

Juan Herrera Herbert

Minería por lixiviación in situ.

Conceptos fundamentales y definiciones

Madrid - 2023



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Escuela Técnica Superior
de Ingenieros de Minas y Energía

www.minasyenergia.upm.es



Minería por lixiviación in situ. Conceptos fundamentales y definiciones

Autor: Juan Herrera Herbert (juan.herrera@upm.es).

ADVERTENCIA

El presente documento ha sido preparado con una finalidad exclusivamente divulgativa y docente. Las referencias a productos, marcas, fabricantes y estándares que pueden aparecer en el texto, se enmarcan en esa finalidad y no tienen ningún propósito comercial.

Todas las ideas que aquí se desarrollan tienen un carácter general y formativo y el ámbito de utilización se circunscribe exclusivamente a la formación de los estudiantes de la UPM. La respuesta ante un caso particular requerirá siempre de un análisis específico para poder dictaminar la idoneidad de la solución y los riesgos afrontados en cada caso, además de las incidencias en los costes de explotación. Consulte siempre a su ingeniería, consultor, distribuidor y fabricante de confianza en cada caso.

Foto de portada: studylib.es

Copyright © 2022. Todos los derechos reservados

DC: <https://oa.upm.es/89378/>

OAI: [oai:oa.upm.es:89378](https://oa.upm.es/89378/)



Universidad Politécnica de Madrid
Departamento de Ingeniería Geológica y Minera
Laboratorio de Tecnologías Mineras

Calle Ríos Rosas 21
28003 Madrid (España)



Este documento ha sido formateado para su visualización y uso en dispositivos electrónicos y permitir ahorrar en el consumo de papel y tóner.
Antes de imprimirlo, piense si es necesario hacerlo.



Contenidos

- MÍNERÍA QUÍMICA
 - Introducción
 - Tipos de minería química
- LIXIVIACIÓN
 - Introducción
 - Ventajas e inconvenientes
 - Tipos de lixiviación in situ
 - Investigación de yacimientos
 - Agentes lixiviantes
 - Práctica operativa
- APLICACIÓN A YACIMIENTOS SALINOS
- APLICACIÓN A YACIMIENTOS DE URANIO
- BIBLIOGRAFÍA

Introducción a la minería química

- La **Minería Química** es la técnica que aplica **in situ** la química de la disolución a la extracción y recuperación de minerales y metales contenidos en una matriz rocosa.

"(...) que trabaje el ión, en lugar del peón (...)"

- Las ventajas de este método de extracción minera son:
 - Menor inversión: en terrenos, maquinaria, etc.
 - Modularización y fácil escalonamiento del ritmo de las operaciones.
 - Menor coste operativo en personal y energía.
- Los inconvenientes son:
 - Dificultad de recuperar de forma predecible y controlada los valores del yacimiento.
 - Requiere un excelente conocimiento del yacimiento.
 - Problemas de contaminación y ocupación de grandes superficies.
 - Tiempo necesario para alcanzar recuperaciones aceptables.
 - Requiere una alta especialización y un especial cuidado.

Concepto de lixiviación in situ

- El proceso de lixiviación in situ (LIS) implica extraer el mineral de la roca a través de la inyección de una solución química en el yacimiento.
- Comprende métodos de disolución en agua y métodos de lixiviación mediante compuestos químicos acuosos que se inyectan en los depósitos minerales:
 - Por disolución, aprovechando la solubilidad en agua.
 - Por lixiviación en el propio emplazamiento, mediante soluciones químicas, de forma similar a la lixiviación superficial.
- El fluido obtenido es posteriormente bombeado a la superficie donde los metales son recuperados.

