusivas de origen volcánico.

En 1785, Hutton introdujo el concepto de uniformitarianismo según el cual la historia de la Tierra puede ser interpretada sirviéndose sólo de los procesos geológicos ordinarios conocidos por los observadores modernos. Pensó que muchos de estos procesos, actuando de manera muy lenta, como lo hacen ahora, tardarían millones de años en crear los paisajes actuales. Esta teoría contradecía todas las opiniones teológicas de su tiempo que consideraban que la Tierra tendría unos 4.000 años. Los antagonistas de Hutton, liderados por el naturalista francés Georges Cuvier, creían que cambios bruscos y violentos catástrofes naturales como inundaciones y seísmos eran los responsables de las características geológicas terrestres. Por esta razón se les denominaba catastrofistas.

El debate enfervorizado establecido entre estas dos escuelas empezó a declinar hacia el lado de los uniformitarios con la publicación de los *Principios de Geología* (1830–1833) de Charles Lyell. Nacido en 1797, año de la muerte de Hutton, Lyell se convirtió en la mayor influencia sobre la teoría geológica moderna,

atacando con valentía los prejuicios teológicos sobre la edad de la Tierra y rechazando los intentos de interpretación de la geología a la luz de las Escrituras.

En las colonias de América del Norte, el conocido topógrafo, delineante y cartógrafo Lewis Evans había hecho notables contribuciones al saber geológico de América antes del influyente trabajo de Lyell. Para Evans era evidente que la erosión de los ríos y los depósitos fluviales eran procesos que habían ocurrido en el pasado. Además, a lo largo de su trabajo, apareció el concepto de isostasia: la densidad de la corteza terrestre decrece al crecer su espesor.

2.4.1 Teoría glacial

La teoría glacial derivó del trabajo de Lyell, entre otros. Propuesta por primera vez hacia 1840 y aceptada después universalmente, esta teoría enuncia que los depósitos originados por glaciares y planos de hielo se han sucedido en un movimiento lento desde latitudes altas hasta otras más bajas durante el pleistoceno (ver Cuaternario). El naturalista suizo Horace Bénédict de Saussure fue uno de los primeros en creer que los glaciares de los Alpes tenían la fuerza suficiente para mover grandes piedras. El naturalista estadounidense de origen suizo Louis Agassiz interpretó de forma muy precisa el impacto ambiental de este agente erosivo y de transporte, y junto a sus colegas, acumuló diversas evidencias que apoyaron el concepto del avance y del retroceso de los glaciares continentales y montañosos.

2.4.2 Estratigrafía

Columna Estratigráfica Los fósiles conservados en los estratos de roca ofrecen pistas sobre la historia de la evolución. Esta columna estratigráfica se basa en señales paleontológicas y muestra el orden con que aparecieron los organismos en el paleozoico, rico en fósiles. Cada capa representa un periodo de tiempo particular y muestra los organismos que prosperaron en él. Aunque rara vez se encuentran fósiles según este modelo ideal, suelen estar dispuestos, más o menos, en orden cronológico. En general, los fósiles más antiguos se sitúan en las capas inferiores, y los más recientes en las superiores, así esta disposición puede ayudar en la datación de los especímenes.

El geólogo británico William Smith hizo progresar la estratigrafía al descubrir los estratos de Inglaterra y representarlos en un mapa geológico que hoy permanece casi inalterado. Smith, en un primer momento, investigó los estratos a lo largo de distancias relativamente cortas; luego, correlacionó unidades estratigráficas del mismo periodo pero con distinto contenido en rocas. Después del desarrollo de la teoría de la evolución de Charles Darwin en el siglo XIX, se pudo llegar al principio de la sucesión de la fauna. Según este principio, la vida en cada periodo de la historia terrestre es única, los restos fósiles son una base para el reconocimiento de los yacimientos que les son contemporáneos y pueden ser usados para reunir fragmentos registrados dispersos en una secuencia cronológica conocida como escala geológica

2.4.3 Ciclos de actividad geológica

Rocas plegadas y dinámica terrestre La teoría de la tectónica de placas explica cómo se forman las montañas con las fuerzas que modelan la corteza terrestre. Las grandes piezas de corteza se desplazan lateralmente. Esto crea grandes fuerzas de compresión que pliegan y llegan a romper las rocas. Estas capas de roca sedimentaria muestran un pliegue anticlinal en el que las capas se doblan hacia abajo.

Muchos geólogos del siglo XIX comprendieron que la Tierra es un planeta con actividad térmica y dinámica, tanto en su interior como en su corteza. Los que eran conocidos como estructuralistas o neocatastrofistas creían que los trastornos catastróficos o estructurales eran responsables de las características topográficas de la Tierra. Así, el geólogo inglés William Buckland y sus seguidores postulaban cambios frecuentes del nivel marino y cataclismos en las masas de tierra para explicar las sucesiones y las roturas, o discontinuidades, de las secuencias estratigráficas. Por el contrario, Hutton consideraba la historia terrestre en términos de ciclos

sucesivos superpuestos de actividad geológica. Llamaba cinturones orogénicos a las cintas largas de rocas plegadas, que se creía que eran resultado de una variedad de ciclos, y orogénesis a la formación de montañas por los procesos de plegamiento y de elevación. Otros geólogos apoyaron más tarde estos conceptos y distinguieron cuatro grandes periodos orogénicos: el huronense (final de la era precámbrica); el caledonio (principio de la era paleozoica); el herciniano (final de la era paleozoica) y el alpino (final del periodo cretácico).

2.4.4 Estudio de campo

La exploración del Medio Oeste (Estados Unidos) en el siglo XIX suministró todo un cuerpo nuevo de datos geológicos que tuvieron un efecto inmediato en la teoría geomorfológica. Las primeras expediciones de medición en esta zona fueron lideradas por Clarence King, Ferdinand Vandever Hayden y John Wesley Powell, entre otros, bajo los auspicios del gobierno. Grove Karl Gilbert, el más sobresaliente de los colaboradores de Powell, reconoció un tipo de topografía causada por fallas en la corteza terrestre y dedujo un sistema de leyes que gobierna el desarrollo de los continentes. También en Argentina, el antropólogo y geólogo Florentino Ameghino (1854–1911) desarrolló una labor intensa en toda América del Sur, especialmente en el Cono Sur. Evolucionista en la dirección de Lyell y Darwin, publicó, entre otras obras, Geología, paleografía, paleontología y antropología de la República Argentina (1910).

2.5 Siglo XX

Los avances tecnológicos de este siglo han suministrado herramientas nuevas y sofisticadas a los geólogos y les han permitido medir y controlar los procesos terrestres con una precisión antes inalcanzable. En su teoría básica, el campo de la geología experimentó una gran revolución con la introducción y el desarrollo de la hipótesis de la tectónica de placas que establece que la corteza de la Tierra y la parte superior sólida del manto se divide en varias placas que se mueven, chocan o se alejan en intervalos geológicos. La litosfera que constituye las placas se forma en las zonas de borde constructivo de placas, que son las dorsales de los centros de algunas cuencas oceánicas y los valles en rift de áreas continentales. Esa litosfera se destruye por fusión en el manto en los bordes destructivos o zonas de subducción, donde una placa se introduce por debajo de otra formando cordilleras y zonas volcánicas. Los lugares de la Tierra donde se producen los grandes terremotos tienden a situarse en los límites de estas placas sugiriendo que la actividad sísmica puede interpretarse como el resultado de movimientos horizontales de éstas.

Lectura adicional

Lectura adicional

Sudamérica y África estuvieron unidas

Gracias a las teorías elaboradas a comienzos del siglo XX por el geofísico alemán Alfred Wegener, y continuadas años después por el geólogo austriaco Eduard Suess, se ha podido saber que las masas continentales que en la actualidad constituyen Sudamérica y África estuvieron unidas durante un largo periodo de tiempo geológico que se inició durante el paleozoico y se prolongó hasta finales del cretácico. La geomorfología y la litología compartida por ambos territorios han corroborado sus tesis, conocidas como tectónica de placas y deriva continental.

Abrir Lectura adicional

Esta hipótesis se relaciona con el concepto de deriva continental, propuesta por el geofísico alemán Alfred Wegener en 1912. Fue apoyada más tarde por la exploración de las profundidades marinas, gracias a la cual se obtuvieron pruebas de que el fondo marino se extiende, creando un flujo de corteza nueva en las dorsales oceánicas. El concepto de la tectónica de placas se ha relacionado desde entonces con el origen y el

movimiento de los continentes, con la generación de corteza continental y oceánica y con su evolución temporal. De esta forma, los geólogos del siglo XX han desarrollado una teoría para unificar muchos de los procesos más importantes que dan forma a la Tierra y a sus continentes.

3 LA ESCALA DE TIEMPOS GEOLÓGICOS

Se obtienen registros de la geología de la Tierra de cuatro clases principales de roca, cada una producida en un tipo distinto de actividad cortical: 1) erosión y transporte que posibilitan la posterior sedimentación que, por compactación y litificación, produce capas sucesivas de rocas sedimentarias; 2) expulsión, desde cámaras profundas de magma, de roca fundida que se enfría en la superficie de la corteza terrestre (rocas volcánicas); 3) estructuras geológicas formadas en rocas preexistentes que sufrieron deformaciones; y 4) registros de actividad plutónica o magmática en el interior de la Tierra suministrados por estudios de las rocas metamórficas o rocas plutónicas profundas. Se establece un esquema con los sucesos geológicos al datar estos episodios usando diversos métodos radiométricos y relativistas.

Las divisiones de la escala de tiempos geológicos resultante se basan, en primer lugar, en las variaciones de las formas fósiles encontradas en los estratos sucesivos. Sin embargo, los primeros 4.000 a 600 millones de años de la corteza terrestre están registrados en rocas que no contienen casi ningún fósil; sólo existen fósiles adecuados para correlaciones estratigráficas de los últimos 600 millones de años, desde el cámbrico inferior. Por esta razón, los científicos dividen la extensa existencia de la Tierra en dos grandes divisiones de tiempo: el precámbrico (que incluye los eones arcaico y proterozoico) y el fanerozoico, que comienza en el cámbrico y llega hasta la época actual.

Diferencias fundamentales en los agregados fósiles del fanerozoico primitivo, medio y tardío han dado lugar a la designación de tres grandes eras: el paleozoico (vida antigua), el mesozoico (vida intermedia) y el cenozoico (vida reciente). Las principales divisiones de cada una de estas eras son los periodos geológicos, durante los cuales las rocas de los sistemas correspondientes fueron depositadas en todo el mundo. Los periodos tienen denominaciones que derivan en general de las regiones donde sus rocas características están bien expuestas; por ejemplo, el pérmico se llama así por la provincia de Perm, en Rusia. Algunos periodos, por el contrario, tienen el nombre de depósitos típicos, como el carbonífero por sus lechos de carbón, o de pueblos primitivos, como el ordovícico y el silúrico por los ordovices y los siluros de las antiguas Gran Bretaña y Gales. Los periodos terciario y cuaternario de la era cenozoica se dividen en épocas y edades, desde el paleoceno al holoceno (o tiempo más reciente). Además de estos periodos, los geólogos también usan divisiones para el tiempo de las rocas, llamados sistemas, que de forma similar se dividen en series y algunas veces en unidades aún más pequeñas llamadas fases.

