

COMPETENCIA SOBRE AGUA, ENERGÍA Y AMBIENTE

5° ciclo - año 2011

Bibliografía 18° programa:

Temas:

1) CONTAMINACIÓN DEL SUELO

2) ENERGÍA GEOTÉRMICA

1 - Contaminación de suelos

INTRODUCCIÓN

La importancia del suelo para el hombre es muy alta dado que es un factor imprescindible en la producción de alimentos. El 84% de la población vive en las regiones menos desarrolladas, las cuales son las que tienen mayores problemas tecnológicos para el adecuado aprovechamiento del suelo.

Desde que el hombre se volvió sedentario y comenzó a cultivar sus propias cosechas, tuvo necesidad de conocer el suelo, sus propiedades y su comportamiento, como soporte de los vegetales. Así, ya los primeros cultivadores neolíticos de las Islas Británicas preferían para aposentarse, suelos bien drenados y fáciles de trabajar, naciendo de esta manera la primera clasificación de suelos en útiles e inútiles, según sus características físicas. Los cultivadores prehistóricos tenían una organización parcialmente sedentaria: el tiempo de permanencia en una localidad dependía de su organización agrícola y del carácter de los suelos locales; la elección inicial del punto de establecimiento estaba muy condicionada al tipo de suelo, lo que denota una necesidad de conocimiento de este medio.

El suelo es la piel que recubre el planeta Tierra. Esta fina película de materia viva, que en ocasiones sólo alcanza unos pocos centímetros de grosor y casi nunca supera los dos o tres metros, tiene una influencia considerable en todo lo que acontece en la superficie de la Tierra. Es en el suelo donde se desarrolla la vida terrestre, y en donde se hincan las raíces; el suelo retiene el agua durante el tiempo suficiente para que las plantas puedan utilizarla, a la vez que fija nutrientes y facilita su uso por los seres vivos. El suelo constituye el hábitat de miles de millones de microorganismos responsables de innumerables transformaciones biogeoquímicas, que abarcan desde la fijación del nitrógeno atmosférico hasta la descomposición de la materia orgánica. Además alberga legiones de animales microscópicos, lombrices de tierra, hormigas, termitas, etc. que se alimentan de raíces, de otros organismos y de materia orgánica. Dentro del suelo, y no fuera, se halla la mayor parte de la biodiversidad terrestre.

EL SUELO

La palabra **SUELO** se deriva del latín *solum*, que significa suelo, tierra o parcela. Los conceptos de suelo y tierra suelen prestarse a confusión, pero se considera suelo a la "capa superior de la superficie sólida del planeta, formada por meteorización de las rocas, en la que están o pueden estar enraizadas las plantas y que constituye un medio ecológico particular para ciertos tipos de seres vivos". Desde el punto de vista agronómico el suelo es el sitio donde viven y crecen las plantas y animales, los cuales son altamente necesarios para el mantenimiento de la vida humana.

En el siglo XIX, Berzelius (1779-1848) definió al suelo como "el laboratorio químico de la naturaleza, en el cual tienen lugar reacciones de descomposición y síntesis de una determinada manera". Los suelos fértiles contienen una sustancia compleja, consecuencia de la descomposición de las plantas, el humus. Esta sustancia se descompone y desaparece, mientras que la tierra no.

Por otro lado el suelo, como soporte de actividades de carácter urbano, se interpreta más en función de las características y propiedades que condicionan dichas actividades: capacidad portante, erosionabilidad, estabilidad, permeabilidad, facilidad de drenaje, etc. En este caso, el alcance del concepto suelo es más amplio, no limitándose al espesor afectado por las raíces de las plantas, sino incluyendo

además todos los materiales no consolidados, meteorizados o alterados de su condición original y situados sobre un lecho rocoso, duro y consolidado.

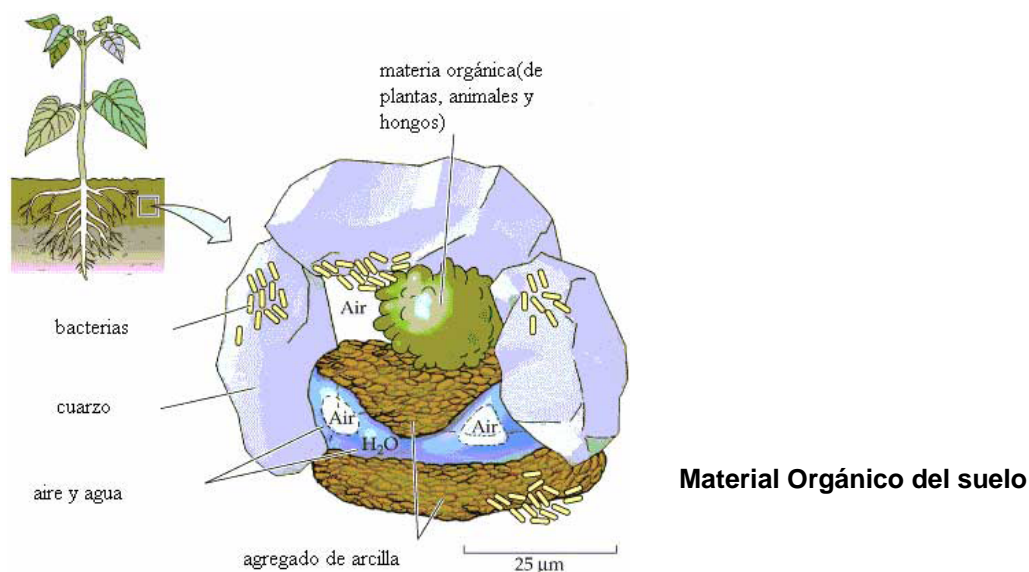
Se entiende por suelo la capa superior de la corteza terrestre, situada entre el lecho rocoso y la superficie, compuesta por partículas minerales, materia orgánica, agua, aire y organismos vivos. La importancia del suelo radica en las numerosas funciones que desempeña, tanto ambientales como económicas, sociales y culturales.

El suelo se considera como un sistema abierto que intercambia materia y energía con la atmósfera, hidrosfera, litosfera y biosfera.

El suelo es un sistema de tres fases: sólido, líquido y gaseoso, y cuatro componentes mineral, orgánico, agua y aire. Un buen suelo para el crecimiento de un cultivo, tendrá 45 % en volumen de materia mineral, 5 % de materia orgánica y 50% de espacio poroso dividido aproximadamente en 25 % de agua y 25% de aire.

El agua se encuentra en la zona no saturada (parte superior) adherida a los granos del suelo mediante enlaces químicos. Las zonas saturadas (parte inferior) constituyen las aguas subterráneas. El aire contenido en el suelo, reside en los poros existentes en la zona no saturada.

El suelo está constituido por material inorgánico y material orgánico. El material inorgánico puede clasificarse en las partículas coloidales y los minerales. El material orgánico que se encuentra en el suelo esta compuesto por una mezcla de biomasa, plantas parcialmente degradadas, organismos vivos microscópicos de tamaño variable y el humus.

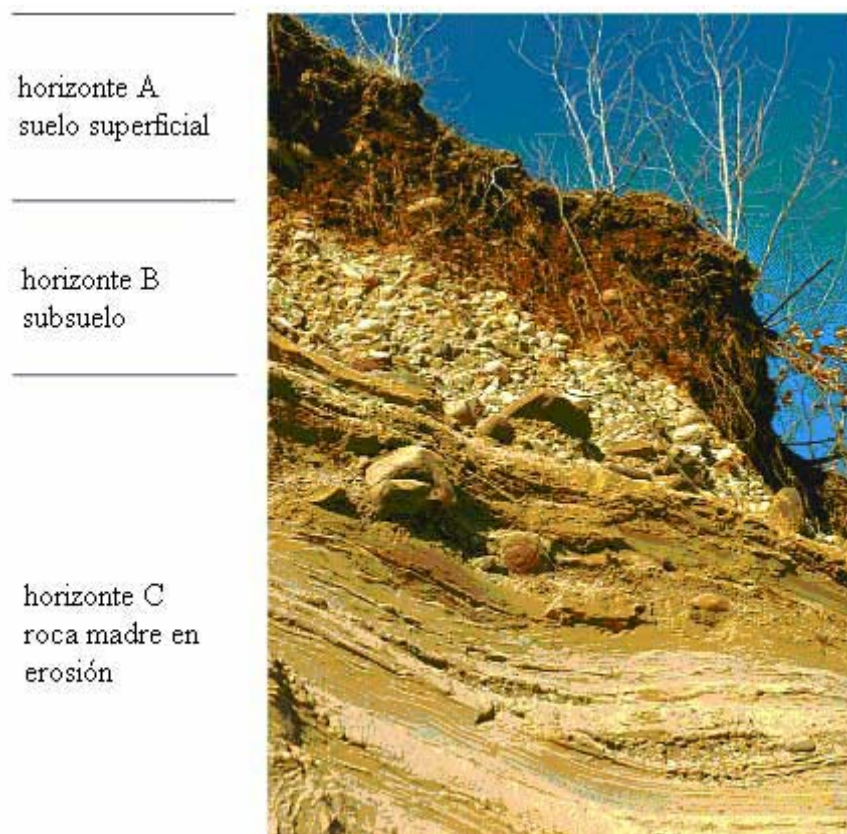


La proporción real de aire y agua varía según las condiciones. Cuando llueve los poros se llenan de agua, que se vacían de nuevo cuando el suelo se seca. En los países tropicales con temperaturas altas, los porcentajes de materia orgánica tienden a ser menores (de 2,5 a 3 %) debido a su rápida descomposición.