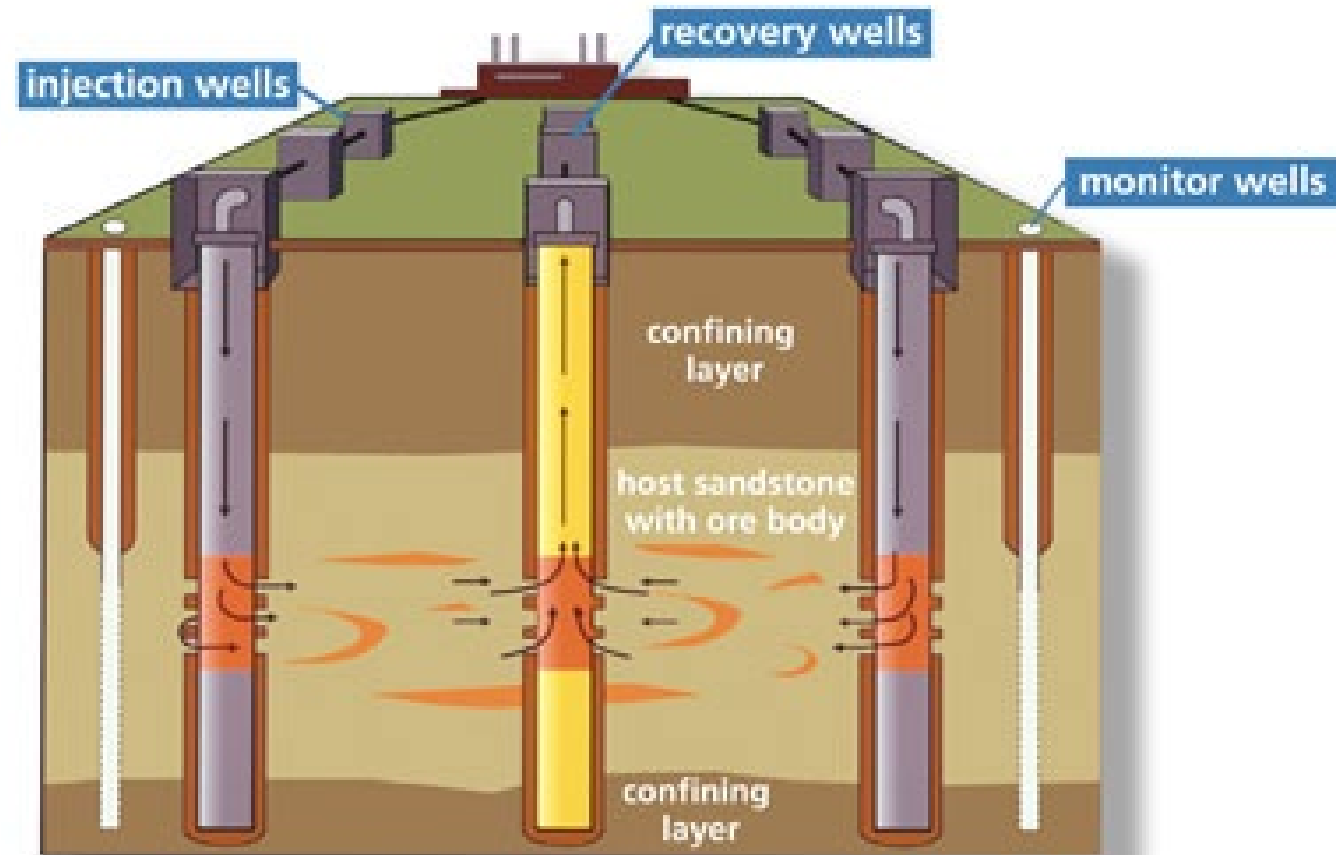
Tipos de minería química

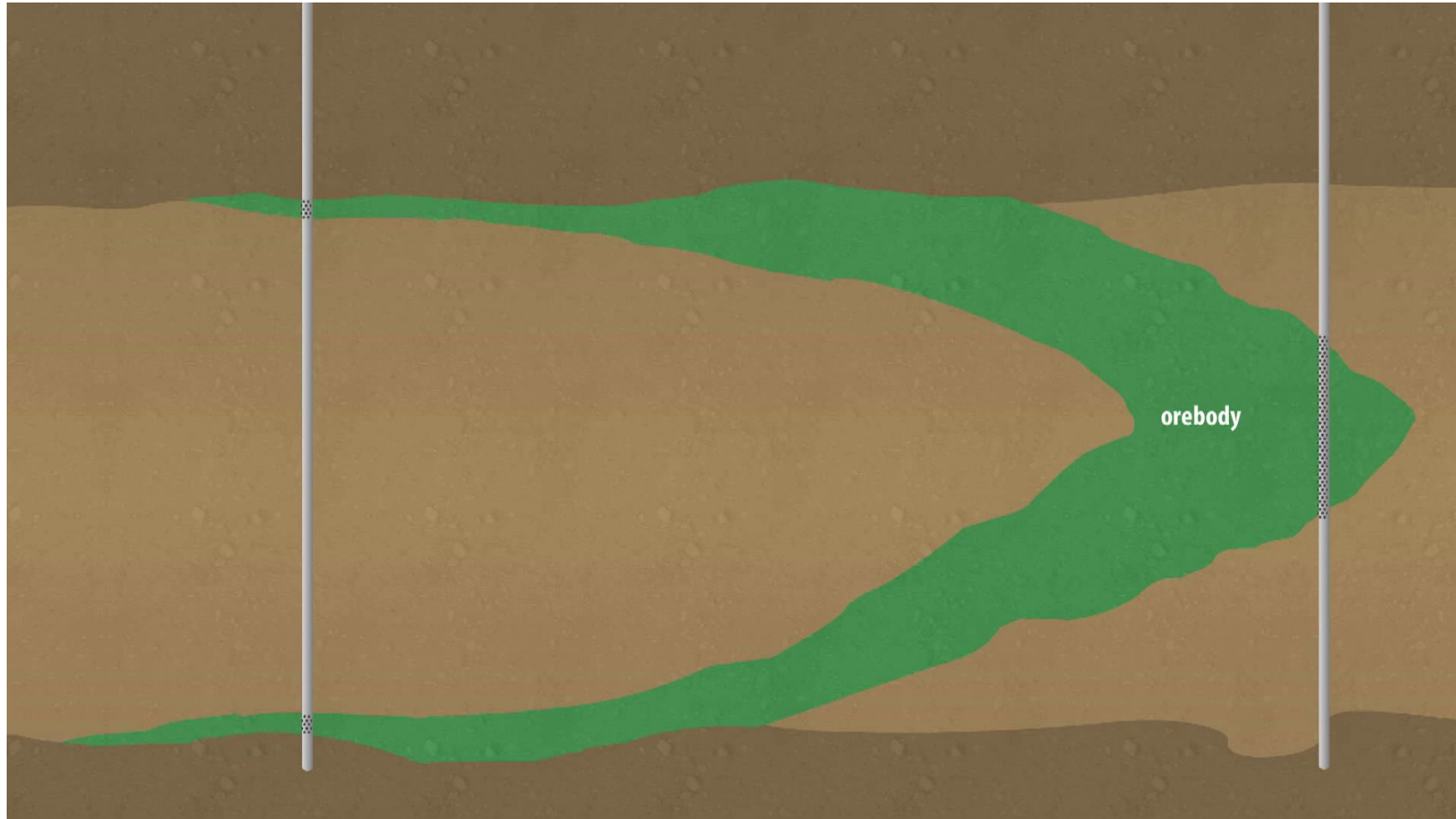
■ Tipos de minería química



Introducción a la lixiviación

- La minería química in situ, por disolución o lixiviación, consiste en bompear volúmenes de un agente lixivante, específicamente preparado, al lugar donde se encuentra el mineral (o elemento objetivo) para su inyección en la masa de mineral soluble, porosa o fracturada.
- La minería por lixiviación in situ puede aplicarse a:
 - **Depósitos de sales solubles en agua,**
 - **Depósitos de azufre por fusión en agua caliente o vapor de agua, y**
 - **Elementos metálicos por lixiviación mediante compuestos químicos diluidos en agua.**
- A las masas de mineral que no son accesibles por minería convencional, se llega por medio de sondeos.
- Por un pozo de inyección se introduce cierto volumen de licor lixivante, que tras circular atravesando y disolviendo la mena es extraído por los pozos de recuperación.
- La solución obtenida se bombea al exterior donde en una planta de extracción se recupera el metal o sustancia útil.
- En ocasiones, la inyección y la extracción se realizan por el mismo sondeo.





- La minería química se aplica en yacimientos de:
 - Minerales no metálicos: con contenido de sales (evaporitas generalmente) y en los que al realizar la disolución in situ dan lugar a grandes cavidades con posterior posibilidad de aprovechamiento como almacenamiento de hidrocarburos y residuos peligrosos.
 - Minerales metálicos:
 - La lixiviación se efectúa con cierta presión, a través de la permeabilidad natural de macizo mineralizado (vetas, juntas o fracturas naturales) o de la permeabilidad originada por fragmentación artificial previa (p.ej. explosivos).
 - En estos casos no se originan grandes cavidades, a menos que las rocas sean muy ricas en metal.



■ VENTAJAS DEL SISTEMA

- La minería in situ es ambientalmente más atractiva, ya que provoca menos contaminación en la superficie, en el aire, etc.
- Necesita menos ocupación de terrenos para el desarrollo de la operación.
- Requiere normalmente menos inversión de capital y origina unos costes de operación más bajos que las operaciones convencionales.
- Puede emplearse, a veces, para recuperar económicamente metales de materiales que no podrían ser tratados por los procesos convencionales de minería, concentración y fundición.
- Aumenta las reservas y recursos de minerales.



■ INCONVENIENTES DEL SISTEMA

- Se trata de una tecnología compleja, con procesos físicos, químicos y bacteriológicos, difíciles de predecir.
- Existen factores físicos y químicos que pueden limitar la viabilidad de la minería química: contacto real y efectivo de la solución lixivante con la masa de mineral; velocidad de disolución; precipitados etc.
- Pueden generar contaminación de las aguas subterráneas.
- Control más complejo de las operaciones.
- Necesidad de conocimiento del yacimiento y de sus características mucho mayor.
- Producción diaria variable.

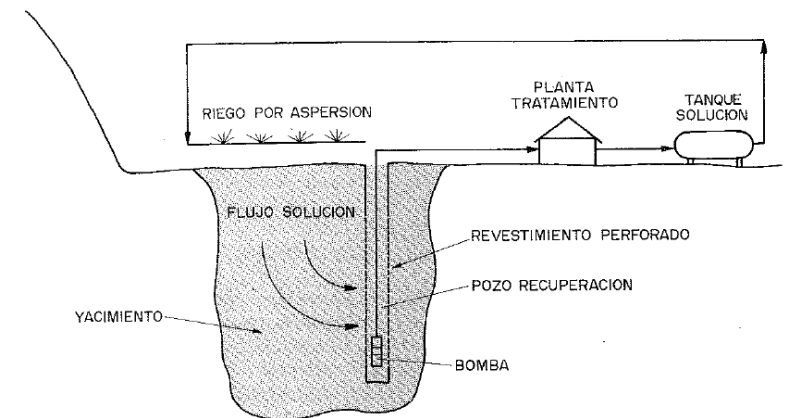


■ TIPOS DE MINERÍA QUÍMICA IN SITU

- Yacimientos superficiales o poco profundos
- Yacimientos poco profundos por debajo del nivel freático
- Yacimientos profundos

Yacimientos superficiales o poco profundos

- Se localizan por encima del nivel freático y requieren una definición del tonelaje de los bloques y una técnica de voladura para su fracturación, seguida de la lixiviación por percolación de la masa de roca fisurada.
- La operación consiste en realizar sondeos (pozos de inyección) y pozos o galerías colectoras de la solución lixivante con equipos para su bombeo a la planta de recuperación.
- Al estar la roca mineralizada superficial, tales sistemas son económicamente atractivos. Si, por cualquier circunstancia, es necesario trasladar la roca tras la lixiviación y lavado, o han de explotarse bloques de niveles inferiores, el sistema se complica y puede ser de menor rentabilidad.
- Un ejemplo típico es la explotación de glauberita en Burgos, Madrid y Toledo