El descubrimiento de la radiactividad permitió a los geólogos del siglo XX idear métodos de datación nuevos, pudiendo así asignar edades absolutas, en millones de años, a las divisiones de la escala de tiempos. A continuación se expone una descripción general de estas divisiones y de las formas de vida en las que se basan. Los registros fósiles más escasos de los tiempos precámbricos, como hemos dicho, no permiten divisiones tan claras.

3.1 Periodo cámbrico (570 a 510 millones de años)

Una explosión de vida (la llamada explosión cámbrica) pobló los mares, pero la tierra firme permaneció estéril. De este periodo data el origen de casi todos los grandes tipos principales de invertebrados. Son muy característicos los grupos de trilobites (extintos en la actualidad) con miles de especies diferentes, equinoideos y arqueociátidos, entre otros. Colisiones múltiples entre las placas de la corteza terrestre crearon el primer supercontinente, llamado Gondwana.

3.2 Periodo ordovícico (510 a 439 millones de años)

Gondwana se va acercando al polo sur y Escandinavia y Norteamérica convergen. Los trilobites empiezan a declinar en este periodo en el que otros importantes grupos hicieron su primera aparición, entre ellos estaban los corales, los crinoideos, los briozoos y los pelecípodos. Surgieron también peces con escudo óseo externo y sin mandíbula, que son los primeros vertebrados conocidos; sus fósiles se encuentran en lechos de antiguos estuarios de América del Norte. El periodo acabó en una fase de glaciación que supuso la extinción de muchos grupos de organismos.

3.3 Periodo silúrico (439 a 408,5 millones de años)

La vida se aventuró en tierra bajo la forma de plantas simples llamadas psilofitinas, que tenían un sistema vascular para la circulación de agua, y de animales parecidos a los escorpiones, parientes de los artrópodos marinos, extintos en la actualidad, llamados euriptéridos. La cantidad y la variedad de trilobites disminuyeron, pero los mares abundaban en corales, en cefalópodos y en peces mandibulados. Es un periodo de clima globalmente cálido.

3.4 Periodo devónico (408,5 a 362,5 millones de años)

Este periodo se conoce también como la edad de los peces, por la abundancia de sus fósiles entre las rocas de este periodo. Los peces se adaptaron tanto al agua dulce como al agua salada. Entre ellos había algunos con escudo óseo externo, con o sin mandíbula, tiburones primitivos (aún existe una subespecie de los tiburones de esta época) y peces óseos a partir de los cuales evolucionaron los anfibios. En las zonas de tierra, se hallaban muchos helechos gigantes y la presencia vegetal continental es ya importante.

3.5 Periodo carbonífero (362,5 a 290 millones de años)

Los trilobites estaban casi extinguidos, pero los corales, los crinoideos y los braquiópodos eran abundantes, así como todos los grupos de moluscos. Los climas húmedos y cálidos fomentaron la aparición de bosques exuberantes en los pantanales, que dieron lugar a los principales yacimientos de carbón que existen en la actualidad. Sin embargo, en otras zonas continentales se producen glaciaciones importantes. Las plantas dominantes eran los licopodios con forma de árbol, los equisetos, los helechos y unas plantas extintas llamadas pteridospermas o semillas de helecho. Los anfibios se extendieron y dieron nacimiento a los reptiles, primeros vertebrados que vivían sólo en tierra. Aparecieron también insectos alados como las libélulas. Prosigue la convergencia de los dos grandes supercontinentes Laurasia y Gondwana hacia la formación de la segunda Pangea.

3.6 Periodo pérmico (290 a 245 millones de años)

Las zonas continentales se unieron en un único continente llamado Pangea II. Esta múltiple colisión continental generó la orogenia herciniana. Gran parte de Pangea II se sitúa en la cercanía del polo sur, por lo que se produce una fuerte glaciación. El periodo termina con una gran extinción en masa de muchos organismos que acabó con más de un 90% de las especies marinas existentes.

3.7 Periodo triásico (245 a 208 millones de años)

El principio de la era mesozoica quedó marcado por la disgregación de Pangea II y la reaparición de los supercontinentes del Norte (Laurasia) y del Sur (Gondwana). Las formas de vida cambiaron considerablemente en esta era, conocida como la edad de los reptiles. Aparecieron nuevas familias de pteridospermas, y las coníferas y las cícadas se convirtieron en los mayores grupos florales, junto a los ginkgos y a otros géneros. Surgieron reptiles, como los dinosaurios y las tortugas, además de los mamíferos.

3.8 Periodo jurásico (208 a 145,6 millones de años)

Al desplazarse Gondwana, el norte del océano Atlántico se ensanchaba y nacía el Atlántico sur. Los dinosaurios dominaban en tierra, mientras crecía el número de reptiles marinos, como los ictiosaurios y los plesiosaurios. Aparecieron las primeras aves y los corales formadores de arrecifes crecían en las aguas poco profundas de las costas. Entre los artrópodos evolucionaron animales semejantes a los cangrejos y a las langostas (crustáceos).

3.9 Periodo cretácico (145,6 a 65 millones de años)

Los dinosaurios prosperaron y evolucionaron hacia formas más especializadas, para desaparecer de forma brusca al final de este periodo, junto a muchas otras formas de vida. Las teorías para explicar esta extinción masiva tienen en la actualidad un gran interés científico. Los cambios florales de este periodo fueron los más notables de los ocurridos en la historia terrestre. Las gimnospermas estaban extendidas, pero al final del periodo aparecieron las angiospermas (plantas con flores).

3.10 Periodo terciario (65 a 1,64 millones de años)

En el terciario se rompió el enlace de tierra entre América del Norte y Europa y, al final del periodo, se fraguó el que une América del Norte y América del Sur. Durante el cenozoico, las formas de vida de la tierra y del mar se hicieron más parecidas a las existentes en la actualidad. Se termina de formar la Patagonia y el levantamiento de la cordillera de los Andes. Las formaciones herbáceas se expandieron y esto provocó la especialización de muchos herbívoros, con cambios en su dentición. Al haber desaparecido la mayoría de los reptiles dominantes al final del cretácico, el cenozoico fue la edad de los mamíferos. De esta forma, en la época del eoceno se desarrollaron nuevos grupos de mamíferos, como ciertos animales pequeños parecidos a los caballos actuales, rinocerontes, tapires, rumiantes, ballenas y ancestros de los elefantes. En el oligoceno aparecieron miembros de las familias de los gatos y de los perros, así como algunas especies de monos. En el mioceno los marsupiales eran numerosos, y aparecieron los antropoides (entre los que surgirían los homínidos). En el plioceno, los mamíferos con placenta alcanzaron su apogeo, en número y diversidad de especies, extendiéndose hasta el periodo cuaternario.

3.11 Periodo cuaternario (desde hace 1,64 millones de años hasta la actualidad)

Capas de hielo continentales intermitentes cubrieron gran parte del hemisferio norte. Los restos fósiles ponen de manifiesto que hubo muchos tipos de homínidos primitivos en el centro y sur de África, en China y en Java, en el pleistoceno bajo y medio; pero los seres humanos modernos (*Homo sapiens*) no surgieron hasta el final del pleistoceno. Más tarde, en este periodo, los humanos cruzaron al Nuevo Mundo a través del estrecho de Bering, cuyo tránsito era viable debido a la bajada del nivel del mar. Las capas de hielo retrocedieron al final y empezó la época reciente, el holoceno.

4 CAMPOS DEL ESTUDIO GEOLÓGICO

La geología se ocupa de la historia de la Tierra, e incluye la historia de la vida, y cubre todos los procesos físicos que actúan en la superficie o en la corteza terrestres. En un sentido más amplio, estudia también las interacciones entre las rocas, los suelos, el agua, la atmósfera y las formas de vida. En la práctica, los geólogos se especializan en una rama, física o histórica, de la geología. La geología física incluye campos como geofísica, petrología y mineralogía, y está enfocada hacia los procesos y las fuerzas que dan forma al exterior de la Tierra y que actúan en su interior. Mientras, la geología histórica está interesada por la evolución de la superficie terrestre y de sus formas de vida e implica investigaciones de paleontología, de estratigrafía, de paleogeografía y de geocronología.

4.1 Geofísica

El objetivo de los geofísicos es deducir las propiedades físicas de la Tierra, junto a su composición interna, a

partir de diversos fenómenos físicos. Estudian el campo geomagnético, el paleomagnetismo en rocas y suelos, los fenómenos de flujo de calor en el interior terrestre, la fuerza de la gravedad y la propagación de ondas sísmicas (sismología), por ejemplo. Como subcampo, la geofísica aplicada investiga, con propósitos relacionados con el ser humano, características de escala muy pequeña y poco profundas en la corteza, como pequeños domos, sinclinales y fallas. La geofísica de exploración combina también información física y geológica para resolver problemas prácticos relacionados con la búsqueda de petróleo y gas, con la localización de estratos de agua, con la detección de yacimientos con menas nuevas de metales y con diversos tipos de ingeniería civil.

4.2 Geoquímica

La geoquímica se refiere a la química de la Tierra en su conjunto, pero el tema se divide en áreas como la geoquímica sedimentaria, la orgánica, el nuevo campo de la geoquímica del entorno y algunos otros. El origen y la evolución de los elementos terrestres y de las grandes clases de rocas y minerales son importantes para los geoquímicos. En especial estudian la distribución y las concentraciones de los elementos químicos en los minerales, las rocas, los suelos, las formas de vida, el agua y la atmósfera. El conocimiento de su circulación por ejemplo, los ciclos geoquímicos del carbono, el nitrógeno, el fósforo y el azufre tiene importancia práctica, así como el estudio de la distribución y abundancia de los isótopos y de su estabilidad en la naturaleza (véase Ciclo del carbono). La geoquímica de exploración, o de prospección, tiene aplicaciones prácticas en los principios geoquímicos teóricos de la búsqueda de minerales.

4.3 Petrología

La petrología se encarga del origen, la aparición, la estructura y la historia de las rocas, en particular de las ígneas y de las metamórficas. El estudio de la petrología de sedimentos y de rocas sedimentarias se conoce como petrología sedimentaria. La petrografía, disciplina relacionada, trata de la descripción y las características de las rocas cristalinas determinadas por examen microscópico con luz polarizada. Los petrólogos estudian los cambios ocurridos de forma espontánea en las masas de roca cuando el magma se solidifica, cuando rocas sólidas se funden total o parcialmente, o cuando sedimentos experimentan transformaciones químicas o físicas. Quienes trabajan en este campo se preocupan de la cristalización de los minerales y de la solidificación del vidrio desde materia fundida a altas temperaturas (procesos ígneos), de la recristalización de minerales a alta temperatura sin la mediación de una fase fundida (procesos metamórficos), del intercambio de iones entre minerales de rocas sólidas y de fases fluidas migratorias (procesos metasomáticos o diagenéticos) y de los procesos de sedimentación, que incluyen la meteorización, el transporte y el depósito.

