

LOS RECURSOS GEOLÓGICOS DE LA TIERRA: Un proceso con retorno

enresa

El planeta Tierra es la consecuencia de una maravillosa y compleja conjunción de fuerzas físicas que, a lo largo del tiempo, dieron como resultado la vida en sus diferentes formas y manifestaciones.

El desarrollo y progreso de la humanidad han estado unidos a su capacidad para utilizar los recursos y materias primas que la Tierra, y específicamente la corteza terrestre, ha puesto a su disposición.

La capacidad de aislamiento de la corteza terrestre no sólo ha proporcionado muchos de los recursos clave para el progreso humano, sino que ha hecho también posible la conservación de los restos de los primeros pasos de la humanidad y de las primeras culturas, permitiéndonos así la reconstrucción de nuestra propia historia.

A medida que la ciencia y la tecnología han ido progresando en el conocimiento del origen y funcionamiento de los procesos geológicos y geoquímicos, el aprovechamiento de los recursos ha sido cada vez mayor y más intensivo, lo que ha tenido también como consecuencia la aparición de grandes volúmenes de residuos de diversas tipologías.

Sin embargo, sólo en las últimas décadas del siglo XX el ser humano tomó conciencia de que el mantenimiento de la calidad de vida actual sólo puede sostenerse en base a una protección prioritaria y activa del medio que la sustenta.

El conocimiento de nuestro planeta debe permitirnos, además de un uso más racional de los recursos naturales, el aprovechamiento de su capacidad de conservación, para preservar mejor a las personas y al medio ambiente de los residuos que el progreso genera.

La sociedad debe aplicar los conocimientos alcanzados por la ciencia para obtener soluciones seguras, viables y de gran calidad ambiental en la resolución de los problemas reales sobre la gestión de los residuos que generamos, así como tomar conciencia de la importancia de la investigación en el desarrollo del ser humano y en su convivencia armónica con nuestro planeta.



# la génesis

del universo a la Tierra

Las estrellas son fuente de la energía y el origen de la materia. Su evolución comenzó, probablemente, hace catorce mil millones de años.

A partir del hidrógeno, el elemento químico más abundante del universo, y por procesos de nucleosíntesis como la fusión, la captura de neutrones y la fisión, se fueron formando todos los elementos químicos que componen la materia que hoy conocemos, liberándose en su aparición una gran cantidad de energía.

Nuestro sistema solar y específicamente la Tierra, no son sino una parte minúscula del universo, cuya formación ha seguido leyes físicas y químicas bien definidas, lo que ha dado lugar a una determinada distribución de la materia, constituyendo los distintos planetas.

Características generales de los planetas del Sistema Solar

planetas	masa (en relación a la Tierra)	radio (km)	densidad (g/cm <sup>3</sup> )
Mercurio	0,055	2.439	5,43
Venus	0,81	6.051,5	5,25
Tierra	1	6.378	5,52
Marte	0,11	3.393	3,95
Júpiter	318	71.492	1,33
Saturno	95,18	60.268	0,69
Urano	14,5	25.559	1,29
Neptuno	17,14	24.764	1,64
Plutón	0,0022	1.142	2,03

El proceso de acreción o acumulación de materia que generó la Tierra, comenzó hace 4.600 millones de años, finalizando 100 millones de años después. La gran generación de calor que acompañó a este proceso dio lugar a la segregación del núcleo, de la primera corteza continental y la creación de la atmósfera.



# la génesis

del universo a la Tierra

En el **núcleo** se concentraron hierro, níquel y otros elementos afines. A su vez en la **corteza** se acumularon los elementos denominados litófilos, como el silicio, aluminio, oxígeno, uranio, potasio, etc.

El material restante, que constituye la mayor parte de la masa de la Tierra, es el denominado **manto**, cuya composición engloba todo tipo de elementos químicos.

El agua, en forma de vapor, y otros elementos volátiles, formaron una densa atmósfera. El posterior enfriamiento de la superficie de la tierra produjo la condensación del agua y la aparición de los océanos.

En el proceso de formación de la corteza, una serie de elementos y compuestos químicos se fueron acumulando en lugares singulares de la misma, dando lugar a la formación de yacimientos.

Los procesos de erosión, disolución, transporte y precipitación, que tuvieron lugar posteriormente, disgregaron algunos de los yacimientos, pero conservaron y generaron otros muchos. La capacidad de conservación de la corteza ha permitido la utilización de los recursos que contiene, básicos para el desarrollo y el progreso del ser humano.



# la génesis

el planeta Tierra

Pese a que el ser humano vive y se sustenta de la Tierra, su conocimiento directo de la misma es menor del que posee del Sistema Solar y las estrellas.

Los elementos químicos, asociados en forma de minerales y rocas, se han distribuido zonalmente en el planeta Tierra.

## núcleo

Elementos siderófilos: hierro (Fe) y níquel (Ni) fundamentalmente, además de cobre (Cu), cobalto (Co), rutenio (Ru), paladio (Pd), osmio (Os), iridio (Ir) y platino (Pt).

