

TEMA 02: Estructura y composición de la Tierra. Los métodos de estudio.

AUTOR: **Alberto Viñuela Miranda**

Existe un **chiste** en el mundo anglosajón que reza algo así como:

—Y usted, ¿En que trabaja?

—En Geofísica.

—¿Y eso en qué consiste?

—¿Puede usted imaginar una pared enorme, de espesor kilométrico, imposible de atravesar, rodear o saltar? Pues bien: Yo estudio lo que hay al otro lado.

Ciertamente, no es muy gracioso; Pero **resume** muy bien la **enorme dificultad y complejidad** que supone el **estudio del interior de la Tierra**.

Es tradición, en los **libros de texto**, hablar de **métodos directos e indirectos** cuando se trata del estudio de la Tierra. Para distinguir entre unos y otros basta acudir a las **dos obras seminales** del pensamiento científico moderno:

- **Métodos directos** serán aquellos que se basen en la **observación** y el **análisis**, y utilicen un enfoque **inductivo** y **experimental**, como propuso **Francis Bacon** en su obra de 1620 "*Novum Organum*".
- **Métodos indirectos** serán aquellos que se basen en el **cálculo** y el **razonamiento**, y utilicen un enfoque **deductivo** y **teórico**, como propuso **Galileo Galilei** en su obra de 1600 "*Le Meccaniche*".

En el caso que nos ocupa, **métodos directos** serán aquellos que impliquen los campos de la **Mineralogía** y la **Petrología**, así como los de la **Vulcanología** y la **Estratigrafía**.

Los **métodos indirectos** implicarán tres campos principales: La **Geodesia**, la **Sismología** y el **Geomagnetismo**.

Abordaremos pues el tema **desglosando los hallazgos y conclusiones de cada una de estas áreas científicas**; muchas veces entrelazadas, hasta tal punto que establecer la completa red de conexiones resulta complicado en tan poco espacio; discúlpe-se si solo llego a explicitar unas pocas.

Comencemos por los **métodos directos**.

La **Mineralogía** y la **Petrología** se pueden considerar una única disciplina en el contexto que nos ocupa. Resultará más **útil distinguir entre el trabajo de campo y el de laboratorio**.

El **trabajo de campo** aprovecha dos tipos de labores: la **minería** y los **sondeos**. El problema es que ninguna de ellas apenas logra arañar la superficie del planeta.

Usando la anterior **metáfora** de la pared, solo nos permiten saber algo de la pintura y de la pátina que la recubre.

La **mina más profunda** del mundo, la **mina de oro de Mponeng**, "solo" llega a 4km de profundidad, y el **Pozo Superprofundo de Kola**, no pudo superar, por limitaciones técnicas, los **12km**.

En definitiva, se tratan de **vías de estudio casi totalmente agotadas** que, aun así, permiten concluir:

- Que se pueden distinguir **dos tipos de corteza, continental y oceánica**, de **distinta petrología y grosor**, cuya diferenciación es explicada por la Tectónica de Placas –más allá del ámbito de esta redacción–.
- Que la **corteza continental** está compuesta por una enorme **diversidad de materiales**, resultado de la **interacción con otros sistemas** como el **Ciclo del Agua**, el **Ciclo del Carbono** o el **clima**.
- Que existe un **gradiente geotérmico** que indica que el interior de la Tierra está muy caliente.

El **trabajo de laboratorio** resulta mucho más fructífero.

La **Ciencia de Materiales** nos proporciona el concepto de **reodo**, etimológicamente, “*sólido que fluye*”. Describe aquellas sustancias que comportándose como **sólidos ante esfuerzos instantáneos**, responden de **modo viscoso** dada una **ventana de tiempo** lo suficientemente amplia. Este estado es propio de **materiales cercanos a su punto de fusión**, como es de esperar en el interior terrestre.

El **yunque de diamante** es un instrumento sofisticado que permite estudiar el comportamiento de los materiales a las **presiones y temperaturas** esperables en el **interior terrestre**.

Así se descubrieron **polimorfos del olivino** como la **wadsleyita**, la **ringwoodita** y la **bridgmanita**, minerales, suponemos, constituyentes del manto.