4.4 Mineralogía

La ciencia de la mineralogía trata de los minerales de la corteza terrestre y de los encontrados fuera de la Tierra, como las muestras lunares o los meteoritos. La cristalografía, rama de la mineralogía, implica el estudio de la forma externa y de la estructura interna de los cristales naturales y artificiales. Los mineralogistas estudian la formación, la aparición, las propiedades químicas y físicas, la composición y la clasificación de los minerales. La mineralogía determinativa es la ciencia de la identificación de un espécimen por sus propiedades físicas y químicas. La mineralogía económica se especializa en los procesos responsables de la formación de menas, en especial de las que tienen importancia industrial y estratégica.

4.5 Geología estructural

Cristales de roca en una muestra lunar Para tomar una imagen de una muestra fina de roca lunar se usa un microscopio petrográfico. Los colores representan distintas composiciones minerales.

Aunque, en un principio, a los geólogos estructurales les interesaba especialmente el análisis de las

deformaciones de los estratos sedimentarios, ahora estudian más las de las rocas en general. Comparando las distintas características de estructuras, se puede llegar a una clasificación de tipos relacionados. La geología estructural comparativa, que se ocupa de los grandes rasgos externos, contrasta con las aproximaciones teóricas y experimentales que emplean el estudio microscópico de granos minerales de rocas deformadas. Los geólogos especializados en la búsqueda del petróleo y del carbón deben usar la geología estructural en su trabajo diario, en especial en la prospección petrolífera, donde la detección de trampas estructurales que puedan contener petróleo es una fuente importante de información.

4.6 Sedimentología

Este campo, también llamado geología sedimentaria, investiga los depósitos terrestres o marinos, antiguos o recientes, su fauna, su flora, sus minerales, sus texturas y su evolución en el tiempo y en el espacio. Los sedimentólogos estudian numerosos rasgos intrincados de rocas blandas y duras y sus secuencias naturales, con el objetivo de reestructurar el entorno terrestre primitivo en sus sistemas estratigráficos y tectónicos. El estudio de las rocas sedimentarias incluye datos y métodos tomados de otras ramas de la geología, como la estratigrafía, la geología marina, la geoquímica, la mineralogía y la geología del entorno.

4.7 Paleontología

Paleontóloga con hueso de Seismosaurus Los paleontólogos tardan a menudo horas en desenterrar un único hueso, retirando con cuidado la tierra y la roca que lo rodea. Aquí, una costilla de Seismosaurus está siendo recompuesta antes de continuar la excavación. Phototake NYC/Ray Nelson

La paleontología, estudio de la vida a través del registro fósil, investiga la relación entre los fósiles de animales (paleozoología) y de plantas (paleobotánica) con plantas y animales existentes. La investigación de fósiles microscópicos (micropaleontología) implica técnicas distintas que la de especímenes mayores. Los fósiles, restos de vida del pasado geológico preservados por medios naturales en la corteza terrestre, son los datos principales de esta ciencia. La paleontografía es la descripción formal y sistemática de los fósiles (de plantas y de animales), y las paleontologías de invertebrados y vertebrados se consideran con frecuencia subdisciplinas separadas.

4.8 Geomorfología

La geomorfología, es decir, forma y desarrollo de la Tierra, es el intento de establecer un modelo explicativo de la parte externa de la Tierra. Los geomorfólogos explican la morfología de la superficie terrestre en términos de principios relacionados con la acción glacial, los procesos fluviales, el transporte y los depósitos realizados por el viento, la erosión y la meteorización. Los subcampos más importantes se especializan en las influencias tectónicas en la forma de las masas de tierra (morfotectónica), en la influencia del clima en los procesos morfogenéticos y en los agregados de tierra (geomorfología del clima) y en la medida y el análisis estadístico de datos (geomorfología cuantitativa).

4.9 Geología económica

Esta rama mayor de la geología conecta con el análisis, la exploración y la explotación de materia geológica útil para los humanos, como combustibles, minerales metálicos y no metálicos, agua y energía geotérmica. Campos afines incluyen la ciencia de la localización de minerales industriales o estratégicos (geología de exploración), el procesamiento de menas o vetas (metalurgia) y la aplicación práctica de las teorías geológicas a la minería (geología minera).

4.10 Ingeniería geológica

Los ingenieros geólogos aplican los principios geológicos a la investigación de los materiales naturales tierra,

roca, agua superficial y agua subterránea implicados en el diseño, la construcción y la explotación de proyectos de ingeniería civil. Son representativos de estos proyectos los diques, los puentes, las autopistas, los oleoductos, el desarrollo de zonas de alojamiento y los sistemas de gestión de residuos.

4.10.1 Geología ambiental

La geología ambiental recoge y analiza datos geológicos con el objetivo de resolver los problemas creados por el uso humano del entorno natural. Un área muy importante se ocupa del análisis de los riesgos y peligros geológicos como terremotos, aludes y corrimientos de tierra, erosión de las costas e inundaciones (véase Medidas de control de inundaciones). La geología ambiental se relaciona con otras ciencias físicas como geoquímica e hidrología, ciencias biológicas y sociales e ingeniería.

5 PROCESOS GEOLÓGICOS

Los procesos geológicos pueden dividirse en los que se originan en el interior de la Tierra (procesos endógenos) y los que lo hacen en su parte externa (procesos exógenos).

5.1 Procesos endógenos

La separación de las grandes placas litosféricas, la deriva continental y la expansión de la corteza oceánica ponen en acción fuerzas dinámicas asentadas a grandes profundidades. El diastrofismo es un término general que alude a los movimientos de la corteza producidos por fuerzas terrestres endogénicas que producen las cuencas de los océanos, los continentes, las mesetas y las montañas. El llamado ciclo geotectónico relaciona estas grandes estructuras con los movimientos principales de la corteza y con los tipos de rocas en distintos pasos de su desarrollo.

La orogénesis, o creación de montañas, tiende a ser un proceso localizado que distorsiona los estratos preexistentes. La epirogénesis afecta a partes grandes de los continentes y de los océanos, sobre todo por movimientos verticales, y produce mesetas y cuencas. Los desplazamientos corticales lentos y graduales actúan en particular sobre los cratones, regiones estables de la corteza. Las fracturas y desplazamientos de rocas, que pueden medir desde unos pocos centímetros hasta muchos kilómetros, se llaman fallas. Su aparición está asociada con los bordes entre placas que se deslizan unas sobre otras por ejemplo, la falla de San Andrés y con lugares donde los continentes se separan, como el valle del Rift, en África occidental. Los géiseres y los manantiales calientes se encuentran, como los volcanes, en áreas tectónicas inestables.

Terremoto de Alaska El terremoto de Alaska de 1964 fue de 9,2 en la escala de Richter, uno de los más fuertes que se han producido en Norteamérica. Provocó la muerte de 131 personas y devastó parte de Anchorage y Valdez. El terremoto deshizo los cimientos y dejó grietas en las calles. Anchorage Museum of History and Art

Los volcanes se producen por la efusión de lava desde las profundidades de la Tierra. La meseta de Columbia, en el oeste de Estados Unidos, está cubierta por una capa de basalto volcánico con más de 3.000 m de espesor y un área de unos 52.000 km². Estas mesetas basálticas han sido creadas por volcanes. Los volcanes de la cordillera de los Andes (sur) arrojaban, ya en el cenozoico, gran cantidad de cenizas, las cuales, desparramadas, dieron origen a la región Santacruceña (Argentina), en la que los mantos de basalto cubren la meseta patagónica. Otros tipos de volcanes incluyen los de escudo, con perfil ancho y convexo, como los que forman las islas Hawai, y los estratovolcanes, como el Fuji Yama y el monte Saint Helens (Estados Unidos), compuestos de capas yuxtapuestas de diferentes materiales.

Los sismos están causados por la descarga abrupta de tensiones acumuladas de forma muy lenta por la actividad de las fallas, de los volcanes o de ambos. El movimiento súbito de la superficie terrestre es una manifestación de procesos endógenos que pueden provocar olas sísmicas (tsunamis), aludes, colapso de

superficies o subsidencia y fenómenos relacionados.

5.2 Procesos exógenos

Cualquier medio natural capaz de mover la materia terrestre se llama agente geomorfológico. Los ríos, las aguas subterráneas, los glaciares, el viento y los movimientos de las masas de agua (mareas, olas y corrientes) son agentes geomorfológicos primarios. Puesto que se originan en el exterior de la corteza, estos procesos se llaman epígenos o exógenos.

La meteorización es un término que designa un grupo de procesos responsables de la desintegración y de la descomposición de rocas sobre el terreno. Puede ser física, química o biológica y es un prerequisite para la erosión. La caída de masas ladera abajo (transferencia de material hacia abajo por la acción de su propio peso) comprende deslizamientos y procesos como los flujos y corrimientos de tierra y las avalanchas de escombros. La acción hidráulica es el arrastre por el agua de materia en suspensión o suelta de mayor tamaño; el proceso similar llevado a cabo por el viento se conoce como deflación. La acción de hielo en movimiento se llama a veces burilado; y los glaciares provocan arranques y transportes de rocas. La sedimentación fluvial contribuye al nivelado general de la superficie terrestre como resultado de depósitos, que se forman cuando el medio que los transporta pierde fuerza.

Geomorfología

Numerosas organizaciones geológicas prestan a sus miembros una amplia variedad de servicios. En primer lugar, actúan como foros para la difusión del conocimiento mediante revistas profesionales, boletines y otras comunicaciones. Proporcionan además códigos de conducta profesional, cursos prácticos, servicios de colocación y certificación de especialistas. Entre las organizaciones más representativas están la Asociación de Geocientíficos para el Desarrollo Internacional, la Sociedad de Información de la Geociencia, la Unión Internacional de las Ciencias Geológicas, la Sociedad de Geólogos Económicos y la Sociedad de Paleontólogos y Mineralogistas Económicos.

Línea dinámica del tiempo

Geomorfología, estudio científico de la forma del terreno y de los paisajes. El término suele aplicarse a los orígenes y a la morfología dinámica (cambio de la estructura y de la forma) de las superficies de la Tierra, pero abarca también la morfología del fondo marino y el análisis de terrenos extraterrestres. Incluida a veces en el campo de la geografía física, la geomorfología es el estudio del aspecto geológico del terreno visible. Esta ciencia se ha desarrollado de dos formas distintas que unidas ofrecen una explicación completa de la forma de los paisajes.

2 GEOMORFOLOGÍA HISTÓRICA

Una aproximación a la ciencia de los paisajes se hace gracias a la geomorfología histórica o cíclica. Los conceptos necesarios fueron desarrollados a principios del siglo XX por el geólogo estadounidense William Morris Davis, que estableció que cada paisaje podía analizarse en términos de estructura, procesos y fases. Davis indicaba que cada paisaje se desarrolla en una secuencia, el llamado ciclo de Davis, predecible y cíclica: juventud, madurez y vejez.