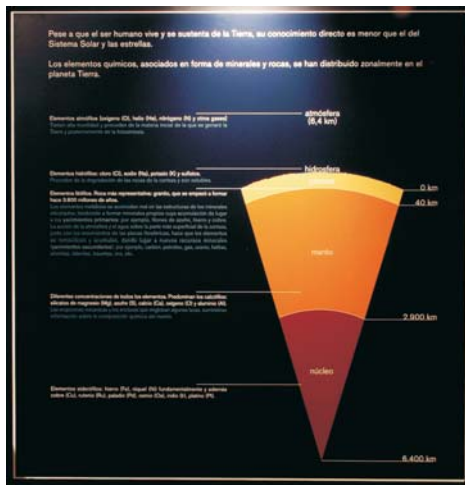
## manto

Las erupciones volcánicas y los enclaves que engloban algunas lavas, suministran información sobre la composición química del manto, formado por diferentes concentraciones de todos los elementos, predominando los calcófilos: silicatos de magnesio (Mg), azufre (S), calcio (Ca), oxígeno (O) y aluminio (Al).

## corteza

Elementos litófilos: oxígeno (O), silicio (Si), aluminio (Al), magnesio (Mg), calcio (Ca), sodio (Na), titanio (Ti), potasio (K), rubidio (Rb), bario (Ba), uranio (U) y tierras raras. La roca más representativa, el granito, empezó a formarse hace 3.800 millones de años.

Los elementos metálicos se acomodan mal en las estructuras de los minerales silicatados, tendiendo



# la génesis

el planeta Tierra

a formar minerales propios cuya acumulación da lugar a los **yacimientos primarios**: por ejemplo, filones de azufre, hierro y cobre.

La acción de la atmósfera y el agua sobre la parte más superficial de la corteza, junto con los movimientos de las placas litosféricas, hace que los elementos se removilen y acumulen, dando lugar a nuevos recursos minerales, los **yacimientos secundarios**: por ejemplo, carbón, petróleo, gas, uranio, halitas, silvinitas, lateritas, bauxitas, oro, etc.

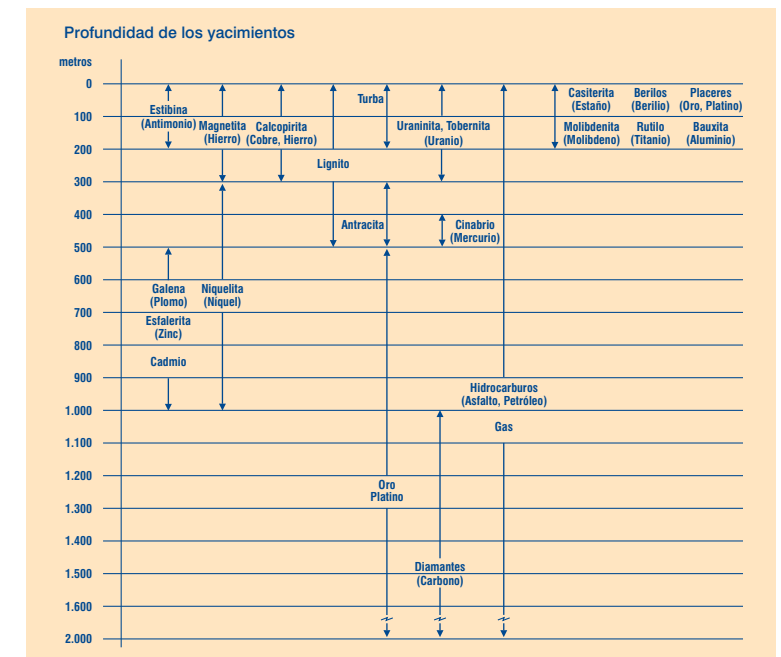
## hidrosfera

Elementos hidrófilos: cloro (Cl), sodio (Na) y potasio (K). Proceden de la degradación de las rocas de la corteza y son solubles.

## atmósfera

Elementos atmófilos: oxígeno (O), hidrógeno (H), helio (He), nitrógeno (N) y gases nobles.

Tienen alta movilidad y proceden de la materia inicial de la que se generó la Tierra y posteriormente de la fotosíntesis.



# la Tierra como despesa

La corteza terrestre proporciona infinidad de materiales que el ser humano utiliza para su progreso y bienestar.

Los recursos minerales se extraen de las zonas externas de la Tierra y representan sólo el 0,4% de la corteza terrestre. El manto y el núcleo son tan inaccesibles para las tecnologías actuales, que es imposible considerar su explotación potencial como recurso.

Según su abundancia en la corteza, se pueden clasificar en:

- Metales más abundantes (abundancia >0,01 %), como por ejemplo: hierro (Fe), aluminio (Al), cromo (Cr), titanio (Ti) y magnesio (Mg).
- Metales más escasos (abundancia <0,01 %) como por ejemplo: cobre (Cu), plomo (Pb), cinc (Zn), níquel (Ni), estaño (Sn), oro (Au), plata (Ag), mercurio (Hg) y cobalto (Co).

Los materiales más utilizados por el ser humano, se pueden agrupar en:

## materiales metálicos

Buenos conductores del calor y la electricidad, con un brillo característico y, en general, sólidos a temperatura ambiente.

Tienen múltiples aplicaciones: metalurgia, telecomunicaciones, industria química, construcción, cableado, etc. Los más empleados son el hierro, el cobre, el plomo y el aluminio.