La edafología es una ciencia joven cuyo nombre viene del griego “edaphos” que significa superficie de la tierra. Estudia el suelo desde todos los puntos de vista: su morfología, su composición, sus propiedades, su formación y evolución, su taxonomía, su distribución, su utilidad, su recuperación y su conservación. También comprende el estudio de las aptitudes de los suelos para la explotación agraria o forestal. La edafología es fundamental para la conservación del medio ambiente natural.

Cuando los edafólogos realizan un estudio de suelo, generalmente cavan un pozo en la tierra (calicata), y luego observan sus paredes. Las paredes del pozo revelan un patrón estratificado, formado por capas, cada una de las cuales se denomina horizonte, y al conjunto de capas presentes en las paredes del pozo, perfil del suelo. A pesar de que los suelos difieren mucho, casi todos consisten de dos o más capas horizontales, ubicadas una sobre otras. En el perfil de un suelo típico se reconocen tres horizontes principales: A, B y C.

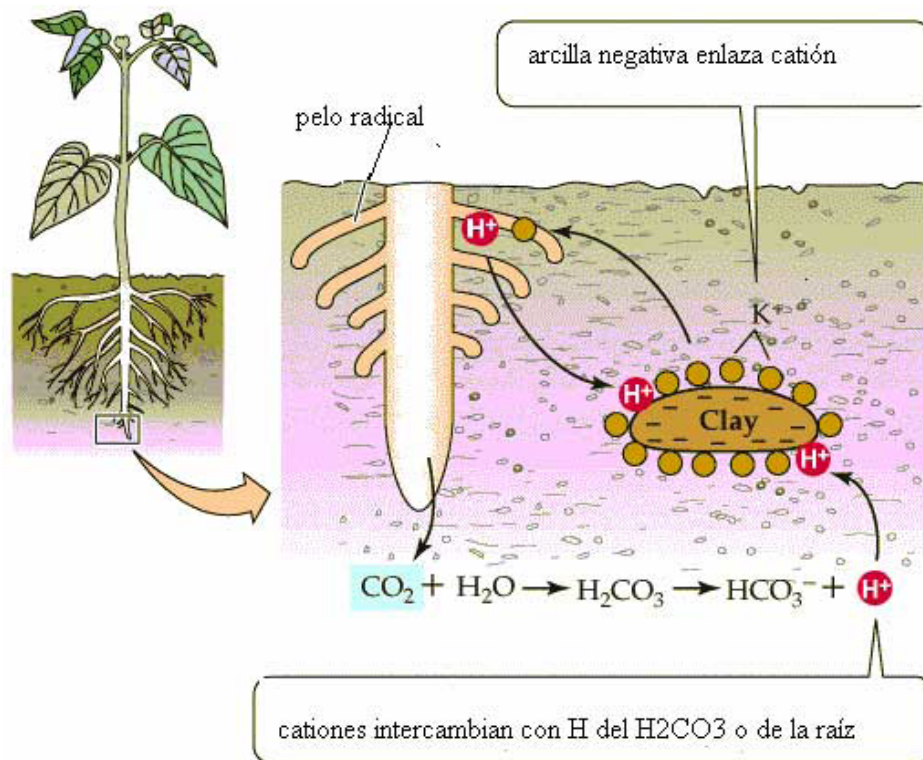
El horizonte superior o horizonte A, posee un mayor contenido de materia orgánica y tiene un color más oscuro que las capas inferiores. En este horizonte se desarrollan las raíces de las plantas y en él se encuentran presentes lombrices, insectos, nematodos y microorganismos. Por debajo del horizonte A, se encuentra el B o subsuelo, que es la zona de infiltración y acumulación de los minerales lixiviados desde arriba, su color es más claro que el horizonte A y contiene más arcilla. Más abajo está el horizonte C que es la roca madre original de la cual se deriva el suelo.



Los suelos se forman por desintegración de la roca madre, en parte por la erosión mecánica, que es provocada por cambios de temperatura, la lluvia, el hielo, el viento, el crecimiento de plantas como musgos líquenes y las raíces de las plantas. Sin embargo, los procesos químicos descomponen la roca madre por hidrólisis, hidratación, carbonatación y otros procesos acidificantes. El proceso clave es la formación de arcilla, como resultado de la erosión química.

Los suelos constituyen la fuente de nutrición de las plantas terrestres, la cual depende de la presencia de partículas de arcilla. Los cationes potasio (K^+), magnesio (Mg^{2+}) y calcio (Ca^{2+}) están cargados positivamente y son atraídos por las cargas negativas de las partículas de arcilla. Para que los cationes puedan ser absorbidos por las raíces de las plantas, debe ocurrir un intercambio catiónico, lo que se logra con protones (H^+) presentes en la solución del suelo producto de la ionización del ácido carbónico y del bombeado por las raíces. Los protones se unen entonces a las partículas de arcilla y se liberan los cationes (K^+), (Mg^{2+}) y (Ca^{2+}) a la solución del suelo quedando disponibles para la absorción por las raíces. Por

ejemplo de lo que ocurre con el catión potasio (K^+) y los protones (H^+), que provienen de las raíces o del ácido carbónico (H_2CO_3).



La fertilidad de un suelo está determinada por su capacidad para aportar nutrientes por intercambio iónico.

Funciones del suelo

De acuerdo con el documento de la Comisión de la Unión Europea "Hacia una estrategia temática para la protección del suelo" (COM 2002, 179), las principales funciones del mismo son las siguientes:

- El suelo es fuente de alimentos y producción de biomasa. La agricultura y la silvicultura dependen del suelo como soporte físico, así como para el suministro de agua y nutrientes.
- Capacidad reguladora del medio ambiental: el suelo intercepta las precipitaciones corriendo parte por superficie e infiltrándose otras, de éstas parte se almacena y otra parte pasa a aguas subterráneas (regulación física del agua); también regula residuos, contaminantes, etc. (regulación físico-química).
- Constituye uno de los principales factores para la protección del agua y de intercambio de gases con la atmósfera, debido a su capacidad de almacenamiento, filtración, amortiguación y transformación de elementos minerales, agua, materia orgánica y sustancias químicas.
- Constituye el hábitat de numerosos organismos que viven tanto en el suelo como sobre él, desempeñando funciones ecológicas esenciales.
- Como entorno físico, el suelo sirve de base a las actividades humanas y constituye un elemento del paisaje y del patrimonio cultural de la humanidad.
- Soporte físico para la ocupación humana.
- Es fuente de materias primas.

Características diferenciales del suelo

Algunas de las características que diferencian el suelo de otros recursos son las siguientes:

- El suelo es un recurso prácticamente no renovable, con una cinética de degradación relativamente rápida y, por el contrario, tasas de formación y regeneración extremadamente lentas.
- El suelo tiene una gran capacidad de almacenaje y amortiguación, debida en gran parte a su contenido en materia orgánica. Dicha capacidad está relacionada tanto con el agua, los minerales y los gases como con un gran número de sustancias químicas que pueden acumularse en el suelo. Cuando se superan los umbrales de irreversibilidad de almacenaje y amortiguación de estas sustancias en el suelo, se produce la liberación y distribución de las mismas en otros medios.
- El suelo es un medio vivo con gran biodiversidad. La actividad biológica contribuye a determinar la estructura y fertilidad del suelo y resulta fundamental para que pueda realizar algunas de sus funciones.
- A diferencia del aire y el agua, el suelo es un recurso que está generalmente sujeto a derechos de propiedad.
- El suelo es el resultado de la mezcla de materia orgánica, partículas minerales y aire en porciones variables.
- No es un medio inerte que sólo refleja la composición de la roca madre, sino que nace y evoluciona bajo la acción de los factores activos del medio, el clima y la vegetación.
- La acción biológica es realizada por los organismos que viven en el suelo, principalmente: Bacterias, Hongos y Gusanos.
- El material de origen del suelo presenta una gran variedad de posibilidades: mineralógicas, de textura, grado de consolidación, tamaño de partículas

EL PROBLEMA DE LA CONTAMINACIÓN

El suelo también sufre la contaminación por residuos de pesticidas y otros productos agroquímicos, como los herbicidas y los fertilizantes. Algunos de ellos permanecen en el suelo, y desde allí se integran a las cadenas alimenticias, aumentando su concentración a medida que avanzan de nivel trófico.

Se llama espacio contaminado al terreno limitado de extensión que contiene componentes tóxicos y peligrosos.

En este contexto no se incluyen suelos con una contaminación difusa, por ejemplo, áreas agrícolas contaminadas por nutrientes y pesticidas.

La contaminación de suelos se da también por la mala eliminación y ausencia de tratamiento de basuras. Otro problema grave se presenta con los residuos industriales. El vertido ilegal de residuos industriales constituye un serio problema de contaminación del suelo.



Las principales causas de contaminación son naturales (endógenas) o bien de tipo antrópicas.

El suelo contaminado es aquél que ha superado su capacidad amortiguadora, como consecuencia pasa de actuar como un sistema protector a ser causa de problemas para el H₂O, la atmósfera y/o los organismos. Además se modifican sus equilibrios bioquímicos y aparecen cantidades anómalas de componentes que causan cambios en sus propiedades físicas, químicas y/o biológicas. La introducción de agentes contaminantes en el suelo por encima de determinados niveles puede originar consecuencias negativas en la cadena alimentaria y por tanto en la salud humana, los ecosistemas y los recursos naturales.