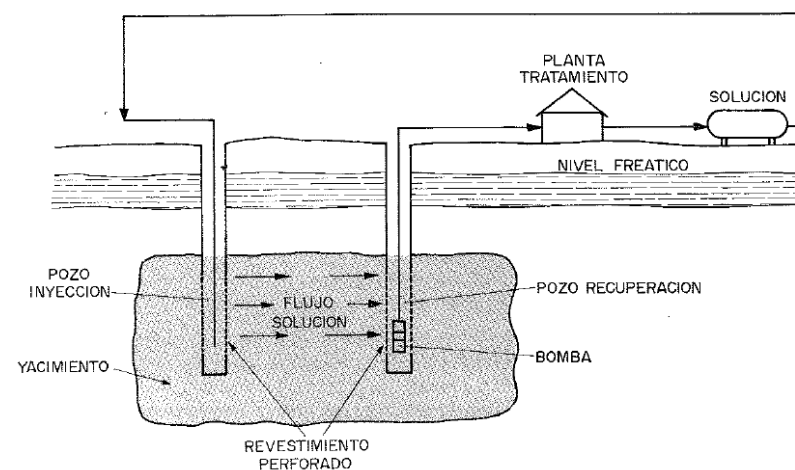






Yacimientos poco profundos por debajo del nivel freático

- Este tipo se refiere a la lixiviación de depósitos relativamente poco profundos, localizados a menos de 300 m de la superficie, pero que están por debajo del N.F.
- Estos depósitos necesitan normalmente una fracturación previa por voladura, efectuándose el drenaje de las soluciones mediante sondeos.
- Normalmente se ponen en explotación varios bloques para comenzar ciclos alternativos de lixiviación y agotado, regularizándose así la producción.
- Se realiza para minerales de uranio y evaporitas.





Yacimientos profundos

- Se caracterizan por estar a más de 300 m por debajo del N.F.
- La lixiviación a tales profundidades está avalada por la oxidación directa de los minerales sulfurosos, debido al aumento de la solubilidad del oxígeno por la presión soportada. Se puede decir que es una lixiviación a *alta presión natural*.
- Caso aplicable a la minería del cobre.

Investigación de yacimientos para su explotación por minería química

- Cualquier proyecto de lixiviación in situ requiere el conocimiento exhaustivo de las características geológicas, mineralógicas, hidrológicas y físicas del yacimiento.
- Todo ello se realiza con ensayos de campo en sondeos (sondeos piloto) y con técnicas adecuadas.
- **El criterio básico de una operación minera in situ lo constituye el *flujo de fluidos a través de una formación permeable*, que viene dado por sus características hidrológicas, principalmente la permeabilidad.**
 - Características hidrogeológicas del medio rocoso
 - Características del flujo de fluidos
 - Permeabilidad. Métodos de ensayo de campo

Investigación de yacimientos para su explotación por minería química

■ Características hidrogeológicas del medio rocoso

- Las principales características hidrogeológicas de un medio rocoso permeable, que determina el flujo de un fluido son:
 - Porosidad: es el espacio vacío en una unidad de volumen de la roca (*volumen de poros o huecos*).
 - Permeabilidad: facilidad con la que un líquido fluye a través de un medio poroso
 - Potencia: espesor de la formación
 - Transmisividad: permeabilidad x potencia
 - Coeficiente de almacenamiento: volumen de agua desalojado desde el sondeo
 - Nivel freático o superficie piezométrica: nivel a cual el agua permanece en el sondeo.
 - Gradiente hidráulico: dirección y velocidad de la corriente del nivel freático.

Investigación de yacimientos para su explotación por minería química

■ Características del flujo de fluidos

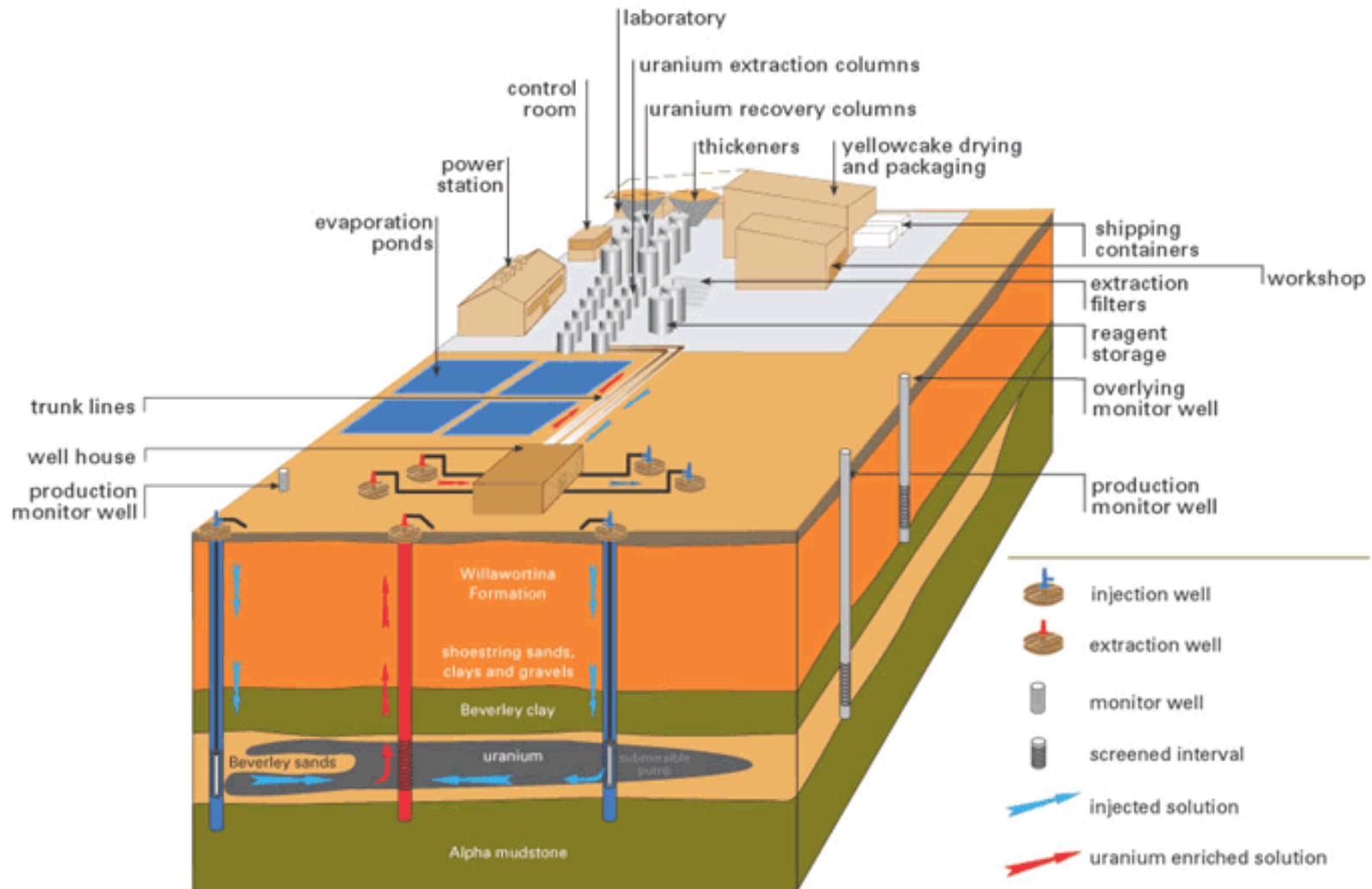
– Las características del flujo de fluidos lixiviantes son:

- Velocidad: es directamente proporcional a la permeabilidad y al gradiente hidráulico.
- Dirección: viene determinada por la geometría del campo de los pozos y puede estimarse mediante modelización numérica
- Radio de influencia del flujo: está relacionado con la presión ejercida sobre la zona y su sensibilidad a esta presión.
- Recorrido del flujo: depende de las características del material rocoso y de la estructura de los granos. Puede ser clave si no existe homogeneidad en el yacimiento.