La geomorfología histórica se basa en varios análisis cronológicos, en especial los proporcionados por estudios estratigráficos de los últimos dos millones de años, englobados en el cuaternario. La cronología relativa se puede analizar con la observación de las relaciones entre estratos, y los periodos de tiempo implicados se establecen con mayor precisión utilizando métodos de datación, como son los registros históricos, el análisis de carbono radiactivo, la cuenta de anillos en los troncos de los árboles (dendrocronología) y los estudios paleomagnéticos. Aplicando estas técnicas sobre los datos estratigráficos, se

construye una cronología cuantitativa de sucesos.

3 GEOMORFOLOGÍA DE LOS PROCESOS

Esta segunda rama de la geomorfología analiza los procesos dinámicos contemporáneos que operan sobre los paisajes. Estos mecanismos meteorización y erosión combinan acciones que son en algunos aspectos destructivas y en otros constructivas. El lecho de roca y el suelo proporcionan la materia pasiva, mientras que el clima y la dinámica cortical aportan las variables activas principales.

4 DINÁMICA SUBYACENTE

Rocas plegadas Los geomorfológicos estudian la forma de la superficie terrestre y los distintos procesos que transforman los paisajes. Por ejemplo, cuando porciones grandes de la corteza se desplazan de forma lateral, crean fuerzas enormes de compresión que pueden plegar e incluso romper las rocas. Aquí, las capas de roca sedimentaria muestran un pliegue anticlinal donde las capas se inclinan hacia abajo.

En los procesos geomorfológicos, la gravedad es un factor energético esencial e inmutable que llega a todas partes. Un segundo parámetro es el flujo de energía en forma de radiación solar. Este último aparece de forma directa como una variable térmica o indirectamente a través del ciclo hidrológico que implica la evaporación de agua desde el océano, su transporte atmosférico, la precipitación en forma de lluvia o nieve y el retorno al océano. La tercera componente energética es el flujo de calor desde el interior de la Tierra. Pese a tener una magnitud bastante menor que la de la energía solar, este flujo es el responsable esencial de la creación de las estructuras geológicas más importantes, como las fallas, pero sus ritmos de cambio tienden a ser muy lentos (en general, inferiores a 1 mm al año). Sin embargo, en algunas zonas por ejemplo, a lo largo de las fronteras entre placas como en la falla de San Andrés las tensiones pueden aumentar hasta descargarse en desplazamientos violentos de hasta 12 metros. Localmente, el flujo

de calor desde el interior terrestre se concentra en erupciones de magma (roca fundida), que producen diversos paisajes volcánicos.

5 METEORIZACIÓN Y EROSIÓN

Val Pusteria, Italia Estas espectaculares pirámides de tierra plateada, con una altura de varios metros, se originaron por la acción erosiva del agua sobre unas rocas blandas y poco compactas cubiertas por grandes bloques masivos y coherentes; con el paso del tiempo, el agua de arroyada y de la lluvia ha creado surcos cada vez más profundos sobre la roca y se han eliminado los minerales más blandos. Es un fenómeno muy difundido por la región alpina de Trentino-Alto Adigio.

La meteorización es el conjunto de procesos que producen alteración química o mecánica de las rocas en la superficie terrestre o cerca de ella. Comprende tres tipos de procesos: mecánicos, como el crecimiento de hielo o de cristales de sal en fisuras de las rocas, o el calentamiento o enfriamiento térmicos; químicos, como en las disoluciones ácidas que tienden a disolver minerales como la calcita y el feldespato; y biológicos, como la acción de las raíces de las plantas, que pueden combinar alteraciones mecánicas y químicas. La erosión es la extracción, supresión y transporte de materia de las superficies rocosas o del suelo, disuelta o en forma de partículas. La energía para producirla llega con las gotas de lluvia, con el agua corriente, con el viento, con las olas o con la gravedad (como en los deslizamientos de laderas).

Una región desgastada por la erosión tiende a elevarse para compensar la pérdida de peso, pero con el tiempo se estabiliza al suavizarse el relieve y al disminuir las pendientes. La superficie resultante, casi plana, se llama penillanura. Puede quedar interrumpida en algunos lugares por pequeñas mesetas elevadas y aisladas, llamadas cerros testigo, culminadas por rocas más resistentes a la erosión. El nivel fundamental teórico de estas superficies el desnivel último para las corrientes de agua es el nivel medio del mar. Para que una

penillanura se forme y no quede destruida por erosión ulterior, el nivel marino debe permanecer estable durante millones de años. Sin embargo, desde el final del cuaternario, 10.000 años atrás, ha subido decenas de metros.

La erosión del suelo inducida por los seres humanos es una característica que procede de los últimos milenios, a causa de que el desmonte de la vegetación nativa y el uso excesivo para pastoreo expone el suelo a los agentes erosivos. Por otra parte, en emplazamientos naturales no perturbados, en especial en los interiores continentales con poco relieve, la erosión es muy lenta exceptuando las zonas semiáridas donde las tormentas pueden producir intensas erosiones torrenciales puntuales. En cordilleras activas, como en las montañas jóvenes, que suelen coincidir con fronteras entre placas que hayan chocado o deslizado recientemente, la intensidad de la erosión puede ser enorme.

Entre todos los procesos distintos que actúan sobre la superficie terrestre, la lluvia y los ríos son los agentes de erosión más vigorosos. Por el contrario, aunque la acción de las olas sobre una costa rocosa sea impresionante, el retroceso de las costas es en general muy lento. La erosión eólica (del viento) sólo es activa en zonas donde apenas hay cubierta vegetal (desiertos, zonas áridas). Finalmente, la erosión glaciaria puede ser muy importante pero limitada a zonas concretas. Los agentes erosivos, como puede verse, tienen una relación directa con el clima y determinan los tipos principales de paisaje.

Geografía

Geografía, ciencia que estudia la distribución y la disposición de los elementos en la superficie terrestre. La palabra geografía fue adoptada en el siglo II a.C. por el erudito griego Eratóstenes y significa literalmente 'descripción de la Tierra'. El estudio geográfico comprende tanto el medio físico como la relación de los seres humanos con ese medio físico, es decir, los rasgos propiamente geográficos como el clima, los suelos, las formas del relieve, el agua o las formaciones vegetales, junto con los elementos que estudia la geografía humana, como son las entidades de población, las diferentes culturas, las redes de comunicación y otras modificaciones realizadas por el hombre en el entorno físico. Se trata, pues, de una ciencia interdisciplinar que utiliza información propia de otras ciencias como la economía, la historia, la biología, la geología o las matemáticas, entre otras.

Alegoría de la geografía Este manuscrito miniado, perteneciente a una amplia colección denominada Tratado de las artes liberales, fue realizado en el siglo XV y en la actualidad se halla en la Biblioteca Nazionale Marciana de Venecia, Italia. En él se expresa, a través de la figura de una mujer sedente con un globo terráqueo en su mano, la característica básica de la geografía como saber (el Sol ilumina por detrás el conjunto) que explica los elementos que componen la superficie terrestre.

2 RAMAS DE LA GEOGRAFÍA

La geografía puede dividirse en dos ramas fundamentales: la geografía general, también llamada sistemática, y la geografía regional. La geografía general estudia los elementos humanos y físicos de la Tierra con un carácter individual. La geografía regional estudia las diversas áreas de la tierra y se centra, sobre todo, en las combinaciones únicas y particulares de rasgos humanos y físicos que caracterizan cada región y las diferencian unas de otras. Esta división se basa, por tanto, en el enfoque de los estudios aunque, en realidad, las dos ramas son interdependientes y se complementan, por lo que la mayoría de los geógrafos combinan ambas geografías.

2.1 Geografía general

La geografía general incluye la geografía física y la geografía humana. Estas dos clasificaciones se componen, a su vez, de diversos campos especializados que estudian los diferentes aspectos del medio.

2.1.1 Geografía física

La geografía física se centra en los siguientes campos: geomorfología, que utiliza la geología para estudiar la forma y estructura de la superficie terrestre; climatología, en la que se encuentra la meteorología, que se ocupa de las condiciones climáticas; biogeografía, que utiliza la biología y estudia la distribución de la vida animal y vegetal; geografía de los suelos, que estudia su distribución; hidrografía, que se ocupa de la distribución de los mares, lagos, ríos y arroyos en relación con su utilización; oceanografía, que estudia las olas, las mareas, las corrientes oceánicas y los fondos marinos, y la cartografía o realización de mapas a través de una representación gráfica y medición de la superficie terrestre.

2.1.2 Geografía humana

Esta rama abarca todos los aspectos de la vida social humana en relación con el medio físico, dando lugar a numerosas subramas como la geografía económica, la geografía de la población, la geografía social o la geografía urbana, entre muchas otras.

2.2 Geografía regional

La geografía regional estudia las diferencias y similitudes de las regiones de la Tierra. Esta rama de la geografía explica las diferencias entre los lugares mediante el estudio de la especial combinación de elementos que los distingue y caracteriza. Los geógrafos regionales pueden estudiar la evolución de un área de pequeñas dimensiones, como puede ser una ciudad. Este estudio se denomina microgeografía. También pueden centrarse en el estudio de grandes áreas denominadas macrodivisiones, como la región mediterránea o todo un continente. Los geógrafos regionales definen las macrodivisiones en función de sus características culturales.

Los geógrafos regionales pueden dividir las macrodivisiones en áreas de menor tamaño que comparten unas características específicas. Para diferenciar un área de otra tienen en cuenta factores como la lengua, el tipo de economía dominante, el terreno, o la combinación de varios elementos.

3 MÉTODOS GEOGRÁFICOS

El objetivo principal de los geógrafos es describir y entender el medio físico y humano en la Tierra. Para conseguirlo deben recogerse numerosos datos, anotar los resultados de los estudios en forma de cartas, gráficos, textos y, sobre todo, en mapas y, finalmente, analizar dicha información. Los geógrafos utilizan una gran variedad de técnicas e instrumentos para alcanzar estos objetivos.

3.1 Recogida de datos

Teledetección Los satélites estadounidenses Landsat giran en órbitas situadas a 900 km de la Tierra, y llevan detectores multiespectrales que registran la radiación electromagnética emitida desde el suelo. Esto permite observar características geológicas y naturales como roca desnuda, tierra o fango, masas de agua, bosques y tierras de cultivo o praderas. Estas tres imágenes de los alrededores del volcán Saint Helens, en Estados Unidos, que entró en erupción en 1980, fueron tomadas el 15 de septiembre de 1973, el 22 de mayo de 1983 y el 31 de agosto de 1988. El volcán está en el centro de las imágenes. U.S.

Los geógrafos pueden recoger datos directamente sobre el terreno u obtenerlos de fuentes de segunda mano, como los censos, los estudios estadísticos, los mapas y las fotografías. Los avances realizados desde la II Guerra Mundial en fotografía aérea, junto con la utilización de películas especiales y técnicas para obtener imágenes tridimensionales, han hecho posible que los geógrafos puedan realizar estudios más detallados sobre la Tierra y sobre sus recursos a través de la interpretación de fotografías aéreas (o fotointerpretación). Los geógrafos también utilizan los datos obtenidos a partir de radares, satélites artificiales, batiscafos y otros

aparatos que profundizan en la corteza terrestre para obtener información sobre sus características.