La evaluación de sus efectos requiere considerar no sólo su concentración, sino también su comportamiento ambiental y los mecanismos de exposición.

Existen una serie de productos químicos, como los **abonos sintéticos, herbicidas e insecticidas**, que son sumamente útiles para la agricultura, pero que cuando se usan en forma inadecuada (abuso) producen alteraciones en el suelo y bajan la producción. En algunos casos, el problema aparece mucho después, cuando los contaminantes se difundieron hasta la superficie, a los ríos o a la napa freática o los mantos acuíferos. Los abonos sintéticos (urea, nitratos, fosfatos, cloruros, etc.) deben ser usados con moderación y cálculo, pues su abuso intoxica y mata la fauna (lombrices, insectos, ácaros) y flora (hongos, bacterias) del suelo. Con el agua los abonos llegan a los ríos, a los lagos y al mar, afectando a plantas y animales acuáticos. Por eso es mejor usar abonos orgánicos como el guano de isla, humus, abonos verdes, estiércol de animales, etc.

Los **pesticidas o plaguicidas** son compuestos químicos utilizados para controlar plagas (insectos, hongos, bacterias, roedores, malezas, algas). Los más comunes son los insecticidas (matan insectos), herbicidas (matan malezas), fungicidas (matan hongos), rodenticidas (matan roedores), molusquicidas (matan caracoles y babosas) y alguicidas (matan algas), entre otros.

Se pueden clasificar en:

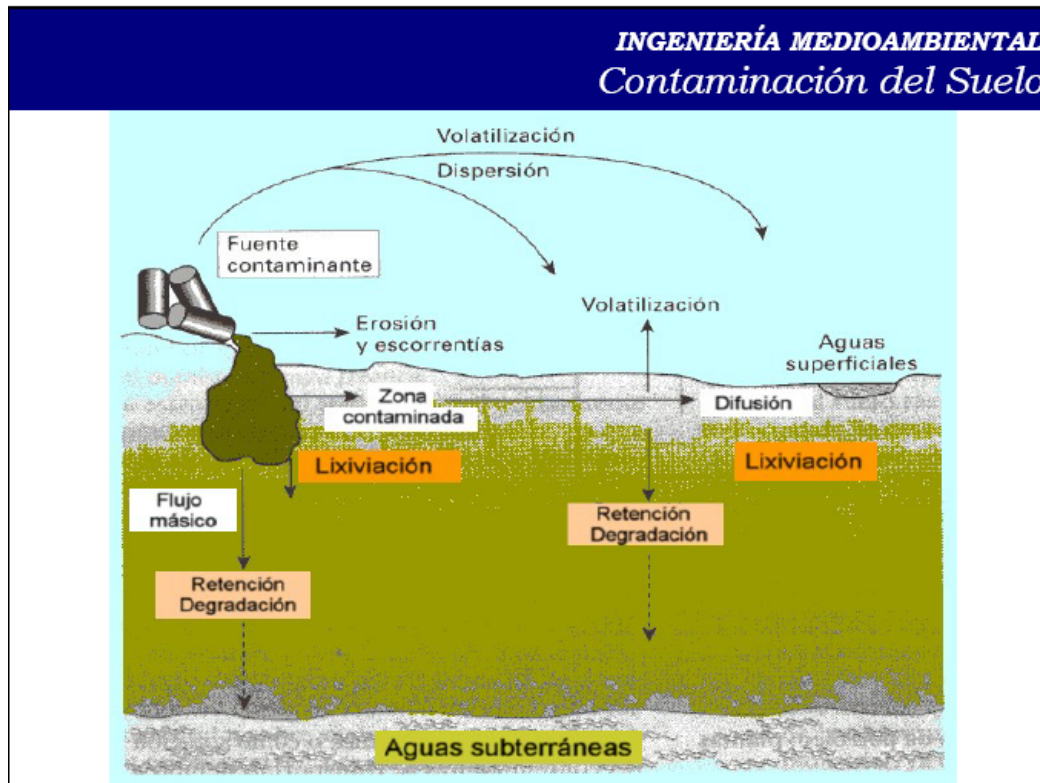
- **Hidrocarburos clorados:** son compuestos químicos sintéticos, derivados de hidrocarburos (petróleo, gas), que tienen características tóxicas. Una de dichas características es su gran persistencia o longevidad, es decir que no se descomponen o lo hacen muy lentamente, permaneciendo mucho tiempo en el ambiente. Entre ellos están: DDT, Aldrín, Dieldrín, Endrín, Heptacloro, Hexaclorobenceno, Mirex y Clordano. Por su longevidad son muy dañinos y se concentran en las cadenas alimentarias.
- **Organofosforados:** compuestos químicos muy variados, con efecto primario y rápido sobre el sistema nervioso. Son de vida muy corta, por lo que no tienen efecto residual.
- **Organoclorados:** contienen cloro en su estructura y tienen efecto residual.
- **Carbamatos:** insecticidas selectivos de rápida degradación ambiental. Actúan sobre el sistema nervioso.
- **Naturales:** obtenidos en base a plantas, como los piretroides del piretro y la nicotina del tabaco.

Concluyendo, los principales efectos de los abonos sintéticos y de los plaguicidas en general, y especialmente de los de larga vida, son los siguientes:

- Los abonos sintéticos, usados en forma exagerada, matan a los organismos útiles del suelo (lombrices, insectos, ácaros, bacterias, hongos, etc.) y, al llegar al

agua, producen eutrofización, o sea, un crecimiento exagerado de las plantas acuáticas.

- Los plaguicidas de larga vida se concentran en las cadenas alimentarias y causan toxicidad para el ser humano (cáncer, mutaciones genéticas, aborto, etc.), matan especies útiles y alteran el equilibrio natural.



Contaminantes de los suelos

Entre los múltiples elementos y compuestos que conforman un suelo natural, se encuentran sustancias que por sus características pudieran considerarse contaminantes pero que excepcionalmente se encuentran en el suelo, en niveles traza.

Se entiende por suelo contaminado una porción delimitada de terreno (superficial o subterráneo) cuyas cualidades originales han sido modificadas por la acción humana al incorporarse algún factor que según la clasificación de agentes contaminantes podría ser:

1. **Contaminación física:** Con variaciones en parámetros como temperatura y radiactividad.
2. **Contaminación biológica:** Al incluir putrefacción de especies o cepos patógenos.
3. **Contaminación química:** Por la adición de elementos o compuestos en concentraciones que alteran la composición originaria del suelo.

El criterio para establecer el umbral máximo de concentración de posibles agentes contaminantes de los suelos debe ser su capacidad para degradar la calidad del mismo al perder características originales generándose por tanto un riesgo o daño al medio ambiente.

La variedad y cantidad de productos contaminantes de un suelo es prácticamente inabarcable por lo que solo recogemos aquí los grupos más característicos y peligrosos de contaminantes químicos:

- **Metales Pesados:** La presencia natural de metales en el suelo es en cantidad de traza. El riesgo se produce cuando se acumulan en grandes cantidades.
- **Contaminantes Inorgánicos:** Los contaminantes inorgánicos están presentes en el suelo de forma natural pero en concentraciones reguladas por los ciclos biológicos asociados a cada suelo. La sobresaturación de alguno de ellos hace que se alcancen concentraciones considerables como contaminantes alterando así los ciclos de regulación.
- **Contaminantes Orgánicos:** Constituyen un grupo formado por un elevadísimo número de sustancias que en su gran mayoría están producidas por el hombre. Estas sustancias tienen diferentes efectos en el medio siendo muchas de ellas altamente tóxicas.

Los residuos como agentes contaminantes de los suelos

La proximidad física del suelo hace que este sea el lugar al que con más probabilidad vayan a parar residuos originados por la actividad del hombre. Estos son rápidamente incorporados al suelo a través de procesos degradativos.

En un principio eran fácilmente metabolizados y asimilados por la naturaleza pero a medida que la sociedad fue creciendo industrialmente y demográficamente, los residuos generados son cada vez más y más peligrosos.

La época actual esta muy marcado por la sociedad de consumo pero además existe otro agravante y es la cantidad diaria que en el planeta se genera de todo tipo de residuos que aunque puedan ser degradados de forma natural, el tiempo que para ello se necesitará es tan elevado que son focos potenciales de contaminación.

Las consecuencias de este aumento de residuos son por una parte la disminución de las materias primas y por otra los serios problemas ambientales que origina su abandono incontrolado. Esto nos lleva a la conclusión de que se produce una dispersión de los contaminantes y por lo tanto una magnificación del problema.

Clasificación de los Residuos

Los residuos industriales son los contaminantes principales de los suelos y se pueden clasificar del siguiente modo:

- **Residuos Inertes:** No representan riesgo alguno para el medio ambiente. Son desechos de características abrasivas que no necesitan tratamiento alguno para su disposición en el medio ambiente.
- **Residuos domésticos o asimilables:** Son los residuos fermentables y combustibles obtenidos en las distintas actividades desarrolladas en las ciudades. La solución mas adecuada es su recolección, tratamiento y disposición tal cual se desarrolla para los residuos domésticos.
- **Residuos Especiales:** Estos suponen un grave riesgo para la salud humana y el medio ambiente; requieren por lo tanto un tratamiento especial. Entre estos residuos especiales, distinguimos los residuos tóxicos y peligrosos de los residuos radiactivos.
 - ✓ *Residuos Tóxicos Peligrosos:* Son aquellos materiales que siendo el resultado de un proceso de producción o transformación, su productor destina al descarte. En su composición contienen sustancias o materiales constituyentes en una concentración que da un carácter de peligrosidad. Su peligrosidad se determina según: a) se encuentre listado como especial

o peligroso; b) contenga sustancias tóxicas, c) al someterse al test de peligrosidad, no supere alguno de ellos.