Agentes lixiviantes

- Cada sistema de minería química requiere, por sus condiciones especiales, determinados agentes lixiviantes dentro de las características esenciales de una disolución efectiva y económica del metal o sustancia a extraer.
- Otras características deben ser su escasa toxicidad y, a ser posible, que el sistema no dependa de su recuperación.
- En general, los agentes lixiviantes empleados en operaciones industriales in situ son:
 - Agua, en la extracción de silvinita y evaporitas
 - Ácido sulfúrico, para cobre y uranio
 - Sulfato férrico, producido por la oxidación bacteriana de sulfuros de hierro, para cobre y uranio
 - Sistema carbonato-bicarbonato (amónico y potásico), para uranio y cobre
 - Cianuro, para minerales de oro y plata

Práctica operativa



Práctica operativa

- El esquema típico de explotación por sondeos consiste en la ejecución de dos conjuntos de sondeos, unos de inyección y otros de producción, por los que circula un líquido que se va enriqueciendo en la sustancia mineral a explotar.
- En casos muy específicos y concretos pueden unirse ambos en un solo sondeo por medio de doble o triple entubado, que al mismo tiempo inyecte y extraiga el fluido.

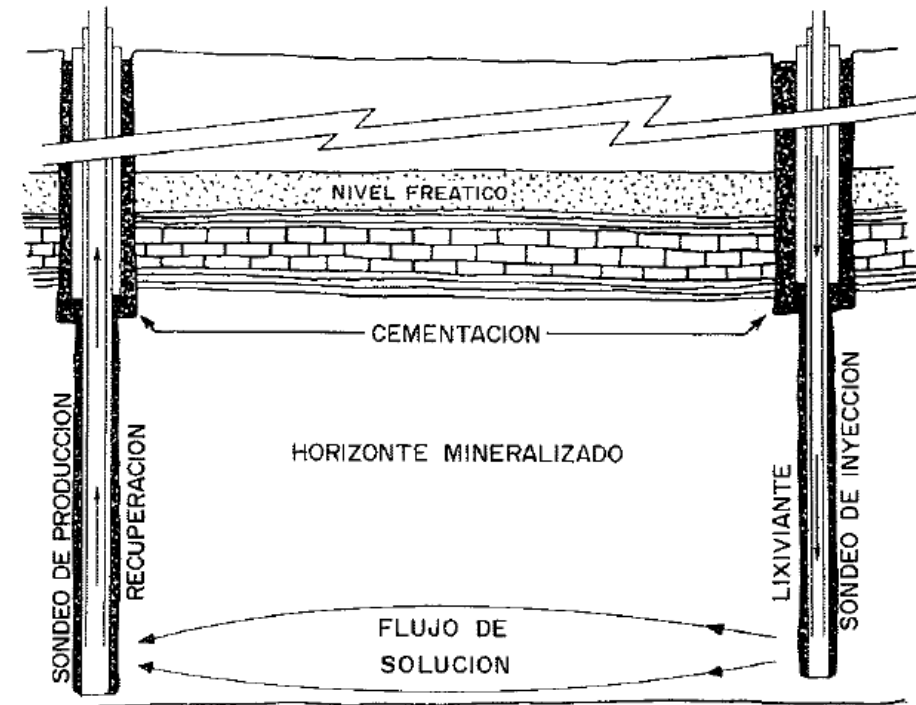


Figura VII.1. Sistema de explotación por sondeos separados.

Práctica operativa

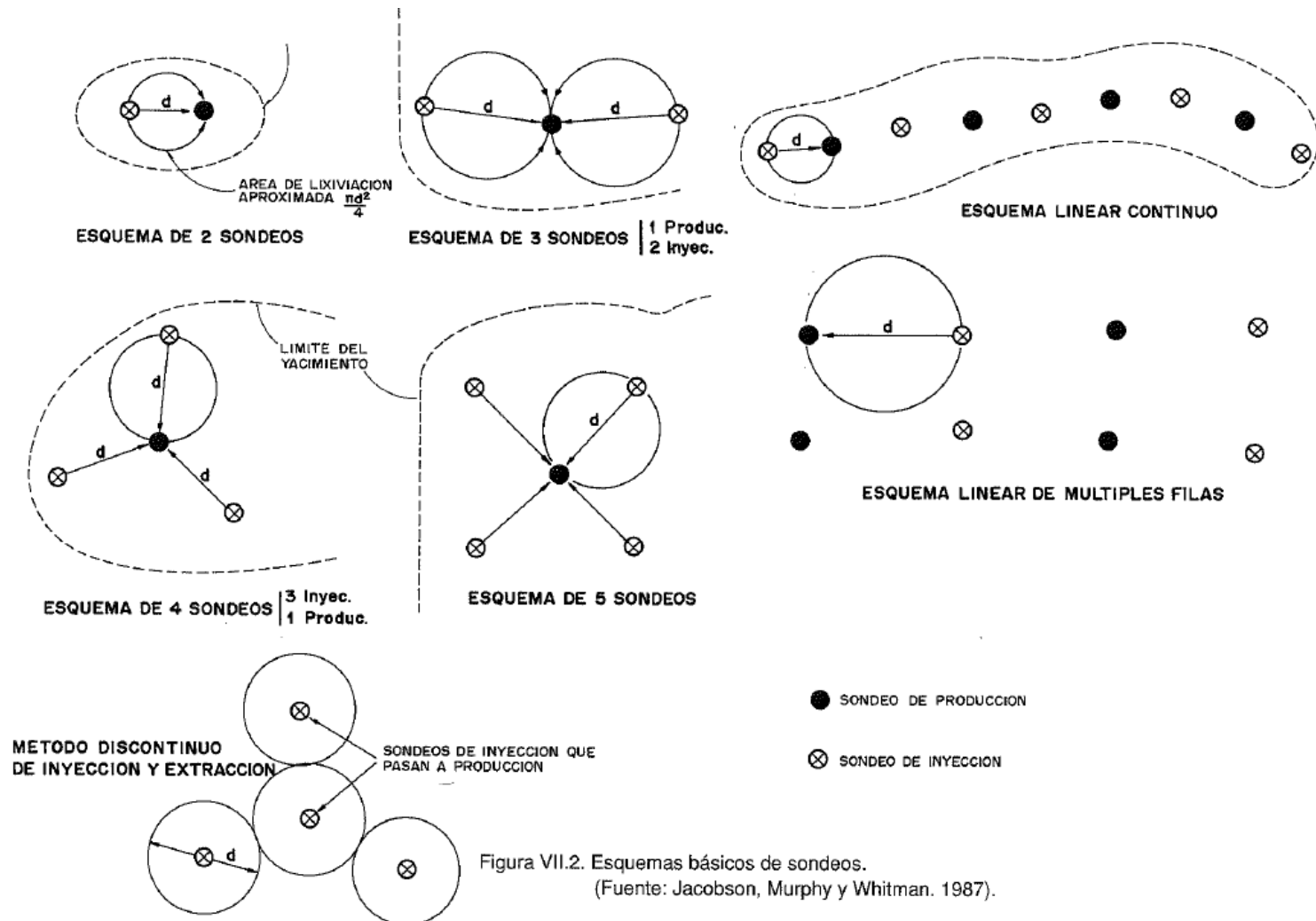


Figura VII.2. Esquemas básicos de sondeos.
(Fuente: Jacobson, Murphy y Whitman. 1987).