3.2 Realización de mapas

Mapa climático de Sudamérica El clima de Sudamérica es cálido en general; la cordillera de los Andes es la única zona del subcontinente donde hay temperaturas frías constantes a causa de su altitud. Por lo general, el clima varía dependiendo de las regiones: abundantes precipitaciones alimentan las selvas ecuatoriales amazónicas, mientras que hay severas sequías en regiones áridas como el desierto de Atacama, en Chile.

El mapa es el principal instrumento del geógrafo y puede utilizarse para consignar un simple dato o los resultados de un complicado estudio geográfico. Además de proporcionar una gran profusión de información objetiva, el mapa permite realizar una comparación visual entre diferentes áreas, ya que puede diseñarse para indicar, por medio de símbolos, tramas y colores, no sólo la localización sino también las características de los elementos geográficos de un área.

Los geógrafos han creado una serie de signos convencionales o símbolos en los mapas que sirven para identificar elementos como casas, iglesias, presas, puentes y túneles, vías de ferrocarril, caminos, carreteras, minas, granjas o pastizales.

3.3 Análisis de la información geográfica

Las técnicas que utilizan las matemáticas o la estadística para analizar los datos se conocen como métodos cuantitativos. La utilización de los métodos cuantitativos hace posible que los geógrafos puedan manejar una gran cantidad de datos y un gran número de variables de un modo objetivo. Generalmente, los geógrafos recogen los datos y elaboran una teoría para explicar lo que han observado. Después comprueban esta teoría utilizando los métodos cuantitativos. A veces, las teorías se expresan a modo de expresiones matemáticas a las que se las denomina modelos. Sin embargo, en geografía las teorías no tienen necesariamente una validez universal sino que explican una tendencia de algo que se ha observado y, a menudo, en un espacio concreto.

4 HISTORIA DE LA GEOGRAFÍA

Cientos de personas han contribuido al desarrollo de la geografía y el fruto de su trabajo se ha ido acumulando durante varios milenios. Muchos viajeros, topógrafos, exploradores y observadores científicos realizaron su aportación a este cúmulo de información en constante crecimiento. Sin embargo, sólo a partir de finales del siglo XVIII fue posible recoger y consignar una información geográfica precisa y real. El moderno concepto de geografía no tuvo una aceptación general hasta mediados del siglo XIX.

4.1 Geógrafos antiguos

Mapa tolemaico de Geografía La Geografía de Tolomeo, a pesar de sus graves incorrecciones, cartografió el mundo conocido en su época a través de un sistema basado en la longitud y la latitud, que influyó en los cartógrafos del renacimiento.

A los primeros geógrafos les interesaba explorar los territorios desconocidos y describir los rasgos que observaban en los diferentes lugares. Estos geógrafos de la antigüedad realizaron largos viajes y anotaban sus observaciones sobre las tierras desconocidas que recorrían. Uno de los primeros mapas conocidos se realizó en una tabla de arcilla en Babilonia, hacia el 2300 a.C. Hacia el año 1400 a.C. se recorrieron las costas del Mediterráneo y se representaron en mapas las tierras exploradas. Durante los siguientes mil años, los antiguos viajeros llegaron a las islas Británicas y exploraron la mayor parte de las costas africanas. Por otro lado, los antiguos griegos proporcionaron al mundo occidental sus primeros conocimientos importantes sobre la forma, tamaño y características generales de la Tierra.

En el siglo IV a.C., el filósofo y científico griego Aristóteles fue el primero en demostrar que la Tierra era redonda. Basaba su hipótesis en los siguientes argumentos: que toda la materia tiende a caer hacia un centro común; que la Tierra proyecta una sombra circular sobre la luna durante los eclipses de luna; y que si se viaja de Norte a Sur pueden verse nuevas constelaciones, mientras que las conocidas desaparecen. El geógrafo griego Eratóstenes fue el primero que calculó con cierta precisión la circunferencia de la Tierra.

Los viajes, conquistas y actividades colonizadoras de los griegos en la región mediterránea dieron lugar a una acumulación de información geográfica considerable y estimularon los tratados de geografía. El geógrafo e historiador griego Estrabón escribió una enciclopedia de 17 volúmenes, titulada Geografía, que fue una importante fuente de información para los jefes militares y los administradores públicos del Imperio romano.

En el siglo II d.C., el astrónomo griego Tolomeo recopiló la mayor parte del saber geográfico de los griegos y romanos que se conocía hasta esa época. También propuso nuevos métodos de realización de mapas, que incluían la proyección y la creación de un atlas. En su célebre Guía geográfica, Tolomeo dividió el círculo ecuatorial en 360° y construyó una red imaginaria de líneas norte-sur y este-oeste donde localizaba la posición relativa de las masas de tierra conocidas, tanto islas como continentes. A pesar de que utilizó mediciones menos precisas de la circunferencia terrestre que las que había empleado Eratóstenes, Tolomeo contribuyó a la ciencia geográfica con mapas y descripciones muy útiles del mundo conocido. Sus mapas indicaban con claridad los problemas que suponía el representar la Tierra de forma esférica en una superficie plana.

4.2 Geografía medieval

Mapa de Mercator La proyección cartográfica de Mercator es una de las más conocidas; fue introducida por este cartógrafo flamenco en 1569, e ideada fundamentalmente para la navegación náutica. Conceptualmente, se trata de una proyección cilíndrica, si bien debe derivarse matemáticamente. Tiene la propiedad de que todos los rumbos aparecen como líneas rectas. Como contrapartida, cabe señalar que este tipo de proyección amplía en exceso las superficies de las zonas situadas en las latitudes altas, por lo que es de escasa utilidad para otros propósitos distintos a los de la navegación y para la representación de áreas alejadas del ecuador. Este mapa del Nuevo Mundo fue trazado por Gerardus Mercator en el siglo XVI.

En la edad media los europeos realizaron pocos viajes y exploraciones, a excepción de los vikingos de Escandinavia. Sin embargo, los árabes de Oriente Próximo interpretaron y comprobaron las obras de los antiguos geógrafos, griegos y romanos, y exploraron Asia suroccidental y África. En el siglo VII, los eruditos árabes tradujeron los tratados de los geógrafos griegos al árabe. Hubo que esperar a que estos textos árabes se tradujeran al latín para que el saber de los geógrafos griegos se difundiera por Europa. Entre las figuras más sobresalientes de la geografía árabe destacan al-Idrisi, conocido por sus detallados mapas, Ibn Batuta e Ibn Jaldún, que escribieron sobre sus largos viajes. Los mongoles y los chinos también contribuyeron a aumentar el conocimiento geográfico de Asia.

Ibn Batuta En el momento de su muerte, Ibn Batuta era probablemente la persona que más había viajado a lo largo y ancho de la Tierra. Su periplo se inició con la peregrinación a La Meca y continuó con varios viajes por el Viejo Continente europeo, Asia y África; en los que visitó los lugares fundamentales de las grandes civilizaciones.

Los viajes del explorador italiano Marco Polo, en el siglo XIII, las cruzadas cristianas, en los siglos XII y XIII, y los viajes españoles y portugueses para explorar nuevas tierras durante los siglos XV y XVI, abrieron nuevos horizontes a los europeos y estimularon la aparición de obras y tratados geográficos. En el siglo XV, Enrique el Navegante de Portugal impulsó y apoyó las exploraciones de las costas africanas y se convirtió en uno de los principales promotores de estudios geográficos. Asimismo, los viajes y cartas náuticas de Giovanni Caboto, Juan Díaz de Solís, Vicente Yáñez Pinzón, Juan de la Cosa y Américo Vespucio fueron fundamentales en los avances geográficos de la época. Entre los relatos de viajes y descubrimientos más

destacados que se publicaron en el siglo XVI se encuentran los de Giambattista Ramusio, en Venecia, los de Richard Hakluyt en Inglaterra y los de Theodore de Bry en la actual Bélgica. Los viajes y estudios que se realizaron en este periodo probaron, sin que hubiera duda alguna, que la Tierra es una esfera. Antes de esto, muchas personas, sobre todo en el mundo cristiano, creían que la Tierra era plana.

4.3 La geografía desde el siglo XVII hasta el siglo XX

En la historia del método geográfico cabe destacar la obra *Geographia generalis* (Geografía general, 1650) del geógrafo alemán Bernhardus Varenius (Bernardo Vareño). El interés de esta obra radica en la distinción que establece entre geografía general y geografía especial (o regional); la primera de ellas la concibe como una geografía esencialmente física y astronómica, mientras que la geografía regional se centra en el estudio y comparación de las diferentes regiones de la Tierra, sus límites y rasgos característicos. Su obra constituyó un dogma indiscutible durante más de un siglo.

Durante la primera mitad del siglo XVII destacó la obra del geógrafo inglés Nathaniel Carpenter, que recalco las similitudes espaciales, entre las características físicas de las distintas superficies de la Tierra. Su enfoque se convirtió en un hito geográfico de gran importancia.

Otros muchos autores europeos contribuyeron a aumentar el conocimiento geográfico durante los dos siglos siguientes. En el siglo XVIII, el filósofo alemán Immanuel Kant desempeñó un papel decisivo al colocar a la geografía en el marco de las ciencias. Kant dividió el conocimiento adquirido a través de la observación en dos categorías: una comprende los fenómenos registrados de conformidad con la lógica, lo que da lugar a clasificaciones como órdenes, géneros y especies vegetales y animales, sin importar cuándo o dónde tienen lugar. La otra incluye los fenómenos que se perciben en términos de tiempo y espacio; la clasificación y descripción que tiene en cuenta el tiempo se considera historia, y la clasificación y descripción que tiene en cuenta el espacio se considera geografía. Kant subdividió la geografía en seis ramas, una de las cuales, la geografía física, es esencial para las otras cinco. Las otras ramas señaladas por Kant fueron la geografía matemática, la moral, la política, la comercial y la tecnológica.

Alexander von Humboldt y Carl Ritter, ambos alemanes, realizaron grandes contribuciones a la teoría geográfica a principios del siglo XIX. Humboldt, que fue un gran viajero y un brillante observador del terreno, aplicó sus conocimientos sobre los procesos físicos a la clasificación sistemática y a la descripción comparativa de las características geográficas observadas en el terreno. Concibió métodos para medir los fenómenos que observaba en el marco natural desde una perspectiva histórica, interesándose por su evolución y cambios. Este hecho supuso una ruptura con el pensamiento dominante hasta ese momento, que consideraba la naturaleza como algo estático e inamovible. Humboldt realizó muchos estudios geográficos excelentes basados en sus viajes a América, que ayudaron a conocer la realidad geográfica de este continente. Es muy conocida su obra *Viajes a las regiones equinociales de América*. Su obra *Cosmos* (1844), que describe la geografía física del Universo, se considera una de las mejores obras geográficas de todos los tiempos.