- ✓ *Residuos Radiactivos*: Son materiales de desecho que contienen o están contaminados con nucleoides inestables. Esta propiedad que presentan los núcleos de algunas especies atómicas consiste en una desintegración espontánea de los mismos, con emisión de partículas y radiaciones electromagnéticas.

Clasificación de la Contaminación de los Suelos

Las formas de contaminación de un suelo con origen antropogénico común, se pueden clasificar de diferentes modos (no excluyentes entre sí):

- **Superficial**: Deriva de una acumulación de residuos vertidos accidental o voluntariamente en el terreno.
- **Subterránea**: Se corresponde con el caso de enterramiento de residuos. Su localización es realmente compleja, teniendo como único indicio aparente el cambio en la textura superficial del terreno.
- **Vertido alevoso**: Es a menudo coincidente con los subterráneos, derivados de la ilegalidad de dicho vertido. Es una de las formas de contaminación más peligrosas dada la presencia de sustancias tóxicas y peligrosas y del desconocimiento del foco contaminante.
- **Vertido no alevoso**: Son aquellos en los que el origen de la contaminación es fortuita o por negligencias en la gestión de los contaminantes. Son los casos de fugas de depósitos, accidentes en los que se produce la liberación al medio de sustancias tóxicas.
- **Contaminación difusa**: Es en la que no existe un foco concreto de contaminación del suelo sino que se manifiesta de forma extensiva. Normalmente son contaminaciones de escasa concentración pero de grandes volúmenes absolutos.
- **Contaminación puntual**: Es una contaminación localizada con un núcleo emisor desde el que pueden mobilizarse los contaminantes a otros elementos del medio (atmósfera, aguas superficiales y subterráneas). Estos son pro ejemplo: áreas industriales, rellenos sanitarios, accidentes ocasionales

Efectos de la contaminación de los suelos

Dada la facilidad de transmisión de contaminantes del suelo a otros medios como el agua o la atmósfera, serán estos factores los que generen efectos nocivos, aun siendo el suelo el responsable indirecto del daño.

La presencia de contaminantes en un suelo supone la existencia de potenciales efectos nocivos para el hombre, la fauna en general y la vegetación. Estos efectos tóxicos dependerán de las características toxicológicas de cada contaminante y de la concentración del mismo.

De forma general, la presencia de contaminantes en el suelo se refleja de forma directa sobre la vegetación induciendo su degradación, la reducción del número de especies presentes en ese suelo, y más frecuentemente la acumulación de contaminantes en las plantas, sin generar daños notables en estas. En el hombre, los efectos se restringen a la ingestión y contacto dérmico, que en algunos casos a desembocado en intoxicaciones por metales pesados y más fácilmente por compuestos orgánicos volátiles o semivolátiles.

Indirectamente, a través de la cadena trófica, la incidencia de un suelo contaminado puede ser más relevante. Absorbidos y acumulados por la vegetación, los contaminantes del suelo pasan a la fauna en dosis muy superiores a las que podrían hacerlo por ingestión de tierra. Cuando estas sustancias son bioacumulables el riesgo se amplifica al incrementarse las concentraciones de contaminantes a medida que ascendemos en la cadena trófica, en cuya cima se encuentra el hombre.

Las **precipitaciones ácidas** sobre determinados suelos originan, gracias a la capacidad intercambiadora del medio edáfico, la liberación del ión aluminio, desplazándose hasta ser absorbido en exceso por las raíces de las plantas, afectando su normal desarrollo.

En otros casos, se produce una disminución de la presencia de las sustancias químicas en el estado favorables para la asimilación por las plantas. Así pues, al modificarse el pH del suelo, pasando de básico a ácido, el ión manganeso que está disuelto en el medio acuoso del suelo se oxida, volviéndose insoluble e inmovilizándose.

A este hecho hay que añadir que cuando el pH es bajo las partículas coloidales como los óxidos de hierro, titanio, cinc, etc., que pueden estar presentes en el medio hídrico, favorecen la oxidación del ión manganeso.

Esta oxidación se favorece aun más en suelos acidificados bajo la incidencia de la luz solar en las capas superficiales de los mismos, produciéndose una actividad fotoquímica de las partículas coloidales anteriormente citadas, ya que tienen propiedades semiconductoras.

Otro proceso es el de la **biometilización**, que es un proceso por el cual reaccionan los iones metálicos y determinadas sustancias orgánicas naturales, cambiando radicalmente las propiedades físico-químicas del metal. Es el principal mecanismo de movilización natural de los cationes de metales pesados.

Los metales que ofrecen más afinidad para este proceso son: mercurio, plomo, arsénico y cromo.

Los compuestos metálicos así formados suelen ser muy liposolubles y salvo casos muy puntuales, las consecuencias de la biometilización natural son irrelevantes, pero cuando los metales son añadidos externamente en forma de vertidos incontrolados, se convierten realmente en un problema.

Aparte de los anteriores efectos comentados de forma general, hay otros efectos inducidos por un suelo contaminado:

- **Degradación paisajística:** la presencia de vertidos y acumulación de residuos en lugares no acondicionados, generan una pérdida de calidad del paisaje, a la que se añadiría en los casos más graves el deterioro de la vegetación, el abandono de la actividad agropecuaria y la desaparición de la fauna.
- **Pérdida de valor del suelo:** económicamente, y sin considerar los costes de la recuperación de un suelo, la presencia de contaminantes en un área supone la desvalorización de la misma, derivada de las restricciones de usos que se impongan a este suelo, y por tanto, una pérdida económica para sus propietarios.

Control de la contaminación de los suelos – TRATAMIENTO

Se puede definir el tratamiento y recuperación de suelos contaminados como un conjunto de operaciones que se deben realizar con el objetivo de controlar, disminuir o eliminar los contaminantes y sus efectos.

Una de las posibles divisiones de los sistemas de tratamiento se establece en función de tres categorías de actuación:

1. No recuperación
 2. Contención o aislamiento de la contaminación.
 3. Recuperación.
- **No Recuperación:** Cuando se opta por la medida de no recuperación del espacio, se debe tener en cuenta que se parte de un espacio contaminado, por tanto se tiene que registrar la localización real del espacio. Esta sencilla solución evita una gama de problemas importantes que se generarían posteriormente por un uso del suelo para el que ya no es adecuado (agricultura, residencial, espacios de ocio).
 - **Contención o Aislamiento de la Contaminación:** Consiste en establecer medidas correctas de seguridad que puedan controlar la situación presente, impidiendo la progresión de la contaminación en el medio y mitigando riesgos relacionados con esta dispersión de contaminantes.
 - **Recuperación:** La elaboración de un plan de saneamiento precisa una cierta delimitación del resultado mínimo a alcanzar. Se dividen en dos tipos de tratamiento y/o recuperación de suelos:
 - ✓ Tratamientos IN SITU, que implican la eliminación de los contaminantes sobre el propio terreno, sin remoción del mismo.
 - ✓ Tratamientos EX SITU, en los que se produce la movilización y traslado del suelo a instalaciones de tratamiento o confinación.

Técnicas de Tratamiento In Situ

El tratamiento de un suelo contaminado sin necesidad de modificar su situación presenta múltiples ventajas. Lógicamente, el impacto ambiental inducido es bajo, pues el tratamiento solo implica la instalación del equipo adecuado, los costes económicos suelen ser muy competitivos y en principio son métodos fácilmente aplicables a diversas situaciones. Los inconvenientes se centran en la incertidumbre sobre los resultados reales.

- **Biodegradación in situ:** Persigue la transformación de sustancias potencialmente peligrosas en productos inocuos por activación de los procesos biológicos naturales o mediante microorganismos específicos para cada contaminante. Las dificultades estriban en:
 - ✓ Adaptar especies no nativas
 - ✓ Insuficiente nivel de oxígeno disuelto (incrementable mediante bombeo).
 - ✓ Humedad y permeabilidad del suelo suficientes para permitir la movilidad de los microorganismos.
 - ✓ Temperatura.
 - ✓ Déficits de nutrientes (adicionables en caso de deficiencias).
 - ✓ pH del suelo (>5,5).
 - ✓ Factores de inhibición del crecimiento.
 - ✓ Productos secundarios de la biodegradación.

- **Vitrificación:** La vitrificación es un proceso donde el suelo y los contaminantes se funden en una matriz vítrea mediante la creación de un campo eléctrico entre dos electrodos enterrados. La resistencia del terreno al paso de la corriente genera temperaturas suficientes para fundir el suelo.

Los componentes no volátiles se integran en la matriz vítrea, mientras que los constituyentes orgánicos son destruidos en un proceso parecido a la pirólisis. Los gases que evaporan pueden ser recogidos en una campana instalada en la superficie del terreno.

El proceso se favorece con bajos contenidos de humedad, pudiendo utilizarse en suelos saturados, pero con un alto coste, siendo necesaria una disponibilidad de electricidad suficientemente alta y un equipo técnico adecuado.