Práctica operativa

- Generalmente, la explotación de un depósito requiere la ejecución de una serie de sondeos en forma modular, con esquemas previamente establecidos a través de los correspondientes ensayos de campo. En los modelos de implantación de sondeos se deben ajustar los flujos internos de circulación de las aguas subterráneas.

- Dependiendo de las condiciones geométricas de yacimiento, estos esquemas se implantan según una malla determinada para la explotación sucesiva en fases.

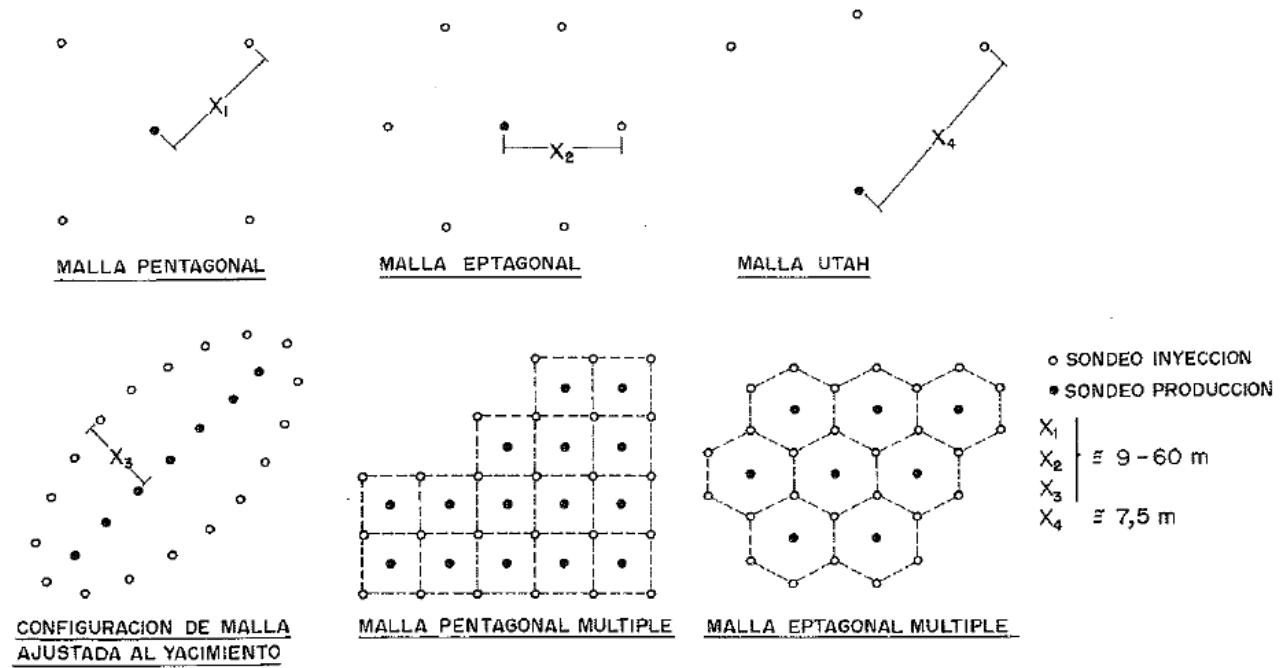
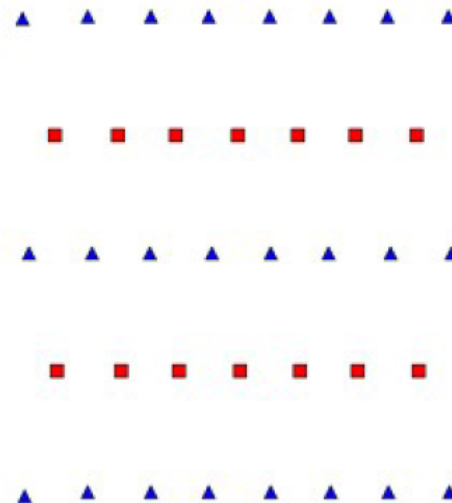