## metales preciosos y gemas

Muy cotizados, debido a sus características (dureza, maleabilidad, resistencia a la corrosión, etc.), y a su belleza. Además de en joyería, se emplean en medicina, industria, aviación, robótica, etc. Los más usados son el oro, la plata, el platino, las gemas y los diamantes.



# la tierra como despesa

## materiales tecnológicos

Se utilizan en determinados procesos industriales de carácter tecnológico.

Los más utilizados son el cadmio, empleado fundamentalmente en la fabricación de pilas alcalinas; la bentonita, arcilla de gran poder de absorción con múltiples usos industriales; el litio, usado principalmente para la fabricación de semiconductores; y el germanio empleado en la fabricación de transistores y rectificadores.

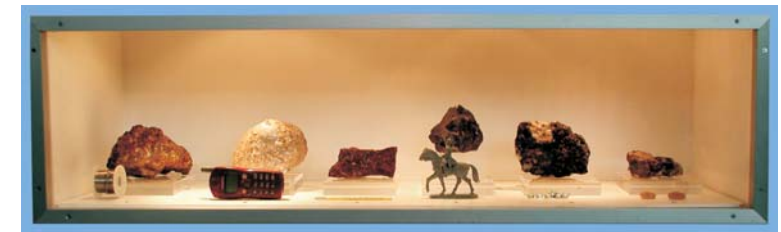
## combustibles

Empleados para producir calor mediante procesos de combustión.

Uno de los más comunes es el carbón, roca sedimentaria formada a partir de restos vegetales. Dependiendo de la temperatura y la presión, se presenta en distintas formas: turba, lignito, hulla, antracita y grafito. Su poder calorífico es mayor en función de la presión y el tiempo a los que ha estado sometido durante su formación.

El petróleo y el gas natural son hidrocarburos, formados a partir de restos orgánicos de origen marino, sometidos a la acción de bacterias en ausencia de oxígeno y a grandes presiones durante periodos de tiempo de escala geológica.

Del mineral de uranio se conocen más de 150 variedades, siendo la pechblenda el que mayor contenido tiene. Es muy energético y se emplea como combustible en las centrales nucleares para producir electricidad.





# propiedades de la corteza

la radiactividad

Las propiedades de los materiales han determinado su distribución, dispersión, conservación, etc. en la corteza. El estudio y conocimiento de estas propiedades, nos permite optimizar la utilización de los recursos.

Ejemplos representativos de estas propiedades son:

## radiactividad

Las tres cuartas partes de la radiactividad presente en nuestro planeta proceden de fuentes naturales como son el gas radón (50%), la radiación terrestre (20%), la radiación cósmica (15%) y nuestro propio organismo (15%).

Las principales magnitudes que se emplean para medir la radiactividad y sus efectos son:

- **La actividad:** se define como el número de desintegraciones de una sustancia radiactiva por unidad de tiempo. Su unidad de medida en el Sistema Internacional es el Bequerel (Bq).
- **La dosis equivalente efectiva:** se emplea para representar el efecto de la radiactividad sobre el ser humano en su conjunto. Tiene en cuenta, tanto el tipo de radiación de que se trata, como los órganos del cuerpo afectados. La unidad de medida en el Sistema Internacional es el Sievert (Sv).

## radiación en el aire

El gas radón es el emisor alfa que más contribuye a la radiación natural. En la cadena de desintegración del uranio se forma radio. Este elemento, al emitir una partícula alfa, genera radón, que sale despedido a la atmósfera en sentido opuesto a la partícula, de manera similar al retroceso de un arma de fuego al disparar un proyectil.

## radiación de la corteza terrestre

La radiación emitida por las rocas y el suelo se debe a la presencia en los mismos de átomos inestables (radisótopos), de los cuales



# propiedades de la corteza

la radiactividad

los más importantes son potasio-40, rubidio-87, y aquellos que integran las tres cadenas de desintegración naturales: serie del uranio-235, compuesta por 17 radisótopos, serie del uranio-238, compuesta por 19 radisótopos, y serie del torio-232, compuesta por 12 radisótopos.

Hoy en día la actividad media de la corteza terrestre es unas cuatro veces menor que hace 4.500 millones de años.

## radiación cósmica

Parte de las radiaciones que recibimos provienen del espacio. Su dosis depende de muchos factores, como la latitud, mayor en los polos que en el ecuador, o la altitud, que es mínima al nivel del mar y duplica su intensidad cada 1.500 metros.

Así, cuando se viaja en avión se recibe una dosis de radiación superior a la que se recibe en un viaje en barco. Por ejemplo, la exposición media a los rayos cósmicos equivale a 0,25 mSv/año, aunque la tripulación de un avión que vuele a gran altura puede llegar a acumular una dosis ochenta veces mayor.

Muchas zonas del mundo presentan valores de radiación natural de fondo mucho más altas que la media mundial, valorada en 2,4 mSv/año. Entre ellas destacan las siguientes:

- Irán, Ramsar: 240-700 mSv/año.
- Brasil, playa de Guarapari: 260 mSv/año.
- Brasil, Araxa: 35 mSv/año.