• **Degradación química:** Consiste en la adición de una sustancia química para inducir la degradación química. Existen tres tipos de degradación:

- ✓ Oxidación mediante aireación o adición de agentes oxidantes.
- ✓ Reducción por adición de agentes reductores.
- ✓ Polimerización de ciertas sustancias orgánicas mediante la adición de hierro y sulfatos.

Los factores que controlan la eficacia del sistema son: el tipo de contaminante, las características del suelo (permeabilidad para la inyección de aditivo, arenas o materiales no finos para facilitar su mezclado en situ, la presencia de obstáculos subterráneos que impidan el mezclado superficial, profundidad de la contaminación del suelo y la posible generación de contaminantes más tóxicos que los originales (oxidación de mercurio, cromo).

• **Estabilización / solidificación:** Consiste en mezclar el suelo contaminado con un medio de fijación conformando una masa endurecida y poco permeable en la que se inmovilizan los contaminantes. Puede realizarse in situ o en suelos extraídos.

Los factores que controlan la eficacia de estos tratamientos son: el tipo de suelo y distribución del tamaño de las partículas, el alto contenido en materia orgánica, aceites y grasas en cantidades superiores al 1%, el uso potencial de materiales estabilizantes/solidificantes, la aceptación legislativa, el impacto generable a largo plazo, así como la presencia de cromo, mercurio, plomo, plata u otras sustancias transformables por oxidación en formas más tóxicas y/o móviles.

• **Lavado del suelo:** Consiste en la adición de agua, por inyección superficial o subsuperficial con un aditivo químico que favorezca la disolubilidad de los contaminantes movilizándose éstos en el medio de extracción. El líquido resultante es recogido mediante sistemas de drenajes o por pozos de bombeo, pudiendo en algunos casos recuperarse los aditivos empleados.

La eficacia estará determinada por la presencia de otros contaminantes no considerados, de la variabilidad de las concentraciones en el espacio y del conocimiento de la dinámica de flujo de la mezcla de lavado.

• **Aireación del suelo:** Este es un método de extracción basado en el movimiento de los vapores a través del suelo mediante una diferencia de presión generada por bombeo de aire desde el exterior que tras circular a través del espacio contaminado, es evacuado por el pozo de extracción para su liberación o tratamiento.

Los factores clave a considerar en la aplicación de esta técnica son las propiedades físico-químicas del contaminante, las características del suelo y las condiciones particulares del lugar de vertido. Se trata de una técnica de muy amplias posibilidades dadas sus características de facilidad de instalación y operación, bajos costes y mínimo impacto.

Técnicas de Tratamiento Ex Situ

Entre las ventajas de estas técnicas destaca su efectividad, en cuanto que el suelo contaminado es físicamente eliminado y se optimiza el proceso de tratamiento al

homogeneizarse el suelo tras su excavación. Además, se puede controlar el proceso y la bondad del tratamiento por sus resultados y actuar con independencia de factores externos (clima, hidrología,...).

Sin embargo, se plantean también inconvenientes, especialmente de tipo económico que limita la posibilidad de tratamiento de grandes volúmenes de suelo.

Son métodos más experimentados que los in situ aunque todavía sujetos a un continuo proceso de desarrollo y mejora de resultados.

- **Tratamiento químicos:** Consisten en tratamientos similares a los explicados en el apartado de degradación in situ, pero que en este caso presentan mejores eficiencias de tratamiento al homogeneizarse el suelo con el reactivo controlándose el proceso.

- **Degradación biológica (compostaje):** Este sistema de tratamiento persigue la transformación de contaminantes altamente tóxicos en sustancias asimilables por la naturaleza mediante procesos metabólicos de microorganismos específicos para los diferentes tipos de contaminación.

El suelo contaminado se extiende en capas finas para optimizar la admisión de oxígeno (landfarming), o se emplean sistemas más sofisticados que implican un control de parámetros como humedad, temperatura y contenido de oxígeno (compostaje).

Para la efectiva metabolización de los contaminantes se requiere que estos sean susceptibles de su biodegradados, aerobia o anaeróbicamente y unas instalaciones que posibiliten controlar las condiciones del suelo (contenido en humedad, permeabilidad, temperatura, nutrientes, pH,...), obteniéndose buenos resultados con suelos arenosos, arcillosos y turbosos. Debe existir un control y medidas de seguridad para evitar una potencial migración de los contaminantes hacia aguas subterráneas y una posible emisión aérea.

- **Destrucción térmica:** La destrucción térmica o incineración consiste en someter al suelo contaminado a altas temperaturas para que los contaminantes se evaporen y sean destruidos por combustión en un postquemador.

El método requiere la depuración de los gases y el depósito de los productos sólidos residuales. Este sistema es aplicable para muchos contaminantes como aceites y petróleo, por ejemplo, disolventes clorados y no clorados, hidrocarburos aromáticos polinucleares y cianuros.

- **Extracción o lavado del suelo:** Es un sistema de tratamiento en el que se trasladan los contaminantes del suelo a un líquido, movilizándose así los contaminantes absorbidos en las partículas de suelo. Los factores a considerar para la utilización de este sistema de tratamiento son: las características de los contaminantes, las características del suelo, la cantidad de suelo a tratar, las variaciones en la concentración del contaminante, el uso previsto para el suelo tratado y el tratamiento y la eliminación de las aguas residuales.

- **Relleno de seguridad:** Supone el confinamiento de los residuos en un ambiente modulo seguro, previsto de algún tipo de sistema de impermeabilización y de sistemas de recolección de lixiviados y escorrentías superficiales. Este tratamiento consiste en la consideración del suelo contaminado como un residuo tóxico y peligroso con destino en vertedero de seguridad. Las condiciones de tratamiento serán: tipo de contaminante (problemas con sustancias reactivas, corrosivas, etc., que cambian a lo largo del tiempo) disponibilidad de emplazamiento adecuado, diseño del sistema de impermeabilización y aceptación pública y administrativa.

2 - Energía Geotérmica

Introducción

La Tierra almacena en forma de calor gran cantidad de energía. Diferentes hipótesis sobre el origen y posterior evolución del planeta, tratan de explicar a que se deben estas altas temperaturas existentes.

Las explicaciones más convincentes atribuyen a la acción combinada de varios fenómenos naturales, entre los que adquieren especial importancia los efectos residuales de la materia incandescente que constituyó las etapas iniciales, y la contribución calórica proveniente de la desintegración de elementos radiactivos de vida prolongada.

El uso más antiguo de los recursos geotérmicos son las aguas termales. La explotación comercial de la geotermia comenzó a finales del siglo XIX en Italia, con la producción de electricidad.

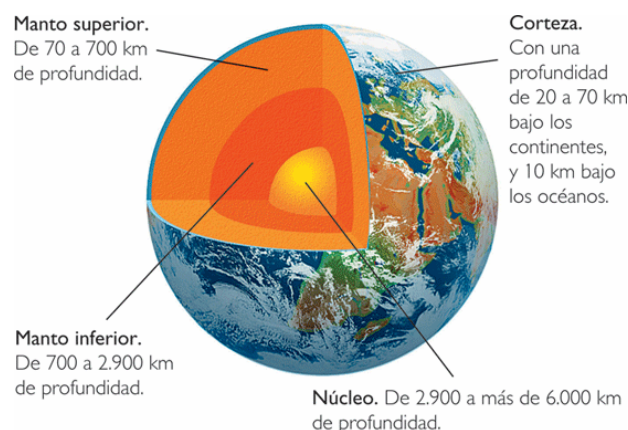
Definición

Se entiende por energía geotérmica a aquella que, aprovechando el calor que se puede extraer de la corteza terrestre, se transforma en energía eléctrica o en calor para uso humano o procesos industriales o agrícolas.

Estructura interna de la tierra

En forma esquemática y simple, se puede considerar que la tierra está conformada por tres capas concéntricas, desde la superficie hasta su centro, ubicado a una profundidad de 6.357,78 km. Estas tres capas son:

La superficial denominada CORTEZA TERRESTRE, está constituida por rocas en estado sólido y que podemos observar en forma directa. Su espesor rara vez supera los 70 km.



La segunda capa, denominada MANTO, se halla inmediatamente debajo de la anterior. Los materiales que la constituyen tienen una composición mineralógica completamente distinta de las de las rocas de la parte superficial, y una densidad bastante mayor.

Debido a las altas temperaturas existentes a esas profundidades y a la naturaleza de su constitución, esos materiales se hallan en estado semifundido, otorgándole al manto un comportamiento dinámico semejante al de una masa plástica.

Si bien no se puede comprobar visualmente, estudios geofísicos permiten suponer que las características observadas en la parte superior del manto se acentúan gradualmente hasta la profundidad de 2.900 Km.

A partir de allí nos internamos en la tercera capa denominada NÚCLEO caracterizada porque los componentes minerales que la constituyen poseen una densidad muy superior a las de las capas anteriores.

El calor que sube a la superficie

El calor contenido en los materiales que componen el NÚCLEO y el MANTO se transmite paulatinamente a la CORTEZA generando un flujo ascendente de calor que luego de atravesarla y alcanzar la superficie terrestre se disipa en la atmósfera.