El punto de vista de Ritter difiere en parte del de Humboldt. Mientras que este último se centraba en el estudio sistemático de los rasgos físicos considerados de manera independiente, Ritter respaldaba un enfoque regional de la geografía; hizo hincapié en el estudio comparativo de áreas determinadas y en los rasgos que caracterizaban a cada una de ellas, pero prestando mucha menos atención a los aspectos físicos y poniendo el acento en los fenómenos sociales e históricos, con el fin de establecer relaciones entre el medio físico y el hombre. Su obra en 19 volúmenes, *La geografía y su relación con la naturaleza y la historia de los hombres* (1822–1859), es un análisis geográfico excelente de Asia y de algunas partes de África. Ritter fue un agudo observador del terreno, con una buena base en ciencias naturales e historia. Denominó a su trabajo geografía comparada, ya que su conocimiento procedía de la observación y comparación de un hecho concreto, a partir del cual llegaba a establecer leyes y principios. Ritter creía que sin análisis regionales sistemáticos no era posible realizar ningún estudio fiable.

Otro geógrafo alemán, Friedrich Ratzel, también realizó una importante aportación al conocimiento geográfico. Célebre por su obra *Antropogeografía* (1882–1891), intentó demostrar que las fuerzas naturales han determinado la distribución de las personas en la Tierra. Describió la geografía como ciencia de distribución y apoyó el estudio de áreas concretas, de las cuales afirmaba que podían proporcionar las bases para realizar generalizaciones sobre áreas más extensas o sobre el mundo en su totalidad. Los geógrafos alemanes Ferdinand von Richthofen y Alfred Hettner recogieron las ideas de Humboldt, Ritter y Ratzel; *Geografía: su historia, su naturaleza, y sus métodos* (1927), de Hettner, es una obra de gran valor sobre la historia de los métodos geográficos.

Entre los geógrafos franceses de finales del siglo XIX destaca Paul Vidal de la Blache, que se opuso a la idea de que el medio físico determina de un modo estricto las actividades humanas. Él defendió que el ser humano podía modificar su entorno físico. Favoreció los estudios regionales, dando importancia tanto a los procesos físicos como a los humanos en la distribución de los elementos de la Tierra.

En el siglo XIX, con el desarrollo del imperialismo europeo que permitió el conocimiento de nuevos territorios, surgieron y proliferaron muchas sociedades geográficas. Fueron muchos los que patrocinaron estudios geográficos, exploraciones y revistas geográficas. Las sociedades más antiguas de este tipo se fundaron en París, Berlín y Londres (Real Sociedad Geográfica), entre 1820 y 1830. En los Estados Unidos se fundó la Sociedad Geográfica Estadounidense en 1851 y la Sociedad Nacional Geográfica en 1888. Desde 1876 existe la Real Sociedad Geográfica de Madrid. Se iniciaron también las conferencias internacionales geográficas en 1871, en Amberes, Bélgica.

4.4 El siglo XX

Imagen SIG Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es un sistema informático que sintetiza, analiza y representa los diferentes tipos de datos geográficos de una forma comprensible. Esta imagen generada por SIG muestra las localizaciones de las industrias que emiten productos químicos tóxicos en el condado de Los Ángeles en Estados Unidos (representadas por puntos negros), combinadas a su vez con áreas de diferente código de color, que muestran la distribución de los diferentes grupos raciales. La imagen ilustra cómo un SIG puede combinar ambos datos y representar muchos tipos de información para una determinada área geográfica.

Durante la primera mitad del siglo XX, muchos geógrafos continuaron la tradición de los antiguos pioneros de la geografía. Realizaban estudios de pequeñas áreas por todo el mundo, a través de observaciones sobre el terreno, extendiendo las fronteras del conocimiento geográfico, pero manteniendo los métodos heredados del siglo XIX. Sin embargo, a comienzos de la década de 1950, los geógrafos comenzaron a utilizar cada vez más los métodos cuantitativos. El cambio en la metodología que tuvo lugar en las décadas de 1950 y 1960 fue tan rápido que se ha hablado de revolución cuantitativa. Los geógrafos ampliaron sus esfuerzos en la búsqueda de aplicaciones prácticas para los estudios geográficos.

Los métodos cuantitativos fueron especialmente útiles al aplicarlos a la teoría de la localización, una rama de la geografía que estudia los factores que influyen en la localización de elementos como ciudades o fábricas. El economista y terrateniente Heinrich von Thünen fue el iniciador de la teoría de la localización; el geógrafo alemán Walter Christaller hizo, por su parte, importantes aportaciones a esta teoría en la década de 1930, al analizar la localización de los centros urbanos, pero sus teorías no cobraron valor hasta veinte años después.

Astronomía

Astronomía, ciencia que se ocupa de los cuerpos celestes del Universo, incluidos los planetas y sus satélites, los cometas y meteoroides, las estrellas y la materia interestelar, los sistemas de estrellas llamados galaxias y los cúmulos de galaxias. La astronomía moderna se divide en varias ramas: astrometría, el estudio mediante la observación de las posiciones y los movimientos de estos cuerpos; mecánica celeste, el estudio matemático de

sus movimientos explicados por la teoría de la gravedad; astrofísica, el estudio de su composición química y su condición física mediante el análisis espectral y las leyes de la física, y cosmología, el estudio del Universo como un todo.

2 ASTRONOMÍA EN LA ANTIGÜEDAD

La curiosidad de los pueblos antiguos con respecto al día y la noche, al Sol, la Luna y las estrellas les llevó a la conclusión de que los cuerpos celestes parecen moverse de una forma regular, lo que resulta útil para definir el tiempo y orientarse. La astronomía solucionó los problemas que inquietaron a las primeras civilizaciones, es decir, la necesidad de establecer con precisión las épocas adecuadas para sembrar y recoger las cosechas y para las celebraciones, así como de orientarse en las largas travesías comerciales o en los viajes. Ver Arqueoastronomía.

Para los pueblos antiguos el cielo mostraba una conducta muy regular. El brillante Sol que separaba el día de la noche salía todas las mañanas desde una dirección, el Este, se movía uniformemente durante el día y se ponía en la dirección opuesta, el Oeste. Por la noche se podían ver miles de estrellas que seguían una trayectoria similar girando en agrupamientos permanentes llamados constelaciones.

En la zona templada del hemisferio norte comprobaron que el día y la noche no duraban lo mismo a lo largo del año. En los días largos, el Sol salía más al Norte y ascendía más alto en el cielo al mediodía; en los días con noches más largas el Sol salía más al Sur y no ascendía tanto. La observación de las estrellas que aparecen por el Oeste antes del ocaso o por el Este antes del amanecer mostraba que la posición relativa del Sol cambia de forma gradual.

Estudios posteriores pusieron de manifiesto que el Sol, la Luna y cinco planetas brillantes giran alrededor de la esfera de estrellas dentro de un estrecho cinturón llamado zodíaco. La Luna atraviesa el zodíaco con rapidez, adelantando al Sol una vez cada 29,5 días, periodo conocido como mes sinódico. Los que observaban las estrellas en la antigüedad intentaban fijar los días e incluso los meses y los años en un sistema de tiempo coherente, o calendario. Como ni un mes completo ni un año completo contienen exactamente un número entero de días, los creadores de calendarios asignaban a los sucesivos meses o años diferente número de días, que sacando una media, se aproximara al valor real. Así pues, el calendario moderno incluye 97 años bisiestos en cada periodo de 400 años, de modo que el número medio de días por año sea de 365,2425, muy próximo a 365,24220, el determinado astronómicamente.

El Sol y la Luna siempre atraviesan el zodíaco de Oeste a Este. No obstante, los cinco planetas brillantes: Mercurio, Marte, Venus, Júpiter y Saturno, que también se mueven hacia el Este sobre el fondo de las estrellas, tienen un movimiento hacia el Oeste, o retrógrado, de variada duración. Así pues, los planetas parecen seguir un recorrido hacia el Este de manera irregular, con curvas periódicas en sus trayectorias. Desde la antigüedad se ha pensado que los acontecimientos celestes, en especial los movimientos planetarios, tenían que ver con el destino de las personas. Esta creencia, llamada astrología, fomentó el desarrollo de esquemas matemáticos para predecir los movimientos planetarios y favoreció el progreso de la astronomía en el pasado.

3 ASTRONOMÍA BABILÓNICA

Diversos pueblos antiguos como los egipcios, mayas y chinos desarrollaron interesantes mapas de las constelaciones y calendarios de gran utilidad (véase Astronomía maya). Los babilonios estudiaron los movimientos del Sol y de la Luna para perfeccionar su calendario. Solían designar como comienzo de cada mes el día siguiente a la luna nueva, cuando aparece el primer cuarto lunar después del ocaso. Al principio este día se determinaba mediante la observación, pero después los babilonios trataron de calcularlo anticipadamente. Hacia el 400 a.C. comprobaron que los movimientos aparentes del Sol y la Luna de Oeste a Este alrededor del zodíaco no tienen una velocidad constante. Parece que estos cuerpos se mueven con velocidad creciente durante la primera mitad de cada revolución hasta un máximo absoluto y entonces su

velocidad disminuye hasta el mínimo originario. Los babilonios intentaron representar este ciclo aritméticamente dando por ejemplo a la Luna una velocidad fija para su movimiento durante la mitad de su ciclo y una velocidad fija diferente para la otra mitad. Perfeccionaron además el método matemático representando la velocidad de la Luna como un factor que aumenta linealmente del mínimo al máximo durante la mitad de su revolución y entonces desciende al mínimo al final del ciclo. Con estos cálculos los astrónomos babilonios podían predecir la luna nueva y el día en que comenzaría el nuevo mes. Como consecuencia, conocían las posiciones de la Luna y del Sol todos los días del mes.

De forma parecida calculaban las posiciones planetarias, tanto en su movimiento hacia el Este como en su movimiento retrógrado. Los arqueólogos han desenterrado tablillas cuneiformes que muestran estos cálculos. Algunas de estas tablillas, que tienen su origen en las ciudades de Babilonia y Uruk, a las orillas del río Éufrates, llevan el nombre de Naburiannu (hacia 491 a.C.) o Kidinnu (hacia 379 a.C.), astrólogos que debieron ser los inventores de los sistemas de cálculo.

4 ASTRONOMÍA GRIEGA

Los antiguos griegos hicieron importantes aportaciones a la astronomía. La *Odisea* de Homero se refiere a constelaciones como la Osa Mayor y Orión, y describe cómo las estrellas pueden servir de guía en la navegación. El poema *Los trabajos y los días* de Hesíodo informa al campesino sobre las constelaciones que salen antes del amanecer en diferentes épocas del año para indicar el momento adecuado para arar, sembrar y recolectar.