En España, cuya media es de 1,2 mSv/año, Pontevedra es la provincia con mayor nivel de radiactividad natural (1,5 mSv/año), debido a la abundancia de granito, que contiene uranio. Murcia, por el contrario, es la provincia con fondo radiactivo natural más bajo (0,4 mSv/año) ya que su geología consta, básicamente, de materiales sedimentarios que no contienen cantidades importantes de isótopos radiactivos.



# propiedades de la corteza

la radiactividad: instrumentos de detección

Una de las características más importantes de la radiactividad es que no se puede percibir con los sentidos, sin embargo existen equipos que permiten detectarla, observarla y medirla. Este es el caso de la cámara de niebla y los detectores de radiactividad.

## cámara de niebla

Los átomos inestables tienden a transformarse en otros elementos más estables, desprendiendo energía en forma de radiaciones ionizantes, propiedad que conocemos como radiactividad. Este proceso de transformación, o de desintegración, puede ser espontáneo –de origen natural– o provocado artificialmente.

Para ver los efectos de la radiactividad, en el interior de la cámara se ha creado una atmósfera artificial sometiendo alcohol a una temperatura de  $-60^{\circ}\text{C}$ , consiguiendo así su condensación en forma de niebla.

Al producirse las desintegraciones radiactivas que se dan de manera natural en nuestro entorno, se emiten partículas y energía que interaccionan con esa atmósfera. Las estelas que podemos ver nos muestran el recorrido de las partículas.



Generalmente, las estelas más cortas corresponden a la **radiación alfa ( $\alpha$ )**, que consiste en la emisión de dos protones y dos neutrones en una única partícula. Al tener una masa elevada, su interacción con otros átomos es prácticamente inmediata y se frenan muy rápidamente.

Las estelas dejadas por la **radiación beta ( $\beta$ )** son más largas, ya que está formada por electrones, que aparecen como consecuen-



# propiedades de la corteza

la radiactividad: instrumentos de detección

cia de la desintegración de un neutrón, y al tener menos masa que la radiación alfa, puede penetrar más en la materia.

La **radiación gamma ( $\gamma$ )** está compuesta por fotones, que carecen de carga y masa. Por este motivo su capacidad de penetración es alta y las estelas que deja son las más largas.

## interacción radiación-materia

Existen equipos que nos permiten detectar la presencia de la radiactividad y medir su intensidad. De esta forma, podemos cuantificar lo que emiten las distintas rocas que forman parte de nuestro entorno y observar la capacidad de blindaje de diversos materiales, al interponerlos entre la roca y el detector.

Las radiaciones ionizantes afectan a la materia al incidir con ella. Su capacidad de penetración depende del tipo de radiación y de la materia sobre la que incide.

En el caso de la radiación **alfa**, al poseer una masa elevada, su interacción con los átomos del material sobre el que incida es prácticamente inmediata, siendo sólo capaz de atravesar unas centésimas de milímetro en la materia. Se puede detener con una simple hoja de papel.

La radiación **beta**, al tener menos masa, aumenta su poder de penetración, aunque éste se limita a unos milímetros. Una lámina de aluminio de pequeño espesor puede frenarla.

La radiación **gamma** y los **rayos X**, al consistir en la emisión de fotones, o lo que es lo mismo, ondas electromagnéticas que no tienen ni masa ni carga, posee una alta capacidad de penetración en la materia. Para detenerla se necesitan materiales más densos como el hormigón o el plomo.



# propiedades de la corteza

otras propiedades

## densidad

La densidad de los distintos materiales tiene gran importancia en la distribución inicial en la corteza terrestre, de hecho, los materiales más densos se situaron a mayor profundidad.

Sin embargo, los procesos geológicos han colocado en superficie materiales formados a kilómetros de profundidad, como es el caso de los granitos, que el ser humano ha venido utilizando de manera habitual en múltiples aplicaciones, siendo la más representativa la construcción.



## solubilidad

Las rocas y los minerales sometidos a la acción del agua se disuelven, aunque para algunos de ellos el proceso se extiende a lo largo de millones de años. Cuando el agua se evapora, los compuestos disueltos precipitan.



# propiedades de la corteza

otras propiedades

Un claro ejemplo de esta propiedad son las salinas, donde se deja evaporar el agua para que precipite la sal disuelta en ellas.

La solubilidad de los materiales es muy variable, como se puede comprobar introduciendo en agua distintas muestras (por ejemplo, cuarzo, caliza y roca salina) y midiendo con ayuda de conductímetros su grado de disolución.

## impermeabilidad

El movimiento del agua a través de las rocas está condicionado por las características físicas de éstas. Así, en las rocas más permeables, como calizas y areniscas, el agua se mueve a través de los poros formando acuíferos, reservas de agua de gran utilidad para el ser humano. Un ejemplo de ello son las Tablas de Daimiel.

Cuando el agua se desplaza a velocidades tan bajas que son casi imperceptibles, se considera que las rocas son impermeables. Por ejemplo, la bentonita es una arcilla que se expande en contacto con el agua, razón por la cual se utiliza como material aislante y de sellado.





# propiedades de la corteza

la naturaleza nos enseña

La corteza terrestre es capaz de conservar, durante periodos muy largos de tiempo, materiales de diversas características. Gracias a esa propiedad hemos sido capaces de conocer la historia de la humanidad y cual era el entorno y formas de vida de nuestros más remotos ancestros, además de su evolución por medio de las herramientas, tejidos y utensilios encontrados, algunos de ellos, en sorprendente buen estado de conservación.