Figura VII.3. Mallas de implantación de sondeos

Práctica operativa



- ▲ Injection Wells
- Extraction Wells

Fig 2. Alternating lines of injection and extraction

Práctica operativa

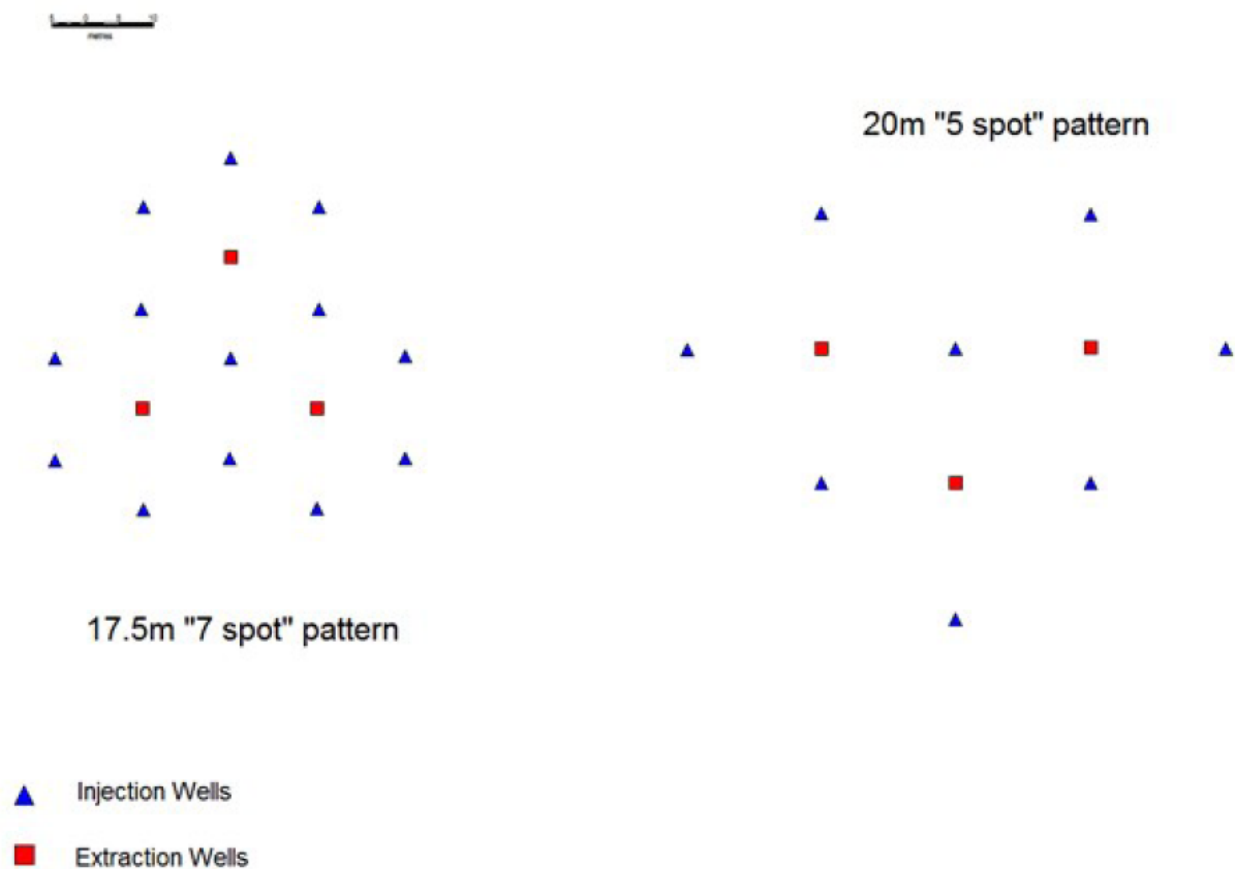
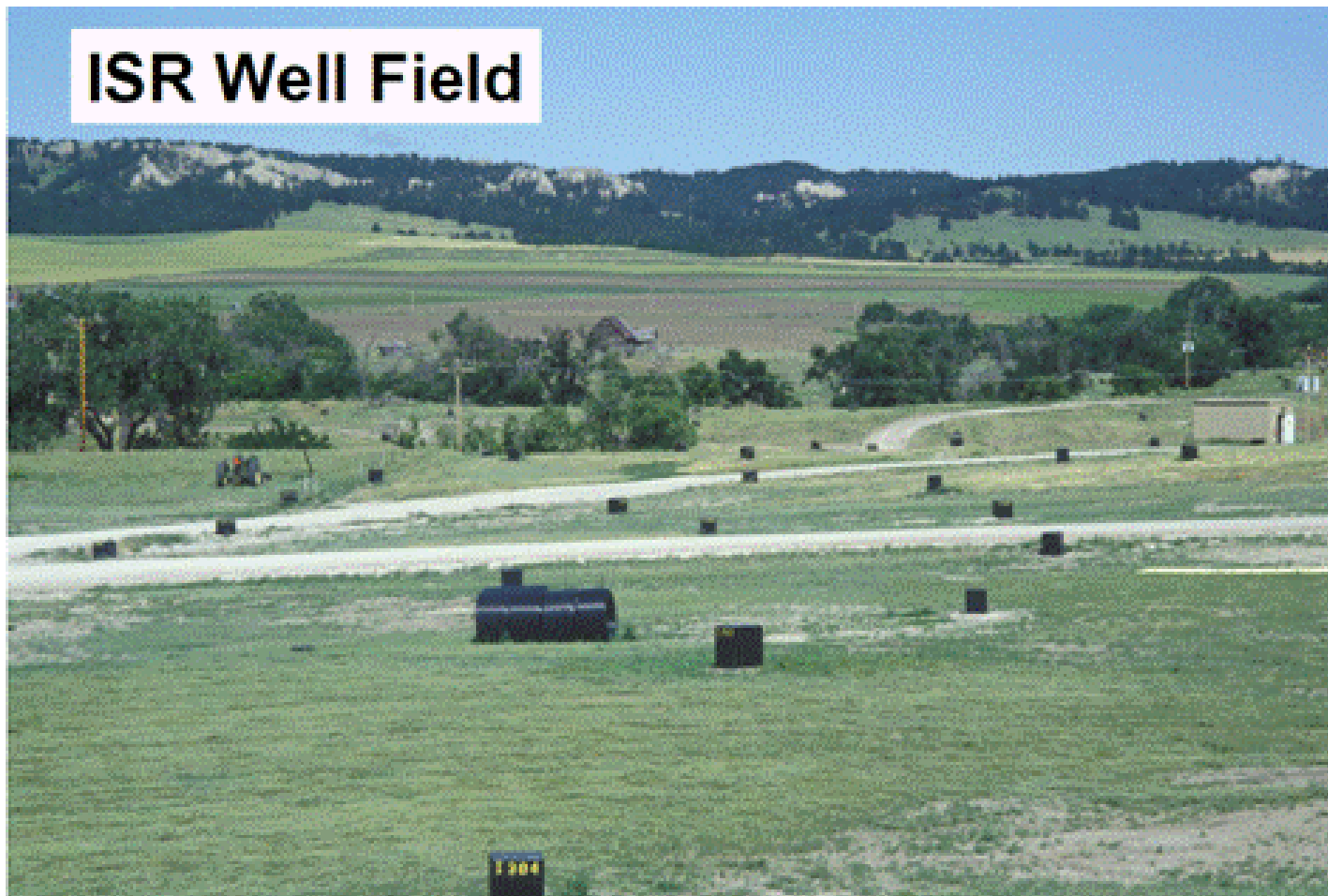


Fig 3. Five and seven spot patterns of injection and extraction

ISR Well Field









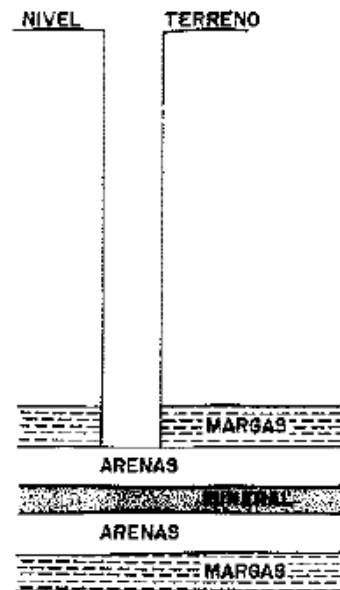
Práctica operativa. Ejecución de sondeos

- En principio, el procedimiento más operativo consiste en perforar sondeos de gran diámetro a rotación, hasta profundidades inferiores a 100m.
- En caso de terrenos poco consolidados o inestables, se recomienda el método de circulación inversa y posterior entubación.
- Para profundidades mayores de 100 m es preciso emplear perforadores rotativas con circulación directa de agua o lodo para el sostenimiento de las paredes del sondeo.

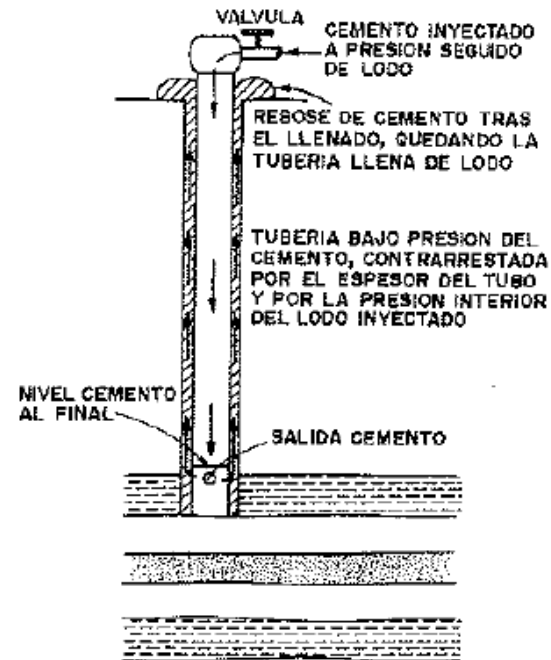
Práctica operativa. Ejecución de sondeos

- Tras la ejecución del sondeo, debe llevarse a cabo una testificación geofísica del mismo en toda su longitud, en la que se obtengan diagrfías representativas de:
 - Litología de las formaciones atravesadas
 - Espesores de la mineralización
 - Materiales insolubles intercalados
 - Composición química de los minerales
 - Resistividad, densidad y porosidad del material
 - Calibración de diámetros
- Posteriormente, y en función de los datos obtenidos, se debe proceder al revestimiento o completación del sondeo, que incluye, básicamente:
 - Entubado
 - Cementación
 - Puesta en servicio

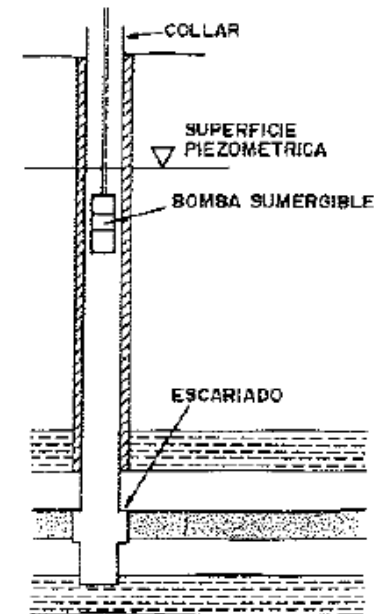
Práctica operativa. Ejecución de sondeos