Es precisamente el **análisis químico de meteoritos** el que nos ha permitido deducir:

- En el caso de los **rocosos**, que el **olivino** es el mineral predominante en el manto, además de piroxenos y anfíboles.
- En el caso de los **metálicos**, la presencia de **NiFe** –aleación de níquel y hierro– en el núcleo terrestre.

Además, el **análisis** de la **proporción uranio/plomo en zircones** nos ha permitido deducir la **edad de la Tierra**, de unos **4.500Ma** –millones de años–.

La **Vulcanología** no solo confirma la **predominancia de silicatos** y de las **elevadas temperaturas** en el interior terrestre. Los **xenolitos**, rocas inusuales que a veces se encuentran en el interior de rocas ígneas, aportan información de primera mano sobre los **materiales mantélicos**.

La **Estratigrafía** nos proporciona información abundante, tanto por la **secuencia de deposición** de los estratos, como por los **fósiles** que podemos encontrar en ellos. Esto nos permite **reconstruir la evolución de la corteza** terrestre a lo largo de los eones y, quizás más esencial:

- Aceptar la existencia de un **Tiempo Profundo** como **marco cronológico**.
- Adoptar un **paradigma gradualista** –que no **uniformista**– a la hora de interpretar los resultados de todos los demás hallazgos.

Los métodos directos, por sus limitaciones intrínsecas no dan mucho más de sí. Serán los **métodos indirectos** los que nos proporcionen el **grueso de la información**.

La **Geodesia**, o “División de la Tierra” es un concepto acuñado por **Aristóteles**. Al igual que la minería en la prehistoria, su intención original fue pragmática, utilitarista y de aplicación local. No obstante, su **aplicación a escala global** es extremadamente jugosa en cuanto a sus hallazgos.

Es importante distinguir entre las ramas de la Geodesia.

Existe una **geodesia práctica**, “geográfica”, centrada en la **Topografía** y la **Cartografía**. No debe ser despreciada en nuestro contexto, ya que técnicas como la **triangulación** o instrumentos como el **LIDAR** o el **GPS** son de enorme utilidad científica.

También existe una **geodesia teórica**, que se puede dividir en:

- **Geodesia Matemática** o geometría *sensu stricto*, implicada en el estudio del **tamaño y la forma de la Tierra**.
- **Geodesia Física**, que estudia sobre todo el **campo gravitatorio terrestre** y las **mareas**.

Nos centraremos en los hallazgos de la geodesia teórica desde un punto de vista histórico.

La **Geodesia Matemática** se centró originalmente en el problema de medir la **circunferencia de la Tierra** y, posteriormente, el **meridiano**.

El primero en realizar una medición precisa del tamaño de la Tierra fue el griego **Eratóstenes de Cirene** en el **siglo III a.C.** Tras comprobar que el **ángulo del sol al mediodía** difería en 7° entre las ciudades de Alejandría y Siena, separadas 800km, dedujo correctamente que la **circunferencia terrestre** medía unos **250.000 estadios griegos** –unos 180m–, obteniendo un valor sorprendentemente preciso de unos **42.000km**.

En el **siglo I a.C.**, **Posidonio de Apamea** repitió el cálculo midiendo la **diferencia de latitud de la estrella Canopus** entre Rodas y Alejandría, obteniendo un resultado **algo menor**.

Desgraciadamente, **Ptolomeo de Alejandría** asumió el resultado de de Eratóstenes, pero usando el estadio romano, bastante menor. Su cálculo quedó en **solo 29.000km**.

Su autoridad hizo que esta medida fuera aceptada hasta tiempos de **Cristobal Colón**, hasta el punto de que este **creyó inicialmente** que efectivamente había llegado hasta las Indias, y no a un nuevo continente.

La **primera medición de la era científica** la realizó **Willebrord Snell** en **1615**, **triangulando la posición entre dos campanarios** en Holanda. Obtuvo unos **39.000km**.

A partir de las **deducciones** de **Sir Isaac Newton (1687)** y **Christian Huygens (1690)** de que la Tierra estaba **achatada a causa de su rotación**, nació el **concepto de Elipsoide de Referencia**.

La **primera coordinación científica internacional**, la célebre **Expedición Hispano-Francesa**, tuvo como objeto confirmar, con éxito, esta predicción.