Se pueden citar multitud de ejemplos que confirman esta capacidad de conservación pero será suficiente con hacer referencia al

yacimiento de Atapuerca en Burgos, donde se han encontrado restos que nos permiten reconstruir la vida y el entorno de nuestros antepasados hace varios centenares de miles de años.

Desde el punto de vista tecnológico, debemos recordar que los yacimientos

petrolíferos han sido capaces de almacenar, durante millones de años, recursos energéticos (petróleo y gas) fundamentales en la sociedad actual.

De la misma manera que el ser humano ha recurrido a la naturaleza para reproducir muchos de los sistemas y equipos que manejamos –desde las presas construidas por los castores, a los sistemas de inyección naturales de las serpientes y abejas que reproducimos en nuestras agujas hipodérmicas, o los sistemas de vuelo de las aves e insectos utilizados en el diseño de nuestros sistemas de aviación–, los sistemas de almacenamiento naturales, pueden ayudarnos en el aislamiento de aquellas sustancias que lo requieran. Desde los primitivos agujeros excavados en el permafrost por nuestros antepasados prehistóricos para conservar sus alimentos, a los rudimentarios pozos aún utilizados por algunas culturas actuales.



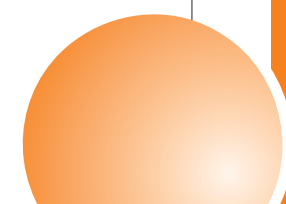
# propiedades de la corteza

la naturaleza nos enseña

Hoy se almacenan sustancias en formaciones naturales, que permiten una gestión estratégica, creando reservas para el futuro. Este es el caso del agua, cuya demanda no se ajusta a la oferta, ni en el tiempo ni en el espacio, por lo que se almacenan los excedentes a gran profundidad en formaciones geológicas. De esta manera el agua no se evapora, creando una reserva para épocas de aumento de la demanda.

Otro caso es el del gas natural. Mientras que la oferta de gas es prácticamente constante a lo largo del año, la demanda experimenta considerables variaciones estacionales, incluso diarias. Para solventar este problema, se inyecta gas en almacenamientos a más de mil metros de profundidad, cuando la oferta supera a la demanda, y se extrae en caso contrario, permaneciendo siempre una reserva mínima para poder reaccionar ante un problema de suministro.

La conjunción de las propiedades de la corteza, con las herramientas o materiales desarrollados por el ser humano, y su evolución a lo largo de los tiempos, también sirven como una importante herramienta de investigación cuyo objetivo es conseguir, mediante la combinación de la naturaleza y la tecnología, la seguridad para el medio ambiente. Esta rama de la investigación la conocemos como el estudio de los análogos naturales.





# propiedades de la corteza

análogos naturales y arqueológicos (1)

Se presentan a continuación algunos proyectos relevantes de investigación en el campo de los análogos naturales y arqueológicos.

## Oklo

En Mounana, Gabón (África), existe un yacimiento de uranio muy antiguo, que se formó hace casi dos mil millones de años. En una de las laderas de la mina se ha conservado uno de los escasos reactores nucleares naturales que existen en el mundo.



Durante cientos de miles de años, se produjeron reacciones nucleares en cadena y se generaron residuos radiactivos similares a los que se generan hoy de forma controlada en las centrales nucleares y que han quedado retenidos en las rocas más próximas.

La naturaleza nos muestra un ejemplo de lo que ocurre con los productos altamente radiactivos, surgidos de la fisión nuclear: a lo largo de miles de años se han ido desintegrando, dejando sólo residuos débilmente activos. Además, los distintos materiales presentes en la zona han actuado de barrera, impidiendo la dispersión de la radiactividad.

## Cigar Lake

En el norte de Canadá, en las proximidades del lago Cigar Lake, se descubrió un yacimiento de uranio de más de 1.000 millones de años de antigüedad.

A pesar de ser uno de los mayores y más ricos yacimientos de uranio del mundo, con un 40% de riqueza en algunos puntos, y de



# propiedades de la corteza

análogos naturales y arqueológicos (1)

encontrarse sólo a 430 m de profundidad, no existen indicios de su presencia en la superficie.

Existen dos causas por las que este yacimiento no revela su presencia en superficie: por un lado, los minerales de uranio se encuentran rodeados por materiales arcillosos, que los han protegido del agua durante todo este tiempo, y por otro, las aguas subterráneas de la zona son pobres en oxígeno, lo que impide que el uranio se disuelva y viaje hasta la superficie. Se ha comprobado, de hecho, que las muestras de agua tomadas a 5 m. de la zona mineral, cumplen sobradamente los requisitos en contenido de uranio para el agua potable.

La lección más importante que se puede obtener de Cigar Lake es que el uranio ha estado protegido de manera natural durante millones de años.

## Dunarobba

Próximo al pueblo de Dunarobba, en Umbría (Italia), se encontró un foso arcilloso con más de 60 troncos de árbol de más de un millón de años de antigüedad, todavía en posición vertical, que sorprendentemente no se habían petrificado y conservaban aún su madera en perfecto estado. Al estar enterrados bajo masas de arcilla, los troncos no sufrieron la acción de ningún agente exterior. Sólo aquellas partes que no estaban protegidas, han desaparecido.