PASO 1:
PERFORAR Y ENTUBAR
BÁRRENO HASTA FORMACION
SUPERIOR DE MARGAS

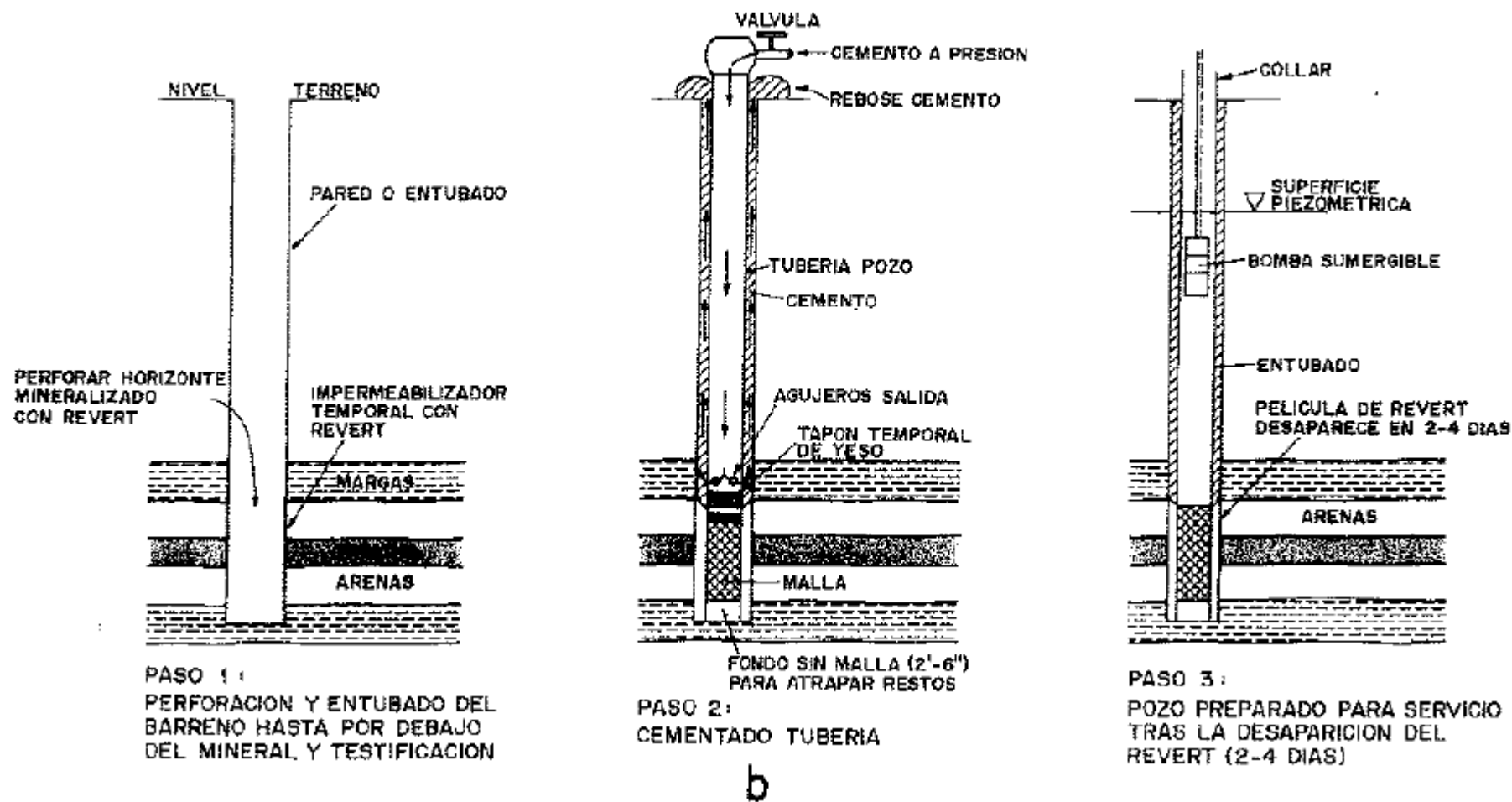


PASO 2:
CEMENTAR Y FIJAR ENTUBACION

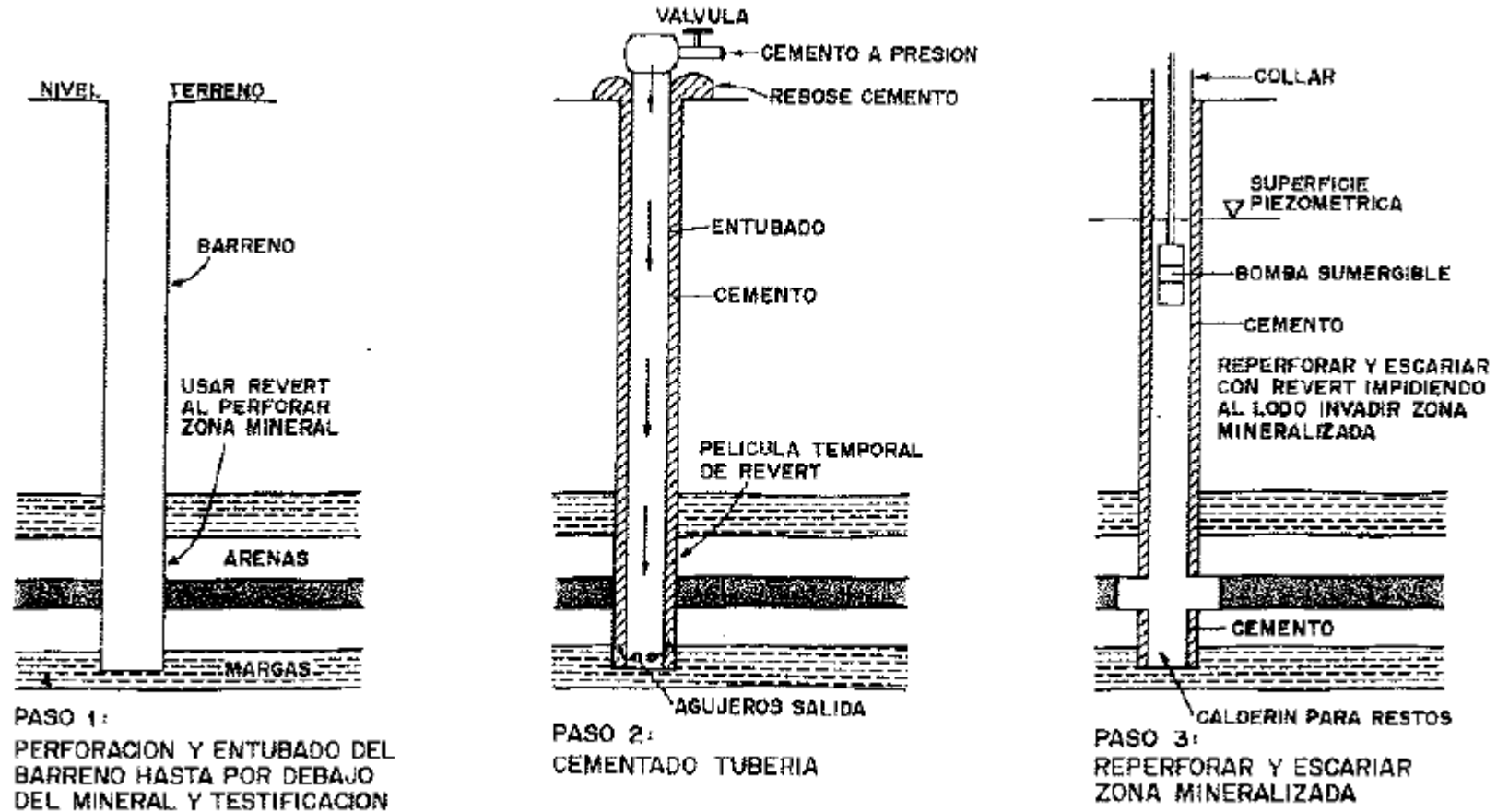


PASO 3:
COMPLETAR EL BARRENO HASTA
PASAR EL MINERAL Y ESCARIARLO

Práctica operativa. Ejecución de sondeos



Práctica operativa. Ejecución de sondeos



C

Práctica operativa. Revestimiento

- Para el revestimiento del sondeo se puede emplear tuberías de PVC reforzadas con fibra de vidrio, hasta una profundidad de 100-200m.
- Para profundidades mayores o presiones importantes (200-800m) se debe seleccionar tuberías de acero, como las empleadas petróleo.
- En casos especiales, será necesaria la utilización de una tubería interior de menor diámetro de acero inoxidable, soldada en cada junta, para prevenir fuertes tensiones, corrosión y colapso, que no soportarían las tuberías de plástico.
- En el caso de sondeos en roca, cuando esta deba ser fracturada por hidro-fracturación, la tubería debe llegar a soportar presiones de hasta 3,45 MPa (500psi), por lo que suele colocarse solamente hasta la zona mineralizada y posteriormente en ésta se coloca una segunda tubería perforada.