Este proceso se puede corroborar cada vez que se efectúa una perforación, aunque sea de relativa poca profundidad. Las temperaturas que se registran son siempre mayores en los niveles más profundos. Es conveniente aclarar, para evitar confusiones, que en los casos en que la perforación es muy superficial (y también en los primeros tramos de otras más profundas) el efecto mencionado no es observable por la presencia de aguas infiltradas circulantes que enmascaran el proceso térmico. Si esas aguas se conservaran más tiempo y no recibieran un constante aporte, alcanzarían la temperatura correcta.

Por regla general, en el sector más superficial de la corteza, la temperatura aumenta en un valor promedio de 3 grados centígrados por cada 100 metros de profundidad. Esta variación se conoce como “gradiente geotérmico”. Cuando los valores de ese gradiente se encuentran entre 2 y 5°C cada 100 metros se consideran normales. Cuando los valores exceden los 5°C cada 100 m, habrá a 1.500 metros una temperatura de 180°C aproximadamente.

En la parte inferior de la Corteza Terrestre, más precisamente en el sector del contacto Corteza / Manto, existen algunas zonas que en razón de su particular configuración geológica, permiten que el flujo de calor ascendente que atraviesa la corteza y llega a la superficie, sea bastante más intenso que en la mayor parte de las áreas restantes.

Consecuentemente, en esas regiones los gradientes geométricos registran valores muy elevados, lo cual significa que a igual profundidad, las temperaturas son allí mayores que en las zonas gradientes normales.

Estas áreas “calientes” están preferentemente situadas en los fondos oceánicos, en los cuales el espesor de la corteza disminuye sensiblemente y posibilita el ascenso de calor del Manto y, en ocasiones, el del material fundido en forma de erupciones submarinas de lava. También constituyen regiones calientes de importancia, las cercanas a los cordones montañosos jóvenes, casi siempre coincidentes con bordes continentales de gran actividad volcánica y sísmica.

Presencia de agua caliente o vapor en el suelo

Es sabido que una parte del agua que se escurre por la superficie de la tierra (producto de lluvia, de deshielo, de cursos de agua, etc.) se infiltra en el terreno y, a través de grietas y fracturas puede alcanzar profundidades de varios cientos o hasta miles de metros.

Al encontrar en profundidad lechos de rocas suficientemente porosas, el agua circula a través de los poros de dichas rocas. Esos estratos por los cuales circula agua se conocen como “acuíferos”. Por un principio físico elemental, el agua que llena los

poros de ese estrato tiende a igualar su temperatura con la de la roca que la contiene.

Por lo tanto, de acuerdo con el ejemplo anterior, si el acuífero se encuentra en una zona con un gradiente de 12°C cada 100 m y a una profundidad de 1.500 m, deberá contener agua a una temperatura cercana a los 180°C.

Por otra parte, las rocas que conforman la corteza presentan frecuentemente grietas y fisuras. Si la masa acuosa que viene circulando por un acuífero se encuentra con una zona de grietas y fisuras, el agua puede alcanzar la superficie del terreno, produciéndose entonces un manantial o vertiente.

Si casualmente este hecho ocurriera en una zona donde el gradiente geotérmico es suficientemente anómalo como para que el agua del acuífero alcance una temperatura adecuadamente alta, estaremos en presencia de lo que se denomina en forma genérica “una manifestación hidrotermal”.



Manifestaciones Hidrotermales

Este tipo de fenómenos tienen características singulares que las diferencian sensiblemente de los afloramientos de agua comunes. Por estar siempre asociados con las fases póstumas de los procesos volcánicos, además la temperatura que acusa el fluido, están también acompañados por la presencia de gases, principalmente carbónicos y sulfurosos, produciendo este último un olor fétido sumamente desagradable.

De acuerdo a las características que presentan estas manifestaciones reciben diferentes nombres, siendo las más comunes:

- **Fumarolas:** Nombre genérico dado a la emisión de gases y vapores a temperaturas muy elevadas, en ocasiones pueden alcanzar los 500°C. Se las suele diferenciar en base a su composición química en carbonatadas, sulfurosas, clorhídricas, etc.
- **Solfataras:** Conforman una variación de las anteriores que se diferencia por su mayor riqueza en vapor de agua, temperatura sensiblemente menor (inferior a 200°C) y por eyectar chorros intermitentes de vapor de agua, hidrógeno sulfurado, gas carbónico y otros gases.

Estas dos formas de manifestaciones pueden ser surgentes o fluir suavemente, dependiendo de la presión existente dentro del acuífero de donde provienen.

- **Géiseres:** Consisten en verdaderos surtidores de una mezcla de agua y vapor (a temperaturas entre 70 y 100°C), con una gran cantidad de sales disueltas y en suspensión.

Es interesante el funcionamiento de estos últimos. La mezcla no tiene por sí suficiente presión como para alcanzar en forma continua la superficie del terreno. Debido a la gran cantidad de sales que lleva disueltas, éstas precipitan y solidifican en la parte cercana al orificio de salida, conformando una especie de “tapa”. Esta situación provoca una acumulación de presión que finalmente vence la dureza de la cubierta, produciendo que surja de un chorro de agua y vapor que desaparece al volver a perder vigor.

El proceso tiene como especial particularidad la exactitud en los tiempos de duración del ciclo entre una erupción y otra. Este período puede ser de minutos, horas, días o meses, según cada caso, y en algunos de ellos conforman una atracción turística

por la espectacularidad que desarrollan. Son célebres los géiseres de Islandia y los del Parque de Yellowstone, en EEUU.

El uso más antiguo de los recursos geotérmicos, más precisamente de las aguas termales, tiene que ver con sus propiedades curativas (griegos, romanos, babilonios, etc.) Son famosas las termas de Vichy en Francia, Carlsbad en Checoslovaquia, Carcalla en Italia. En nuestro país existen muchas localidades con aguas termales y algunas de ellas son utilizadas desde el punto de vista turístico y curativo. Son famosas las de Copahue en Neuquén, Río Hondo en Santiago del Estero, Reyes en Jujuy, Villavicencio en Mendoza, Rosario de la Frontera en Salta, etc.

También son aprovechables desde el punto de vista minero, recuperándose mediante diversos procesos las sales que contienen disueltas y que en algunos casos son de alto valor comercial, como por ejemplo sales de Boro, Litio, Cadmio. No obstante, el aprovechamiento más importante de los recursos hidrotermales consiste en su utilización con fines energéticos.

Extracción del calor

Además de las perforaciones de exploración, la explotación de un yacimiento geotérmico, al igual que uno petrolero, requiere de un cierto número de pozos de producción que, llegando hasta el acuífero, también denominado “reservorio”, permitan que el agua caliente o vapor suban a la superficie. Es muy importante tener en cuenta que la explotación de un yacimiento geotérmico debe efectuarse de manera tal que el volumen de agua caliente o vapor que de él se extrae, no sea mayor que la recarga natural de agua que alimenta al acuífero. Sólo bajo estas condiciones, el recurso energético puede ser considerado como una fuente de carácter “renovable”.

Existen dos formas básicas de uso de la energía de origen geotérmico:

- ✓ **USO DIRECTO DEL CALOR**, que se aplica para calefaccionar viviendas u otros tipos de edificios; para procesos industriales que utilizan calor, como por ejemplo las fábricas de celulosa, papel, conservas, harinas de pescado; para el secado de frutas y vegetales en general; para calefacción de invernaderos, establos y criaderos, para piscicultura, para calentamiento de suelos de cultivos en zonas frías, para derretir la nieve de los caminos. Para cada una de estas aplicaciones es necesaria que la temperatura del agua sea adecuada.

Entre los países que utilizan el calor geotérmico para procesos industriales, agrícolas y de ambientación se pueden mencionar Islandia, Rusia, Hungría, Nueva Zelanda y otros.

- ✓ **USO ELÉCTRICO DEL FLUIDO**. Consiste en la generación de electricidad mediante instalaciones similares a las usinas térmicas convencionales. La diferencia radica en el origen del vapor que mueve las turbinas que alimentan el generador eléctrico. En una usina térmica convencional el vapor “se fabrica” quemando derivados de petróleo, gas o carbón, mientras que en la usina o planta geotérmica no es necesario gastar combustible pues es provisto directamente por la naturaleza. Naturalmente este proceso no es tan simple como se menciona. En general el vapor viene mezclado con agua y ésta, a su vez, tiene disueltas sales. Será entonces necesario separar el vapor del agua para que pueda ser derivado a las turbinas.

VAPOR SATURADO	180°C	Evaporación de soluciones altamente concentradas Digestión de pulpa de papel Kraft	PRODUCCIÓN ELÉCTRICA
	170°C	Procesamiento de agua pesada Secado de tierras de diatomeas	
	160°C	Secado de madera Secado de harinas y productos similares	
	150°C	Producción de alumina (proceso Bayer) Secado de verduras de alta velocidad	
	140°C	Envasado de alimentos Refinación de azúcar	
	130°C	Extracción de sales por evaporación Agua potable por evaporación	
	120°C	Evaporación de efectos múltiples Potabilización de agua salada	
	110°C	Desecado de verduras y otros vegetales Secado y curado de cemento	
	100°C	Secado de pesacods, prod. de harinas Preparación de alimentos	
	90°C	Calentamiento ambiental Derretimiento de nieve en carreteras	
AGUA CALIENTE	80°C	Calefacción de establos y criaderos	
	70°C	Agua caliente sanitaria Invernaderos	
	60°C	Fermentación, biodegradación Calentamiento de suelos	
	50°C	Baños termales Cultivo de hongos	
	40°C	Calentamiento de suelos Tratamiento de aguas servidas	
	30°C	Piscinas Criaderos de peces	

Aprovechamientos de la Energía Geotérmica

La única manera que hasta el presente permite forma técnica y económicamente aceptable disponer del calor contenido en el interior de la tierra para su utilización como recurso energético, consiste en extraerlo del agua caliente o el vapor contenido en los acuíferos hidrotermales. Pero hallar una zona apta para ser explotada energéticamente requiere de un proceso exploratorio consistente en una sucesión de etapas en las que se conjugan estudios geológicos y geofísicos progresivamente crecientes en especificidad y complejidad, y consecuentemente en inversión.