Gracias a ella, en **1793** se definió el **metro como unidad de medida**, equivalente a la diezmillonésima parte de la distancia entre el polo norte y el ecuador.

La **Geodesia Física** tiene como instrumentos principales los distintos tipos de **gravímetro**, **absolutos** y **relativos**.

Inicialmente contruidos con péndulos y resortes, hoy en día, proyectos **satelitales** como **GRACE** y **GRACE-FO** hacen uso de la **interferometría láser** para realizar medidas ultraprecisas.

El **primer gravímetro, de torsión**, fabricado en **1798** por **Henry Cavendish**, permitió deducir que la **densidad media del planeta** era de unos 5.5 g/cm^3 .

Dado que la **densidad media de la corteza superior** es de 2.7 g/cm^3 , Cavendish dedujo correctamente la **existencia de un gradiente de densidad vertical** análogo al de temperatura.

Con anterioridad a Cavendish ya se conocía la **existencia de gradientes de densidad horizontales**, pues se había medido la **desviación de la plomada** en la **vecindad de montañas**.

La existencia de estos gradientes multidireccionales condujo al **concepto de Geoid**, o **forma real** de la Tierra. El modelo más avanzado actualmente se conoce como **“Patata Gravitatoria de Potsdam”**.

La **Sismología** es el **método indirecto** que más información proporciona sobre la **estructura en capas** de la Tierra, mediante el **análisis de la propagación de las ondas** causadas por los **terremotos**.

Volviendo a la **metáfora** inicial de la pared, podríamos hacer Sismología con ella escuchando atentamente como suena al golpearla en distintos puntos.

El **primer sismoscopio**, que no sismógrafo, fue fabricado por **Zhang Heng** en el año **132 en China**. Llegó a detectarlos a 600km de distancia. En la **Ilustración**, el interés científico por los terremotos nació a partir del devastador **seísmo de Lisboa de 1755**, que se llegó a sentir en toda la península. Pero no fue hasta **1842** que **James David Forbes** inventó el **primer sismógrafo moderno**. El **primer terremoto estudiado exhaustivamente** fue el de **San Francisco en 1906**. Gracias a él, **Richard Dixon Oldham** descubrió las **ondas P y S**, y en 1910 **Harry Fielding Reid** propuso el modelo de **rebote elástico** como causa de los seismos.

La Sismología es la **disciplina que más información aporta** sobre el interior de la Tierra. Del **análisis de las ondas P y S** se pudo deducir la **existencia de discontinuidades** y de la **estructura en capas** del planeta. Anteriormente se creía que el gradiente de densidad interno era continuo. La existencia de una **Zona de Sombra** sirvió para determinar la existencia de un **núcleo denso**. Además, el comportamiento de las **ondas S** determinó que **el núcleo externo es líquido**. La **localización de los terremotos**, tanto geográfica como en profundidad, permitió determinar los límites de las **placas tectónicas**. Actualmente sabemos que existen **estructuras mantélicas** gracias a la **Tomografía Sísmica**.

El último de los métodos indirectos, el **Geomagnetismo**, **no es el más reciente**. Ya en el **siglo III a.C.**, la **Dinastía Han**, en China, utilizaba **brújulas geománticas** para buscar la mejor orientación de sus construcciones. La **Dinastía Song** en el **siglo XI** inventó la **brújula de navegación**, siendo poco después mencionada en textos europeos.

Pero fue el visionario inglés **William Gilbert** quien propuso ya en su libro de **1600 De Magnete** que **la Tierra es un gran imán**. Es de recibo señalar que en su tiempo los fenómenos magnéticos eran más conocidos que los eléctricos, y que no fue hasta **1820** que el danés **Hans Christian Ørsted** los relacionó. No obstante, la primera **explicación convincente** para el magnetismo terrestre fue aportada por el británico **Sir Joseph Larmor** con su **Hipótesis de la Dinamo Autoexcitada**, que propone el flujo del núcleo externo, **NiFe en estado líquido**, como causante.

Las **contribuciones del Geomagnetismo** son importantísimas. La **medición de las anomalías magnéticas**, cuando **globales**, permiten estudiar la **dinámica del núcleo externo**; cuando **locales**, el **subsuelo**. Asimismo, el descubrimiento de las **inversiones geomagnéticas**, por su **registro en las rocas**, ha sido esencial para la **Paleogeografía**, pues ha permitido reconstruir la **deriva de los continentes**.