Las aportaciones científicas se asocian con los nombres de los filósofos griegos Tales de Mileto y Pitágoras, pero no se conserva ninguno de sus escritos. La leyenda de que Tales predijo un eclipse total de Sol el 28 de mayo de 585 a.C., parece ser apócrifa. Hacia el año 450 a.C., los griegos comenzaron un fructífero estudio de los movimientos planetarios. Filolao (siglo V a.C.), discípulo de Pitágoras, creía que la Tierra, el Sol, la Luna y los planetas giraban todos alrededor de un fuego central oculto por una 'contratierra' interpuesta. De acuerdo con su teoría, la revolución de la Tierra alrededor del fuego cada 24 horas explicaba los movimientos diarios del Sol y de las estrellas. Hacia el 370 a.C., el astrónomo Eudoxo de Cnido explicaba los movimientos observados mediante la hipótesis de que una enorme esfera que transportaba las estrellas sobre su superficie interna se desplazaba alrededor de la Tierra, girando diariamente. Además, explicaba los movimientos solares, lunares y planetarios diciendo que dentro de la esfera de estrellas había otras muchas esferas transparentes interconectadas que giran de forma diferente.

El más original de los antiguos observadores de los cielos fue otro griego, Aristarco de Samos. Creía que los movimientos celestes se podían explicar mediante la hipótesis de que la Tierra gira sobre su eje una vez cada 24 horas y que junto con los demás planetas gira en torno al Sol. Esta explicación fue rechazada por la mayoría de los filósofos griegos que contemplaban a la Tierra como un globo inmóvil alrededor del cual giran los ligeros objetos celestes. Esta teoría, conocida como sistema geocéntrico, permaneció inalterada unos 2.000 años.

En el siglo II d.C. los griegos combinaban sus teorías celestes con observaciones trasladadas a planos. Los astrónomos Hiparco de Nicea y Tolomeo determinaron las posiciones de unas 1.000 estrellas brillantes y utilizaron este mapa estelar como base para medir los movimientos planetarios. Al sustituir las esferas de Eudoxo por un sistema más flexible de círculos, plantearon una serie de círculos excéntricos, con la Tierra cerca de un centro común, para representar los movimientos generales hacia el Este alrededor del zodíaco a diferentes velocidades del Sol, la Luna y los planetas. Para explicar las variaciones periódicas en la velocidad del Sol y la Luna y los retrocesos de los planetas, decían que cada uno de estos cuerpos giraba uniformemente alrededor de un segundo círculo, llamado epiciclo, cuyo centro estaba situado en el primero. Mediante la elección adecuada de los diámetros y las velocidades de los dos movimientos circulares atribuidos a cada cuerpo se podía representar su movimiento observado. En algunos casos se necesitaba un tercer cuerpo. Esta técnica fue descrita por Tolomeo en su gran obra, el *Almagesto* (ver Sistema de Tolomeo). Otra pensadora

que, como Tolomeo, mantuvo viva la tradición de la astronomía griega en Alejandría en los primeros siglos de la era cristiana, fue Hipatia, discípula de Platón. Escribió comentarios sobre temas matemáticos y astronómicos y está considerada como la primera científica y filósofa de Occidente.

5 ASTRONOMÍA EN LA EDAD MEDIA

La astronomía griega se transmitió más tarde hacia el Este a los sirios, indios y árabes. Los astrónomos árabes recopilaron nuevos catálogos de estrellas en los siglos IX y X y desarrollaron tablas del movimiento planetario. El astrónomo árabe Azarquiel, máxima figura de la escuela astronómica de Toledo del siglo XI, fue el responsable de las *Tablas toledanas*, que influyeron notablemente en Europa. En 1085, año de la conquista de la ciudad de Toledo por el rey Alfonso VI, se inició un movimiento de traducción del árabe al latín, que despertó el interés por la astronomía (entre otras ciencias) en toda Europa (véase Escuela de traductores de Toledo). Se tradujeron las *Tablas toledanas* y el *Almagesto* de Tolomeo y en 1272 se elaboraron las *Tablas alfonsíes* bajo el patrocinio de Alfonso X el Sabio; estas tablas sustituyeron a las de Azarquiel en los centros científicos europeos. En el siglo XV comenzaron a surgir dudas sobre la teoría de Tolomeo: el filósofo y matemático alemán Nicolás de Cusa y el artista y científico italiano Leonardo da Vinci cuestionaron los supuestos básicos de la posición central y la inmovilidad de la Tierra.

6 LA TEORÍA DE COPÉRNICO

La historia de la astronomía dio un giro drástico en el siglo XVI como resultado de las aportaciones del astrónomo polaco Nicolás Copérnico. Dedicó la mayor parte de su vida a la astronomía y realizó un nuevo catálogo de estrellas a partir de observaciones personales. Debe gran parte de su fama a su obra *De revolutionibus orbium caelestium* (*Sobre las revoluciones de los cuerpos celestes*, 1543), donde analiza críticamente la teoría de Tolomeo de un Universo geocéntrico y muestra que los movimientos planetarios se pueden explicar atribuyendo una posición central al Sol más que a la Tierra.

No se prestó mucha atención al sistema de Copérnico, o sistema heliocéntrico, hasta que Galileo descubrió pruebas para defenderlo. Gran admirador secreto de la obra de Copérnico, Galileo vio su oportunidad de probar la teoría copernicana sobre el movimiento de la Tierra cuando se inventó el telescopio en Holanda. En 1609 construyó un pequeño telescopio de refracción, lo dirigió hacia el cielo y descubrió las fases de Venus, lo que indicaba que este planeta gira alrededor del Sol. También descubrió cuatro lunas girando alrededor de Júpiter. Convencido de que al menos algunos cuerpos no giraban alrededor de la Tierra, comenzó a hablar y a escribir a favor del sistema de Copérnico. Sus intentos de difundir este sistema le llevaron ante un tribunal eclesiástico. Aunque se le obligó a renegar de sus creencias y de sus escritos, esta teoría no pudo ser suprimida.

7 LAS LEYES DE KEPLER Y LA TEORÍA DE NEWTON

Desde el punto de vista científico la teoría de Copérnico sólo era una adaptación de las órbitas planetarias, tal como las concebía Tolomeo. La antigua teoría griega de que los planetas giraban en círculos a velocidades fijas se mantuvo en el sistema de Copérnico. Desde 1580 hasta 1597 el astrónomo danés Tycho Brahe observó el Sol, la Luna y los planetas en su observatorio situado en una isla cercana a Copenhague y después en Alemania. Utilizando los datos recopilados por Brahe, su ayudante alemán, Johannes Kepler, formuló las leyes del movimiento planetario, afirmando que los planetas giran alrededor del Sol y no en órbitas circulares con movimiento uniforme, sino en órbitas elípticas a diferentes velocidades, y que sus distancias relativas con respecto al Sol están relacionadas con sus periodos de revolución.

El físico británico Isaac Newton adelantó un principio sencillo para explicar las leyes de Kepler sobre el movimiento planetario: la fuerza de atracción entre el Sol y los planetas. Esta fuerza, que depende de las masas del Sol y de los planetas y de las distancias entre ellos, proporciona la base para la explicación física de las leyes de Kepler. Al descubrimiento matemático de Newton se le denomina ley de la gravitación universal.

Tras la época de Newton, la astronomía se ramificó en diversas direcciones. Con esta ley de gravitación el viejo problema del movimiento planetario se volvió a estudiar como mecánica celeste. El perfeccionamiento del telescopio permitió la exploración de las superficies de los planetas, el descubrimiento de muchas estrellas débiles y la medición de distancias estelares. En el siglo XIX, un nuevo instrumento, el espectroscopio, aportó información sobre la composición química de los cuerpos celestes y nuevos datos sobre sus movimientos (*ver Espectroscopia*).

Durante el siglo XX se han construido telescopios de reflexión cada vez mayores. Los estudios realizados con estos instrumentos han revelado la estructura de enormes y distantes agrupamientos de estrellas, denominados galaxias, y de cúmulos de galaxias. En la segunda mitad del siglo XX los progresos en física proporcionaron nuevos tipos de instrumentos astronómicos, algunos de los cuales se han emplazado en los satélites que se utilizan como observatorios en la órbita de la Tierra. Estos instrumentos son sensibles a una amplia variedad de longitudes de onda de radiación, incluidos los rayos gamma, los rayos X, los ultravioletas, los infrarrojos y las regiones de radio del espectro electromagnético. Los astrónomos no sólo estudian planetas, estrellas y galaxias, sino también plasmas (gases ionizados calientes) que rodean a las estrellas dobles, regiones interestelares que son los lugares de nacimiento de nuevas estrellas, granos de polvo frío invisibles en las regiones ópticas, núcleos energéticos que pueden contener agujeros negros y radiación de fondo de microondas, que puede aportar información sobre las fases iniciales de la historia del Universo. *Ver Astronomía radar; Astronomía gamma; Astronomía ultravioleta; Astronáutica.*

La ley de gravitación de Newton proponía una fuerza de atracción entre el Sol y cada uno de los planetas para explicar las leyes de Kepler del movimiento elíptico. Sin embargo, esto también implica que deben existir fuerzas más pequeñas entre los planetas y entre el Sol y cuerpos tales como los cometas. Las fuerzas gravitatorias interplanetarias hacen que las órbitas de los planetas se desvíen del movimiento elíptico simple. La mayoría de estas irregularidades, predichas sobre la base de la teoría de Newton, se podían observar con el telescopio. *Ver Sistema Solar.*

La observación de las posiciones planetarias se mejoró con el desarrollo de instrumentos astronómicos más precisos y de técnicas fotográficas. Además, los cálculos matemáticos permiten hoy a los astrónomos predecir las posiciones planetarias con años de antelación y de modo muy preciso.

Con el uso del telescopio se descubrieron muchos nuevos miembros del Sistema Solar. Entre ellos el planeta Urano, descubierto en 1781 por William Herschel, astrónomo británico nacido en Alemania; el planeta Neptuno, descubierto en 1846 por el astrónomo británico John Couch Adams e independientemente por el astrónomo francés Urbain Le Verrier, y Plutón, descubierto en 1930 por el astrónomo estadounidense Clyde William Tombaugh. El número de satélites naturales conocidos aumentó cuando sondas no tripuladas sobrevolaron los planetas exteriores, y puede seguir aumentando cuando los astrónomos consigan mejores imágenes de estos planetas. Se ha comprobado que más de 1.600 asteroides giran alrededor del Sol, la mayor parte de ellos entre las órbitas de Marte y de Júpiter. También se han catalogado varios cientos de cometas y hay innumerables cuerpos más pequeños, tales como meteoroides pétreos y metálicos.

El análisis químico y el estudio físico de cuerpos celestes lejanos se hicieron posibles gracias al invento del espectroscopio en 1814 por el físico alemán Joseph von Fraunhofer y el posterior descubrimiento de que cada elemento químico exhibe un conjunto o conjuntos de líneas espectrales únicos. Los análisis de los espectros planetarios y estelares han demostrado que los cuerpos celestes se componen de elementos químicos conocidos en la Tierra. Los estudios espectroscópicos han aportado claves sobre la temperatura y la gravedad de la superficie de los cuerpos celestes y sobre sus movimientos.