Lo fascinante de Dunarobba es que la madera de estos árboles aún puede ser cortada, serrada, quemada o pulida, es decir, se ha conservado fresca.

Se demuestra así, a través de este impresionante ejemplo, la capacidad de las arcillas de aislar y conservar objetos enterrados durante larguísimos periodos de tiempo.



# propiedades de la corteza

análogos naturales y arqueológicos (2)

## Lago Lomond

En Escocia, en el Lago Lomond, diversos acontecimientos naturales han dado lugar a una peculiar formación sedimentaria, similar a un bocadillo, en el que el relleno está formado por sedimentos marinos y el "pan" lo constituirían dos capas de sedimentos de agua dulce.

Hace 10.000 años, el lago Lomond fue formando en su fondo una capa de sedimentos de agua dulce. Al elevarse después el nivel del mar, el lago se llenó de agua salada, depositándose sobre la primera capa de sedimentos, una nueva con sedimentos de origen marino. Bajó de nuevo el nivel del mar y, alimentado por las lluvias y los ríos, el lago volvió a llenarse de agua dulce.

Ahora existe en él una capa de sedimentos marinos encerrada entre dos de sedimentos de agua dulce contenidos en estructuras arcillosas. La capa de sedimentos marinos presenta grandes diferencias con las dos de agua dulce: tiene concentraciones mucho más altas de uranio, radio, torio, cromo, yodo y bromo, y ha permanecido perfectamente diferenciada durante miles de años.

El estudio del Lago Lomond nos demuestra que los elementos naturales radiactivos que se encontraban en la capa de sedimentos marinos apenas se han desplazado a lo largo de 5.000 años, lo que confirma la excelente capacidad de aislamiento de la arcilla.

## Morro do Ferro

Existe en Brasil una elevación, conocida como Morro do Ferro, cuyas tierras contienen miles de toneladas de uranio, torio y otros elementos radiactivos casi en la superficie.

El cerro mide 1.541 metros y es uno de los lugares más radiactivos de la superficie terrestre. Tanto es así que, las plantas que crecen en este lugar han absorbido tal cantidad de radiactividad que, cuando se las deposita sobre una película de las empleadas en rayos X, dejan una imagen radiográfica.

Analizando las aguas subterráneas que se filtran desde el yacimiento, se ha comprobado que la presencia de material radiactivo



# propiedades de la corteza

análogos naturales y arqueológicos (2)

en las mismas es 20 veces menor que la concentración permitida en agua potable.

Morro do Ferro nos demuestra que en condiciones adecuadas, los elementos radiactivos no se desplazan a otras zonas.

## Cañón del Kronan

El 1 de junio de 1676, el buque de guerra sueco Kronan fue hundido cerca de la isla de Oeland, en el mar Báltico.

Trescientos años después, los arqueólogos recuperaron uno de los cañones del barco. El cañón, cuya aleación posee un 96% de cobre, había estado protegido de tal forma por el fango del fondo del mar, que durante ese tiempo perdió únicamente unas 15 milésimas de milímetro de su superficie.

Este hecho ilustra la capacidad de conservación del cobre, que, enterrado en un terreno arcilloso, podría conservarse durante cientos de miles de años.

## Pinata Castra

En el año 87 d.C., antes de abandonar un campamento fortificado en Escocia, los legionarios de Agrícola enterraron más de un millón de clavos de hierro –de gran valor estratégico en aquel tiempo–, en una zanja de 4 metros de profundidad, para evitar así que cayeran en manos de sus enemigos.

Cubiertos por una gruesa capa de tierra, los clavos permanecieron ocultos hasta nuestros días. Al ser descubiertos, los científicos pudieron comprobar que no estaban afectados por la corrosión.

Una gruesa capa de arcilla, junto con la capa de clavos más superficiales, que al oxidarse retuvieron todo el oxígeno, protegieron durante casi 20 siglos el resto de los clavos.



# propiedades de la corteza

análogos naturales y arqueológicos (3)

## otros ejemplos

Se pueden citar además numerosos ejemplos de construcciones que han sobrevivido en buenas condiciones durante largos periodos de tiempo.

- Las Pirámides de Egipto, construidas hace 4.500 años.
- La Gran Muralla china, que se comenzó a levantar hace 2.200 años.
- El Panteón de Roma, del año 27 a.C.
- El Muro construido por el emperador Adriano en la frontera entre Inglaterra y Escocia, aún en pie a pesar de las inclemencias de la zona.
- El Acueducto de Segovia (España), levantado en granito en el año 117 d.C.
- La presa de Proserpina, en Mérida (España), construida en época romana y aún operativa.

Para conocer la antigüedad de los materiales, existen diversas fórmulas. Una de las más extendidas se basa en la determinación de su edad a partir de la cantidad de un elemento radiactivo presente en el objeto o muestra que se quiera analizar.



# propiedades de la corteza

análogos naturales y arqueológicos (3)

## métodos de datación mediante isótopos radiactivos

Al conocerse el tiempo que debe transcurrir para que un átomo inestable se convierta en estable y las transformaciones atómicas por las que va a pasar hasta conseguirlo, se puede determinar, con un rango de exactitud bastante preciso, la edad del material analizado.