La experiencia acumulada en el mundo ha demostrado que las dimensiones superficiales de un yacimiento geotérmico se hallan comprendidas entre 10 y 100 km². Si se tiene en cuenta que el proyecto de exploración se inicia sobre la totalidad de una zona, cuya extensión casi siempre sobrepasa los 15.000 km², la localización de posibles yacimientos requiere intercalar etapas intermedias.

La primera se denomina *de Reconocimiento* y consiste en la realización de estudios con métodos superficiales a efectos de detectar las áreas de mejores posibilidades para continuar la exploración. Normalmente se explora sobre áreas de más de 10.000 km².

La segunda etapa denominada *Prefactibilidad*, ya sobre superficies de entre 500 y 2.000 km², busca definir las características del yacimiento geotérmico para determinar la ubicación de los pozos de exploración.

Finalmente en la etapa de *Factibilidad* se verifica la posibilidad técnica y económica de aprovechamiento del yacimiento y se definen los posibles sistemas de explotación.

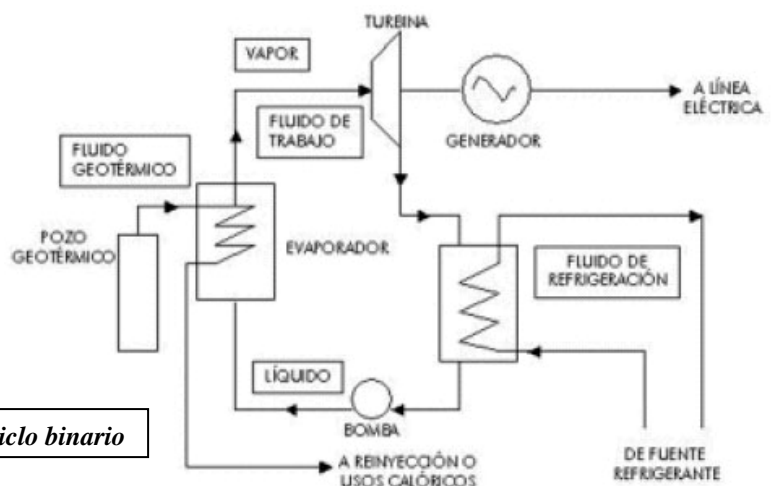
En la figura se ha puntualizado esquemáticamente, para cada una de las etapas del proceso de exploración, desarrollo y explotación geotérmica, los tipos de tareas fundamentales que se llevan a cabo y los objetivos que se persiguen.

ETAPAS DEL PROCESO DE EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA				
RECONOCIMIENTO	PREFACTIBILIDAD	FACTIBILIDAD	DESARROLLO	EXPLORACION
Sup > 10.000 km ²	Sup 550 a 2000 km ²	Sup 10 a 15 km ²		
ESTUDIOS O TAREAS A REALIZAR				
Geología Geoquímica Hidrología	Geología Geoquímica Hidrogeología Geofísica Pozos someros	Pozos exploratorios Estudios de reservorios	Pozos de explotación Sistema de conducción Diseño de la planta	Funcionamiento de la planta Control de campo
OBJETIVOS BUSCADOS				
Circunscribir las áreas con mejores posibilidades	Determinar el modelo geotérmico preliminar y seleccionar la ubicación de los pozos de exploración	Verificar las características del yacimiento y determinar la conveniencia técnica y económica de su explotación	Crear las condiciones para una correcta explotación del yacimiento	

Es importante no perder de vista que a medida que se avanza en el proceso, el monto de las inversiones va creciendo significativamente, por lo que se hace sumamente necesario evaluar detenidamente la conveniencia de llevar adelante una nueva etapa.

El primer intento para producir energía eléctrica se llevó a cabo en Larderello (Italia) en 1904, donde muchos años después se instaló una central geotérmica de gran potencia. Después de 1950, otros países como Nueva Zelanda, EEUU, México, Japón, URSS, Islandia, El Salvador, Filipinas, Nicaragua, Indonesia, Kenya, han procedido también a la instalación de sistemas que producen electricidad mediante el empleo de esta fuente energética.

Una tecnología que, aún cuando ha sido demostrado fehacientemente que funciona sin inconvenientes es poco utilizada, es la denominada de "ciclo binario". Consiste en una planta en la que el fluido geotérmico producido por los pozos vaporiza un "fluido de trabajo" (normalmente un producto de bajo punto de vaporización) que es el encargado de mover la turbina que arrastra el generador. El fluido secundario cumple un circuito cerrado.



Esquema de una planta de ciclo binario

Esta tecnología se aplica en los casos en que la temperatura del fluido geotérmico no es suficientemente alta como para producir vapor en forma natural. La razón primera por la que este sistema no alcanzó gran difusión estriba en que por las características técnicas y el equipamiento que requiere la energía producida resulta más cara que la del ciclo natural y en muchos casos no entra en competencia con otras fuentes energéticas.

No obstante ello, el progresivo encarecimiento de la energía producida por fuentes convencionales, a la que se suma el accionar de los grupos ambientalistas, están favoreciendo la instalación de plantas de ciclo binario para suplantar a las térmicas más sucias.

Energía Geotérmica en la Argentina

De acuerdo con los rasgos geológicos que distinguen el flanco occidental del continente sudamericano (grandes cadenas montañosas jóvenes en bordes continentales de intensa actividad volcánica y sísmica), es válido suponer que en la Argentina existe un interesante recurso geotérmico.

Partiendo de ese convencimiento, desde 1972 se programaron estudios de prospección con el propósito de tomar un buen conocimiento de la potencialidad existente en el país.

Inicialmente, motivados por la presencia de importantes manifestaciones hidrometales en la región de Copahue (provincia del Neuquén), se realizaron, en 1974-75, estudios conducentes a determinar la ubicación de un pozo exploratorio que alcanzó una profundidad de 954 metros sin evidenciar la presencia de fluido caliente, pero con un buen gradiente geotérmico.

Con el fin de obtener información de otras zonas del país se efectuaron algunos estudios de tipo expeditivo en Rosario de la Frontera (Salta), Farellón Negro (Catamarca) y en el territorio de la provincia de Jujuy contratándose, en este caso, una empresa extranjera especializada a la que se le incorporó personal nacional para su capacitación.

Los resultados que fueron arrojando estos estudios indicaron la necesidad de instrumentar un programa de exploración que en forma organizada permitiera realizar estudios sistemáticos en distintas zonas del país que por sus características geológicas resultaban de mayor interés.

Fue así que en 1979 se elaboró un Programa de Exploración Geotérmica en el que se individualizaron siete regiones, dentro de las cuales se circunscribieron quince zonas susceptibles de realizar estudios, once de las cuales resultaron objeto de reconocimientos.

Es importante aclarar que el principal objetivo que se perseguía a través de este programa era la obtención de una evaluación regional del recurso geotérmico, que permitiera visualizar las áreas que presentaban mejores posibilidades, tanto de alta como de baja temperatura, para poder definir a partir de allí una eventual política de desarrollo geotérmico.

Como resultado de las tareas realizadas se identificaron más de veinte áreas de probable interés. Los aprovechamientos efectuados hasta la fecha son muy pocos en comparación con las posibilidades técnicas que ofrece esta fuente de energía.

Desde el punto de vista de producción eléctrica, la única instalación que existe en el país se encuentra en el yacimiento de Copahue (Prov. del Neuquén). Se trata de

una planta de ciclo binario de 670 kW de potencia que contribuye a alimentar las localidades termales y turísticas de Copahue y Caviahue. Es de aclarar que se eligió el sistema binario para producción eléctrica por razón de costo-oportunidad de la central y no por motivos técnicos.

Las dificultades más grandes para un desarrollo sostenido de energía geotérmica con fines eléctricos se encuentran en los elevados costos de la exploración y lo alejado de las zonas pobladas de las principales áreas de interés geotérmico.

En cuanto a la posibilidad de efectuar aprovechamientos calóricos, cada caso debe ser estudiado muy cuidadosamente sopesando el costo del aprovechamiento y la importancia de la actividad económica en juego.

Se han realizado algunos aprovechamientos. Además de los usos en balneoterapia en distintos puntos del país, se puede mencionar la calefacción de algunos albergues en la zona de Las Ovejas (al Norte de la provincia del Neuquén, cerca de Cerro Domuyo). Se tiene en estudio algunos posibles aprovechamientos calóricos de tipo industrial (básicamente secado de productos agrícolas) en el noreste de La Rioja, pero todavía no se concretaron.

CAMPO TERMAL COPAHUE-CAVIAHUE *(Fuente SEGEMAR)*

El Campo Geotérmico Copahue-Caviahue se encuentra ubicado en el sector homónimo a 37° 50' de latitud Sur y 71° 05' de longitud Oeste, distante a 1170 km. en dirección Oeste-suroeste de la capital Argentina, Buenos Aires y a 360 km. de Neuquén en dirección Noroeste, capital de la provincia.