Sondas portadoras de instrumentos se han aproximado a todos los planetas, excepto Plutón, para recolectar datos químicos y físicos. Han descubierto anillos finos y oscuros en Júpiter, Urano y Neptuno y han proporcionado información que pone en duda la posibilidad de vida en otros planetas del Sistema Solar. Estos planetas parecen ser demasiado calientes, demasiado fríos o poseer atmósferas demasiado inhóspitas para albergar vida tal como la conocemos.

10 ESTRELLAS CERCANAS

Para el estudio de una estrella es fundamental conocer la distancia a la que se encuentra de la Tierra, que en el caso de las estrellas más cercanas se halla midiendo la posición de la estrella en el cielo a intervalos de seis meses, cuando la Tierra está en los lados opuestos de su órbita. Al girar la Tierra alrededor del Sol, la estrella parece desplazarse en el cielo. Este desplazamiento anual se llama paralaje. Cuanto mayor es la distancia, menor es el paralaje de la estrella. La estrella más cercana, Alpha Centauri, está unas 260.000 veces más lejos de la Tierra que el Sol. Las primeras distancias de estrellas fueron medidas de forma independiente en 1838 por tres astrónomos.

Todas las estrellas son cuerpos gaseosos y calientes como el Sol, pero se diferencian de él y entre ellas por varias razones. Los datos físicos más importantes sobre una estrella son su brillo intrínseco, su masa, su tamaño y su composición química. Aunque todas las estrellas fijas parecen mucho más pálidas que el Sol a causa de las grandes distancias que las separan de la Tierra, algunas son intrínsecamente más brillantes (ver Magnitud estelar). Las masas de las estrellas se pueden determinar de forma directa para el Sol y para los pares de estrellas, como las binarias eclipsantes, que giran una alrededor de la otra. Los astrónomos aplican la ley de la gravitación para determinar matemáticamente las masas estelares. De las 50 estrellas más cercanas sobre las que se tiene una información bastante completa, el 10% son más brillantes, más grandes y con más masa que el Sol. Los estudios espectroscópicos muestran que la mayoría de las estrellas están compuestas en gran parte de hidrógeno.

La fuente de la gran energía irradiada por el Sol constituyó un misterio durante mucho tiempo. El Sol emite energía a razón de $3,86 \times 10^{26}$ vatios. Pruebas geológicas demuestran que la vida ha existido en la Tierra desde hace miles de millones de años, lo que indica que la energía solar debe haber estado consumiéndose a su ritmo actual durante cientos de millones de años. En 1938 el físico estadounidense Hans Bethe formuló la teoría de que la energía solar se produce por la fusión de núcleos de hidrógeno en helio. Su descubrimiento preparó el camino para el desarrollo de una bomba de hidrógeno de fusión nuclear 15 años después.

Las estrellas con una masa igual o superior a 1,4 veces la del Sol consumen su ciclo vital mucho más rápido que el Sol. Los telescopios ópticos han revelado las etapas principales de este ciclo. Primero, la estrella comienza a condensarse desde el interior, pero por lo general cerca de un extremo de una nube de gas interestelar relativamente densa y fría. Esta condensación inicia un periodo de contracción y de recalentamiento interno, seguido de un largo periodo quemando hidrógeno. Cuando se acerca el final de su vida la estrella se expande transformándose en una gigante roja, se vuelve a contraer y entonces se encoge y se enfría hasta convertirse en una enana blanca.

En la década de 1960, una radioastrónoma británica, Jocelyn Bell, descubrió señales de radio de variación rápida provenientes de objetos semejantes a estrellas. Los estudios de su supervisor, Antony Hewish, demostraron que éstos eran fuentes pulsantes, ahora denominadas púlsares, compuestas de materia más condensada incluso que la de las enanas blancas. Un púlsar es una estrella de neutrones que gira a gran velocidad, una masa de neutrones herméticamente cerrada, el objeto más denso del Universo exceptuando a los agujeros negros, cuya materia es tan densa que nada, ni siquiera la radiación luminosa, puede escapar de él. En 1974 se sospechó de la existencia de un agujero negro en la constelación Cisne por la detección de rayos X emitidos por un gas cuya aceleración se aproximaba a la velocidad de la luz. Desde entonces, se han propuesto otras posibilidades, incluidos los enormes agujeros negros localizados en los centros de galaxias con radiación intensa. En 1994 el telescopio espacial *Hubble* aportó pruebas que vinieron a confirmar la

existencia de un agujero negro en la galaxia M87. Los científicos estimaron que tenía una masa de 2.500 a 3.500 millones de veces la del Sol. Posteriormente los astrónomos encontraron agujeros negros en el centro de otras galaxias, y muchos científicos opinan que un gran número de galaxias podría contener agujeros negros en su centro.

11 LA GALAXIA

A finales del siglo XVIII, William Herschel construyó los mayores telescopios de su época y los utilizó para explorar los cielos. No sólo descubrió el planeta Urano, sino también cantidad de satélites y estrellas dobles, además de innumerables cúmulos de estrellas y nebulosas. Sus recuentos de estrellas en diferentes regiones de los cielos convencieron a Herschel de que el Sol es sólo una más de una amplia nube de estrellas dispuestas en forma de disco. Véase Vía Láctea.

Modernas investigaciones confirman este cuadro, excepto que hoy se sabe que el Sistema Solar está situado a unos tres quintos del radio galáctico desde su centro. El nombre de Vía Láctea suele aplicarse a todo el sistema o galaxia, también conocida como la Galaxia. Las estrellas del sistema están todas unidas por la gravedad y giran alrededor de un centro distante. En el estudio de la estructura de la Vía Láctea es de fundamental importancia el conocimiento de la distancia a la que se encuentran las estrellas. El método de paralaje para determinar estas distancias sólo se puede aplicar a unos pocos miles de las estrellas más próximas. Hay una clase especial de estrellas, las variables cefeidas, que varían de brillo en periodos que dependen de su intensidad intrínseca. La comparación del brillo observado en una estrella de este tipo con el brillo intrínseco conocido nos proporciona un medio de determinar su distancia. Siguiendo el descubrimiento de Henrietta Swan Leavitt de la relación entre el periodo y la luminosidad, Harlow Shapley utilizó las variables cefeidas, esparcidas por toda la Vía Láctea, para medir su tamaño. Un rayo de luz a una velocidad de unos 300.000 km/s necesitaría 400.000 años para atravesar la Vía Láctea de extremo a extremo de su halo (se describe más abajo). La espiral visible mide unos 100.000 años luz. En conjunto, la Vía Láctea está compuesta por unos 100.000 millones de estrellas que giran alrededor de un centro común. El Sol, situado a unos 30.000 años luz del centro de la Vía Láctea, viaja a una velocidad de unos 210 km/s y completa una revolución entera cada 200 millones de años.

La Vía Láctea incluye gran cantidad de polvo y partículas de gas esparcidas entre las estrellas. Esta materia interestelar intercepta la luz visible emitida por estrellas distantes, de modo que los observadores en la Tierra no pueden contemplar con detalle las regiones lejanas de la Vía Láctea. Se inició una nueva rama de la astronomía cuando el ingeniero electrónico estadounidense Karl G. Jansky descubrió en 1932 que las radioondas se emitían desde la Vía Láctea. Un estudio posterior situó parte de esta radiación en la materia interestelar y parte en fuentes discretas, denominadas al principio radioestrellas. Las radioondas emitidas por las regiones distantes de la Vía Láctea pueden penetrar la materia interestelar opaca a la luz visible y permitir de esta forma a los astrónomos observar regiones ocultas a los instrumentos ópticos. Estas observaciones han revelado que la Vía Láctea es una galaxia espiral con un engrosamiento central de estrellas viejas, un disco exterior de estrellas tanto viejas como jóvenes y calientes que constituyen los brazos espirales y un gran halo de estrellas débiles.

El núcleo de la Vía Láctea ha sido hasta hace poco una región misteriosa, oculta a la vista por oscuras nubes de polvo interestelar. Los astrónomos obtuvieron la primera descripción detallada en 1983, cuando fue lanzado el Satélite de Astronomía Infrarroja (IRAS). Liberados de los efectos atmosféricos de la Tierra, los sensores del IRAS grabaron con un detalle sin precedentes las posiciones y las formas de innumerables fuentes de energía infrarroja que ocupan el corazón de la Vía Láctea. Entre éstas se descubrió un objeto macizo que no era una estrella y demasiado compacto para ser un cúmulo de estrellas; se pensó que podría ser un agujero negro. Ver Astronomía infrarroja; Radioastronomía.

12 EL COSMOS

A pesar de su gran tamaño, la Vía Láctea es sólo uno de los muchos grandes sistemas de estrellas, llamados galaxias, que pueblan el Universo conocido. Los estudios dirigidos por el astrónomo estadounidense Edwin Hubble resolvieron en 1924 el problema de la naturaleza de las nebulosas espirales, mostrándolas como galaxias individuales igual que la Vía Láctea pero situadas a distancias muy grandes. Ciertas galaxias tienen forma espiral, otras son esferoidales y carecen de brazos espirales, y otras tienen un contorno irregular, mostrando a veces rastros de brazos espirales. Uno de los mayores telescopios del mundo, el telescopio Keck del Observatorio Mauna Kea, reveló la existencia de galaxias situadas a una distancia de la Tierra de más de 10.000 millones de años luz.

Los análisis espectrales de la luz de las galaxias muestran que las estrellas que constituyen estos sistemas se componen de elementos químicos conocidos en la Tierra. Además demuestran que todas se mueven respecto a la Vía Láctea: cuanto más alejada está una galaxia, mayor es su recesión (*ver Efecto Doppler*). Esto se ha tomado como prueba de que el Universo se expande y que surgió de un estado de la materia extremadamente caliente y denso en un gran estallido llamado el *Big Bang*, la Gran Explosión. Las posibles condiciones que pudieron haber iniciado esta explosión se tratan en una teoría cosmológica propuesta a comienzos de la década de 1980 que se conoce como teoría inflacionaria. La radiación que llena el Universo se ha ido enfriando desde la Gran Explosión. Su temperatura actual es de unos 3 K ($-270\text{ }^{\circ}\text{C}$); se conoce como radiación de fondo de microondas y proviene de todas las direcciones. Fue descubierta en 1965 por los físicos estadounidenses Arno Penzias y Robert W. Wilson, y suele ser el mejor indicador de las fases iniciales de la historia del Universo. La teoría relativista de la gravedad de Albert Einstein también apoya la teoría de la Gran Explosión.

La mayoría de los astrónomos creen que los quásares, descubiertos en la década de 1960, son los núcleos energéticos de galaxias muy distantes. Por razones que todavía no conocemos, son tan brillantes que ocultan la luz de las galaxias que los rodean. Las líneas espectrales de los quásares exhiben desplazamientos hacia el rojo muy grandes, indicativos de que estos objetos se alejan de nuestra galaxia a velocidades por encima del 80% de la velocidad de la luz. Su gran velocidad también significa que en apariencia se encuentran entre los objetos cosmológicos más distantes. Astrónomos del Observatorio Monte Palomar descubrieron en 1991 un quásar a una distancia de 12.000 millones de años luz.