Para muestras de origen orgánico (tejidos, huesos, madera), se utiliza el método del **carbono-14**.

Este elemento químico se produce en la atmósfera cuando los rayos cósmicos convierten el nitrógeno en ese isótopo.

Los organismos vivos lo absorben en una proporción constante que se va reponiendo a la vez que se va desintegrando.

Cuando ese organismo muere, este proceso se detiene y el carbono-14 comienza a desintegrarse convirtiéndose en otros elementos químicos. La proporción del carbono-14 remanente permite determinar el momento en que el mismo dejó de absorberlo.

Cuando se trata de dataciones a escala geológica, hay que recurrir a la presencia en la muestra de elementos radiactivos de vida mucho más larga. En estos casos, se utiliza, entre otros, el método de **uranio-plomo**. En este caso lo que se valora es la presencia en la muestra de los elementos "hijos" de la cadena de desintegración del uranio y su proporción en dicha muestra.





# el ser humano y los residuos

la generación de residuos

La evolución del ser humano y el conocimiento de las propiedades de los materiales de la corteza terrestre, han supuesto un incremento en el consumo de recursos y, por lo tanto, una mayor **generación y diversidad de residuos**.

## la prehistoria

Los residuos eran básicamente orgánicos, siendo perfectamente asumibles por el medio ambiente. Al principio, las poblaciones eran nómadas y abandonaban sus campamentos dejando las basuras producidas: huesos, pieles, restos de sílex, conchas, marfil, madera, astas, etc. Cuando la agricultura y la ganadería se desarrollaron, comenzaron a establecerse en asentamientos, depositando entonces los residuos en basureros fuera de los núcleos de población.

## la antigüedad y la edad media

En la Antigüedad, se establecieron las primeras civilizaciones y los grandes imperios. Los importantes avances tecnológicos de la época, trajeron asociados nuevos tipos de residuos. En muchas ciudades, las basuras se recogían en contenedores de arcilla, o en fosas que se vaciaban y limpiaban periódicamente. En otras, los residuos se vertían a las afueras de la ciudad y se cubrían con tierra, quemándose regularmente.

En la Edad Media, muchos de los conocimientos tecnológicos y normas de higiene de la antigüedad se perdieron y las grandes epidemias mermaron en un tercio la población europea. Sin embargo, en el siglo XV se empezó a considerar de nuevo la necesidad de gestionar los residuos y las calles se comenzaron a limpiar y pavimentar.

## la revolución industrial

A finales del siglo XVIII y principios del XIX, tuvo lugar un gran desarrollo de la metalurgia y de la producción industrial de bienes. Como consecuencia, se emitieron grandes cantidades de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) a la atmósfera. Por otra parte, las investigaciones

# el ser humano y los residuos

la generación de residuos

determinaron que los microorganismos eran los principales causantes de las enfermedades, lo que supuso un importante avance en todo lo referente a la higiene y a la gestión de residuos, al demostrarse que aquéllas podrían controlarse con adecuadas medidas de salud pública.

En la segunda mitad del siglo XIX se pusieron en marcha las primeras incineradoras, planes de gestión de residuos y tratamiento de aguas, aunque las epidemias siguieron afectando a la población a causa de las aún precarias condiciones de salud pública.

## la actualidad

Desde la segunda mitad del siglo XX, los nuevos avances tecnológicos y el desarrollo de la sociedad de consumo, dieron lugar a la aparición de nuevos tipos de residuos, cuyo volumen y peligrosidad han obligado a desarrollar nuevas técnicas de gestión de los mismos, con el fin de minimizar su impacto.

Así, una sociedad moderna no se concibe sin una gestión integral de sus residuos, gestión que se realiza mediante la depuración y reutilización de aguas residuales, la creación de centros de reciclaje para los residuos sólidos urbanos, la retirada selectiva de materiales tóxicos (pilas, aceites) y la elaboración y aplicación de leyes y políticas de protección ambiental a todos los campos de la actividad económica; todo lo cual es consecuencia y expresión de un cambio cultural en el que la protección del medio ambiente se presenta como uno de los desafíos prioritarios de nuestro tiempo.





# el ser humano y los residuos

El ser humano, al igual que utiliza la corteza terrestre para almacenar recursos (gas, agua, etc.), puede utilizarla para almacenar muchos de los residuos que su actividad genera. Aplica para ello, entre otros conocimientos, el adquirido en sus estudios sobre las propiedades de conservación de la corteza.

Se han desarrollado distintos sistemas de almacenamiento de residuos en función del aislamiento que, dado su potencial impacto en el medio ambiente, requieran las sustancias a almacenar.

## instalaciones someras

Los residuos menos peligrosos se almacenan en INSTALACIONES SOMERAS que serán más o menos complejas a medida que se requiera mayor protección. Entre este tipo de instalaciones se pueden destacar las siguientes:

- Vertedero controlado de residuos sólidos urbanos.
- Vertedero controlado de inertes.
- Depósito de seguridad para residuos peligrosos.
- Almacén de residuos radiactivos de baja y media actividad.