En el Campo Geotérmico se encuentran cinco manifestaciones geotérmicas de importancia, ocupando un área de aproximadamente 1,2 km². Cuatro de dichas manifestaciones se encuentran en territorio argentino cuyas denominaciones son: Termas de Copahue, Las Maquinas, Las Maquinitas y Anfiteatro. Mientras que la restante se encuentra en territorio chileno y se denomina Chanco-Có. Todas se ubican al Noreste del volcán Copahue y se caracterizan por las depresiones y alteraciones ácidas de sus suelos. En orden de importancia se ubican: Termas de Copahue, Las Maquinas, Las Maquinitas, Anfiteatro y Chanco-Có, en todas ellas predominan las fumarolas de vapor, mientras que solo en las más importantes se visualiza la surgencia de agua caliente, lagunas de barros sulfurosos, etc. Además de las manifestaciones descritas se encuentra la laguna del cráter del volcán

Copahue, cuyas aguas alcanzan un grado de acidez de pH 1,2 debido a la presencia de los aniones cloruro y de ácido clorhídrico. Los estudios sobre las perforaciones exploratorias realizadas permiten demostrar que hasta los 1.500 m de profundidad el Campo Geotérmico Copahue-Caviahue es de vapor dominante. Los análisis isotópicos del vapor han arrojado como conclusión que el origen del mismo es del tipo aluvión al, es decir que el agua de deshielo que se infiltra en los terreno y circular en el subsuelo, es semi-entrampada en la zona del reservorio donde se le trasfiere las altas temperatura que surgen de la cámara magmática generándose un sobre calentamiento. Cuando se libera, producto de una perforación, se pone en contacto esa zona de alta temperatura y presión con la presión atmosférica, logrando una despresurización controlada que da origen al vapor.

En el campo geotérmico de Copahue fue puesta en funcionamiento, el 5 de abril de 1988, una central geotérmica piloto que generaba energía eléctrica mediante el empleo de vapor de agua del subsuelo. Operaba mediante un ciclo binario utilizando isopentano como fluido de trabajo intermedio. La planta era portátil y fácilmente desmontable. Actualmente está emplazada sobre la boca del pozo productor de vapor ubicado a dos kilómetros de Copahue cuya perforación se realizó en el año 1976 y que fue reperforado en 1981 a 1415 metros.

El reservorio hidrotermal se encuentra comprendido entre los 850 y los 1000 metros generando un fluido geotérmico a 6,7 tn/hora de vapor saturado. La central contaba con una potencia de 670 kW nominales, entregando electricidad a la línea de 13,2 kv Caviahue-Copahue de 10 km de extensión y que es subsidiaria de la línea de 33 kv Caviahue-Loncopue, de 50 Km. de largo que se une al sistema interconectado provincial de 132 kilovatios.

La central, ubicada a 2000 m sobre el nivel del mar, presentaba el siguiente esquema básico de funcionamiento: el vapor geotérmico que sale a 6,7 ton/hora y 171°C entra al precalentador y vaporiza el isopentano que a su vez hace funcionar a la turbina del generador a 3000 rpm (revoluciones por minuto) y entregando 670 kW. El isopentano continúa hasta el condensador donde es enfriado para reiniciar el ciclo. La central se encuentra fuera de servicio por mantenimiento desde el año 1998.



CAMPO TERMAL DOMUYO (Fuente SEGEMAR)

Esta área se encuentra ubicada en el noroeste de la provincia del Neuquén. Los estudios de carácter geológico regional efectuados permitieron delimitar la anomalía térmica y valorar en forma integral el episodio eruptivo. Abarcan una superficie aproximada de 4.700 km², comprendida entre los paralelos de 36°30' y 37°00' de latitud sur, el meridiano de 70°00' y el límite internacional con Chile.

Como resultado de relevamientos geológicos, geoquímicas, isotópicos, gravimétricos, eoelectrónicos, estudios de flujos calóricos, y sísmico se selecciono un área de 40 Km² en el sector del Cerro Domo y sus inmediaciones. Se considera que este es el lugar más promisorio para llevar a cabo futuros estudios tendientes a la fase de desarrollo, incluyendo también la perforación de pozos de exploración.

El sector seleccionado, que se considera en donde se encuentra el reservorio geotérmico, se encuentra rodeado por el arroyo Manchana Covunco por el norte, el arroyo Covunco por el sur, cerro Domo por el este y el río Varvarco por el oeste.

El presente resumen reúne las conclusiones de los trabajos geotérmicos realizados que junto con el modelo geotérmico preliminar propuesto y las recomendaciones y objetivos de la etapa siguiente constituyen la síntesis del estudio de prefactibilidad geotérmica del área del Cerro Domuyo.

Sus caracteres geológicos, las anomalías térmicas a 1 m de profundidad, y las anomalías geoquímicas de Hg y CO₂ en suelo permitieron concluir que se trata de un sector de intersección y concentración de zonas de fracturación de diversas direcciones, siendo esta estructura la que controla las manifestaciones de agua termal, vapor y gas que se ubican en las cercanías.



De acuerdo a los estudios gravimétricos, el sector se ubica al oeste de una zona de transición de la anomalía de Bouguer, que muestra una caída hacia el este, y se infiere también la existencia de estructuras secundarias de caídas.

Con la termometría geoquímica se calcula un rango de temperaturas de 214° C - 223° C, esperándose la existencia de fluidos clorurados y mezcla agua-vapor.

Los estudios hidrológicos permiten ubicar al sector dentro de la cuenca de drenaje de los arroyos Manchana Covunco y Covunco, que tienen sus orígenes en los glaciares formados en las alturas del Co. Domuyo. El suministro de agua superficial, estable a través de todo el año, es una condición favorable para el transporte del flujo calórico desde las fuentes térmicas subterráneas.

CAMPO TERMAL TUZGLE-TOCOMAR *(Fuente SEGEMAR)*

El campo geotérmico Tuzgle-Tocomar (23° 55' latitud sur y 66° 05' longitud oeste), está ubicado en el plateau de la Puna Central (altiplano salteño-jujeño) dentro del departamento de Susques, a aproximadamente 270 km al este del frente principal de la Zona Volcánica Central. Las investigaciones en la actualidad transitan la etapa final de prefactibilidad, en la que ha sido estudiada en detalle un área de aproximadamente 900 km². Es el prospecto geotérmico más estudiado del Noroeste Argentino. Entre 1978 y 1995 se realizó una secuencia de estudios que abarcó desde el reconocimiento hasta la delimitación del área, en donde se debería realizar los pozos exploratorios profundos.

El Complejo Volcánico Tuzgle-Tocomar está emplazado en la parte central de una depresión tectónica elongada N-S, delimitada por fallas normales y separada hacia el sur de la depresión Tocomar-Olacapato por un horst (ONO-ESE) de rocas del Paleozoico inferior (Mon, 1987). Los productos volcánicos descansan sobre un complejo basamento de gran espesor constituido por:

a) una secuencia clástica y volcánica del Terciario superior (Formación Trinchera y Formación Pastos Chicos, Schwab, 1973). La Formación Trinchera está integrada por ignimbritas dacíticas riolíticas con moderada compactación y aglutinación, con intercalaciones de rocas clásticas. La Formación Pastos Chicos es una secuencia predominantemente clástica, fina, integrada por arcillitas, areniscas de grano fino y niveles ignimbriticos intercalados.

b) rocas sedimentarias (areniscas, arcillas y margas) del Cretácico superior correspondientes a las Formaciones Pírgüa y Lecho pertenecen al Grupo Salta (Schwab, 1973)

c) lutitas y areniscas marinas del ordovícico correspondientes a una unidad volcánica-metamórfica (Faja Eruptiva) que se compone de rocas volcánicas mesosilíceas con facies graníticas asociadas y otra sedimentaria (Sedimentitas ordovícicas) que están integradas por secuencias clásticas de cuarcitas, areniscas, lutitas y arcillitas. Estas unidades están intercaladas con rocas volcánicas dacíticas y lutitas y pizarras del Precámbrico tardío-Cámbrico superior de la Formación Puncoviscana (Coira y Paris, 1981).

CAMPO TERMAL VALLE DEL CURA *(Fuente SEGEMAR)*

En esta área, se efectuó una primera fase de estudios de prefactibilidad. Sobre la base de anomalías químicas e isotópicas se conjeturo la probable existencia, a profundidades accesibles por perforación, de fluidos de tipo agua-vapor con temperaturas superiores a los 200° C y en niveles de circulación y almacenamiento secundarios, temperaturas de 130° - 150° C.

La anomalía geotérmica comprobada, pero aun no delimitada, se vincula con la presencia de cuerpos subvolcánicos relacionados con el volcán Tórtolas.

Bibliografía:

- Edafología para la Agricultura y el medio ambiente: López-Acevedo, M. y otros - 2003
- La degradación del suelo: Un aliado de la vida pide auxilio- Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación productiva (SeCyT)
- Tchnobanoglus, G. (1994), Gestión Integral de los Residuos Sólidos: Principios de Ingeniería y Aspectos de la Gestión, Mc Graw-Hill.
- SECRETARÍA DE ENERGÍA DE LA NACIÓN: Contenidos didácticos: Energía Geotérmica