Repasados los principales métodos de estudio y sus hallazgos a veces aislados, a veces interconectados, llega el momento de **recapitular** todo lo anterior.

La Tierra es un **planeta rocoso**, con **6.371km** de diámetro medio, **achatado por los polos** a causa de su rotación. Las **irregularidades superficiales son mínimas** respecto a su tamaño. Su **composición no es homogénea, sino estructurada en capas ordenadas según su densidad**. Las capas fluidas –**Atmósfera e Hidrosfera**– se apoyan sobre el conjunto de capas sólidas o **Geosfera** e interaccionan con ella de modo harto complejo.

La **Geosfera**, desde un **punto de vista químico**, se puede resumir *grosso modo* en:

- Un **núcleo metálico** -NiFe- de unos **3.500km de radio** envuelto por
- una **Petrosfera** –término utilizado en **Planetología** para describir la **porción silícea** de un cuerpo celeste— de unos **2.900km** de espesor, que a su vez se divide en:
 - **Manto**, rico en silicatos pesados, destacando el **olivino y sus polimorfos**.
 - **Corteza inferior u oceánica**, rica en **basalto** y otros silicatos de densidad intermedia, normalmente oculta bajo los océanos.
 - **Corteza superior o continental**, que forma parches de silicatos ligeros como el **granito** sobre la superficie: los continentes.

La **Geosfera** también se puede describir desde un **punto de vista mecánico**, gracias sobre todo a la Sismología, y también **termodinámico**.

- La **Litosfera**, etimológicamente "*esfera de piedra*" por alusión a su **rigidez y fragilidad** está formada por la corteza y la parte superior del manto. En ella se **originan los terremotos** y está **dividida en placas** irregulares cuya interacción es muy compleja y que se desplazan sobre...
- La **Astenosfera**, etimológicamente "*esfera sin fuerza*", por alusión a su comportamiento **viscoso y dúctil** –reodo–. Abarca hasta la **discontinuidad de Repetti** o de los **660km**, donde el cambio en el **índice de coordinación Si:O**, de **IV a VI**, decide un cambio relevante en las propiedades mecánicas.
- La **Mesosfera**, etimológicamente "*esfera del medio*" es **especialmente rígida** por la estructura en **perovskita** que adoptan los silicatos. La **Región D"**, limítrofe entre manto y núcleo y de unos **200km** de espesor, es turbulenta, irregular y aún muy misteriosa.
- La **Endosfera** coincide con el núcleo ferroso. El **diagrama de fases P-T** explica que exista una **endosfera externa líquida** y una **endosfera interna sólida**, ya que en la **discontinuidad de Wiechert-Lehmann**, a **5155km** de profundidad se produciría una transición de estado a causa de la enorme presión de unos **330GPa**.
 - La **fluidez del NiFe** en el **Núcleo Externo** es **similar al agua**. Sus corrientes internas son responsables de la **Magnetosfera** que protege a la Tierra del **viento solar**.
 - Del **Núcleo Interno** solo sabemos con seguridad que **no puede ser ferromagnético** y que debe **crecer en tamaño a medida que se enfría**.

Llegados este punto, podría parecer por todo lo escrito –y no digamos ya por lo que ha quedado en el tintero– que la **comunidad científica posee un conocimiento bastante completo y exacto**, de nuestro planeta, y que **poco nos queda por descubrir**.

Nada más lejos de la verdad. Todavía hay **muchos misterios** por resolver, por poner unos ejemplos:

- ¿**Cuánta agua** podría haber en la **Astenosfera**?
- ¿Está la **Mesosfera** dividida en “**mesoplacas**” análogas a las litosféricas?
- ¿Qué **relación** hay entre la **Zona D** y los **fenómenos corticales**?
- ¿Por qué el **núcleo interno gira más rápido** que la corteza?
- ¿Es el **núcleo interno** un **único cristal** de hierro?

La **única certeza** que tenemos es que al **geofísico del chiste** con el que comenzamos este texto, aún le queda **mucho pared por estudiar**.