Un ejemplo de este último es:

## el centro de almacenamiento de residuos de baja y media actividad del El Cabril

Situado en la provincia de Córdoba, se construyó tras exhaustivos estudios geológicos, sismotectónicos, hidrológicos, etc. que demostraron la idoneidad del emplazamiento.



la Tierra como almacén: el retorno (1)

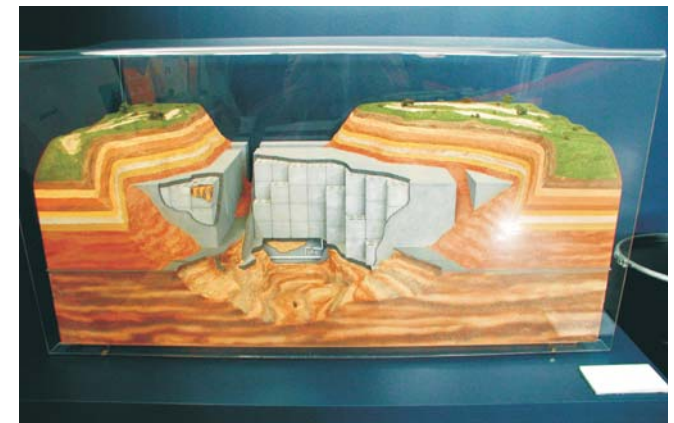
# el ser humano y los residuos

El Cabril incorpora las más modernas tecnologías en este tipo de instalaciones, garantizando de este modo la ausencia de impacto radiológico en el entorno.

Para ello se lleva a cabo un Plan de Vigilancia Ambiental (PVA y PVRA):

- El PVA (Plan de Vigilancia Ambiental) mide continuamente parámetros tales como la pluviometría, el viento, la temperatura, etc.
- El PVRA (Plan de Vigilancia Radiológica Ambiental) permite disponer de los datos necesarios para garantizar que los niveles de radiactividad naturales del emplazamiento no se vean alterados debido a las actividades llevadas a cabo en este centro de almacenamiento.

Los datos obtenidos por medio del PVRA se envían sistemáticamente a los siguientes organismos: Consejo de Seguridad Nuclear, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Junta de Andalucía, Junta de Extremadura y ayuntamientos del entorno.



la Tierra como almacén: el retorno (1)



# el ser humano y los residuos

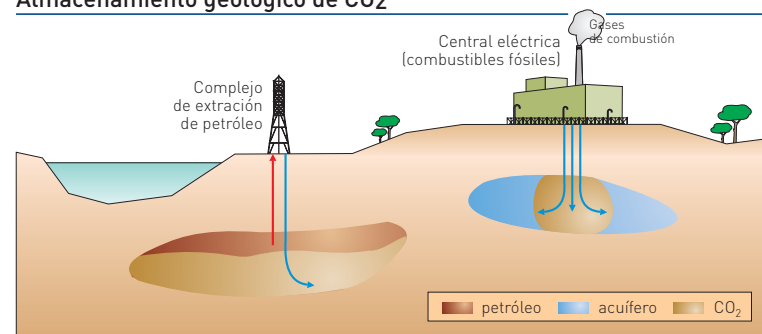
la Tierra como almacén: el retorno (2)

## almacenamientos en formaciones geológicas

Al aumentar el potencial impacto negativo de los residuos, los requisitos de seguridad deben ser más estrictos y por ello se recurre a almacenamientos en formaciones subterráneas. Como ejemplos de ALMACENAMIENTOS EN FORMACIONES GEOLÓGICAS podemos citar:

**Inyección de residuos tóxicos y peligrosos, líquidos y gaseosos, en espacios de estructuras subterráneas.** Estos espacios, formados por poros y fisuras interconectados en la roca, están ocupados por determinados fluidos (aguas saladas, petróleo, etc). La inyección profunda permite depositar los productos, comprimiendo los fluidos naturales o desplazándolos a otra formación. Como ejemplo de este sistema, encontramos la eliminación de CO<sub>2</sub> mediante su inyección en acuíferos o en bolsas petrolíferas.

### Almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>



**Almacenamiento geológico profundo para residuos radiactivos de alta actividad.** A pesar del desarrollo y perfeccionamiento de técnicas cada vez más avanzadas, cuyo objetivo es la minimización de los residuos radiactivos de alta actividad, siempre será necesaria la gestión de un volumen de sustancias que habrá que aislar durante miles de años. La solución que se contempla para estos residuos es su almacenamiento en formaciones geológicas profundas de gran estabilidad.

# el ser humano y los residuos

la Tierra como almacén: el retorno (2)

En todos los sistemas de almacenamiento, pero en especial en el caso de los almacenamientos geológicos profundos, es necesario obtener información precisa de cuál será el comportamiento de los distintos componentes del sistema, tanto en lo referente a los procesos que tendrán lugar, como a su variación en el tiempo dentro de las distintas posibilidades de evolución que pueden considerarse.

Desde este punto de vista, la investigación en el campo de los análogos naturales y arqueológicos es fundamental para avanzar en el conocimiento, en especial por la referencia temporal que ofrecen y que es imposible de reproducir en laboratorio.

### Esquema conceptual de un almacenamiento geológico profundo (AGP) para residuos radiactivos de alta actividad