POLITÉCNICA

UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE MINAS Y ENERGÍA

Mining Technology Innovative Lab

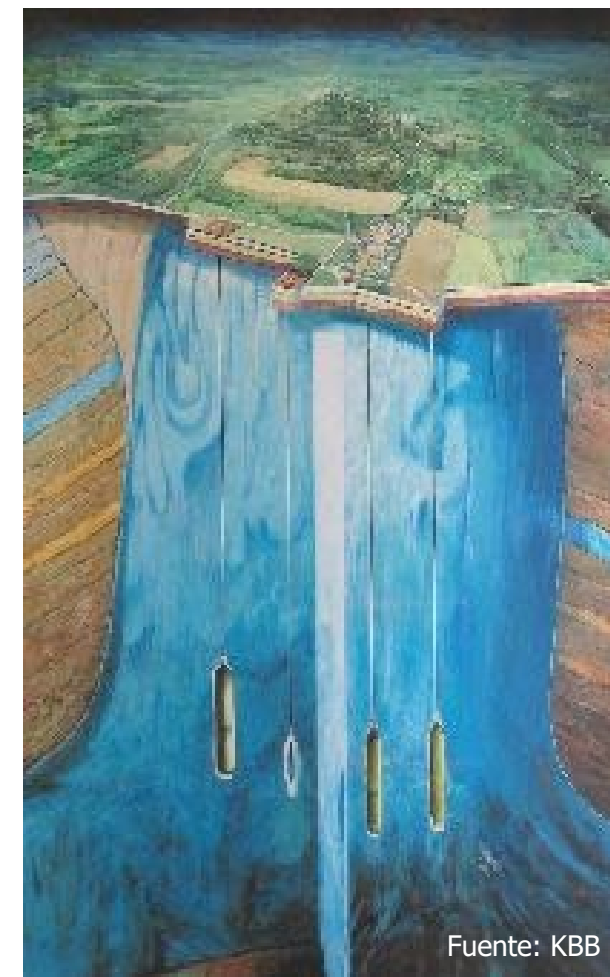
Opening minds, creating opportunities



APLICACIÓN A YACIMIENTOS SALINOS

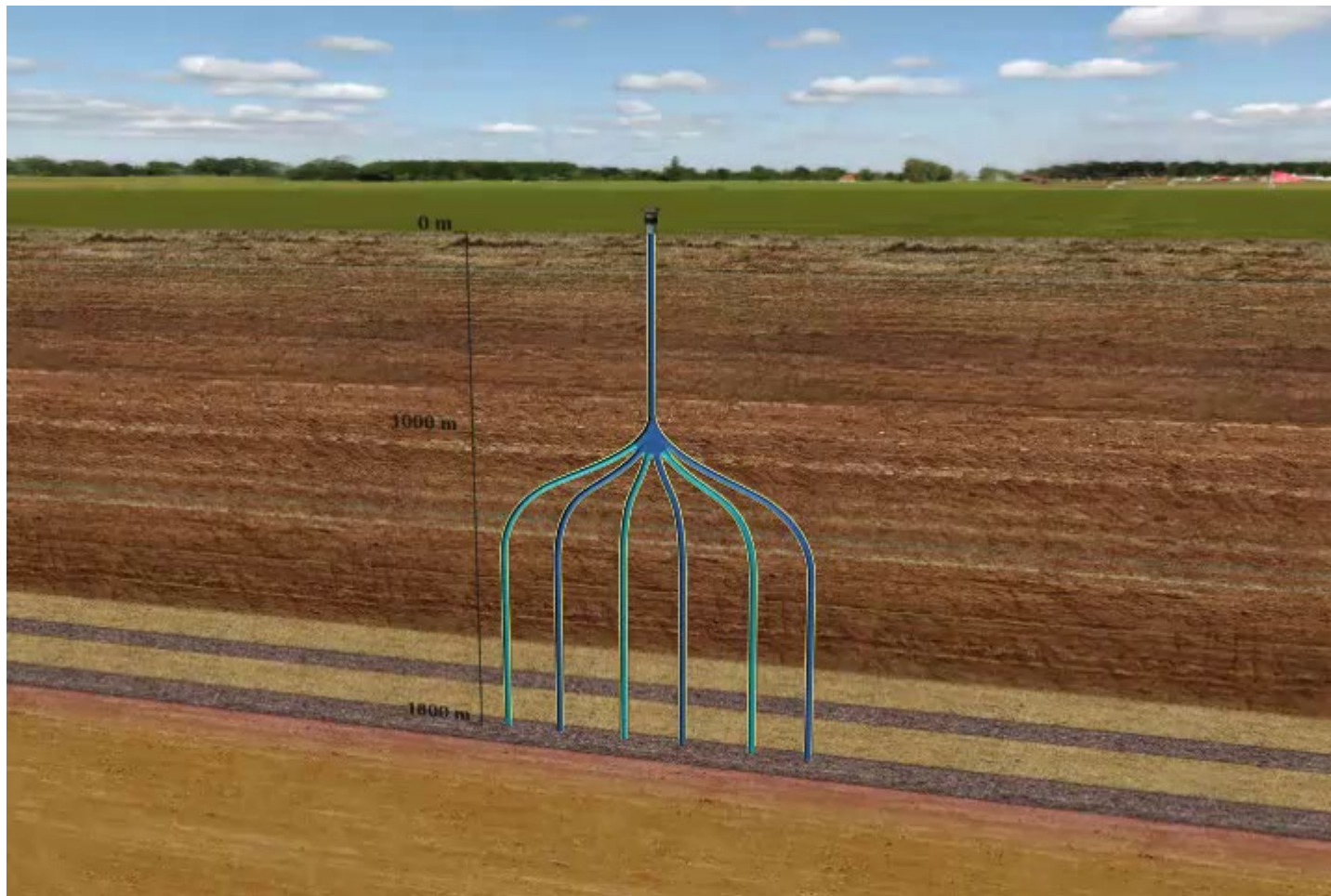
Yacimientos de sal

- Una aplicación particular de la lixiviación in situ por sondeos es la producción de sal.
- En este caso el agente lixiviante es simplemente agua.
- El agua se inyecta a través de un sondeo y se recupera una salmuera por otro sondeo o bien por el mismo sondeo. En este último caso, debe proveerse de una entubación múltiple.
- Debido a las características de los yacimientos de sal, o domos salinos, el hueco generado una vez agotada la producción puede ser usada como almacenamiento de residuos.
- En ciertos casos, en los últimos tiempos, ocurre la situación contraria: se busca un almacenamiento subterráneo y la producción de sal es la actividad consecuente. En estos casos se planifica una caverna objetivo y se extrae salmuera hasta las condiciones deseadas.



Fuente: KBB

Yacimientos de sal

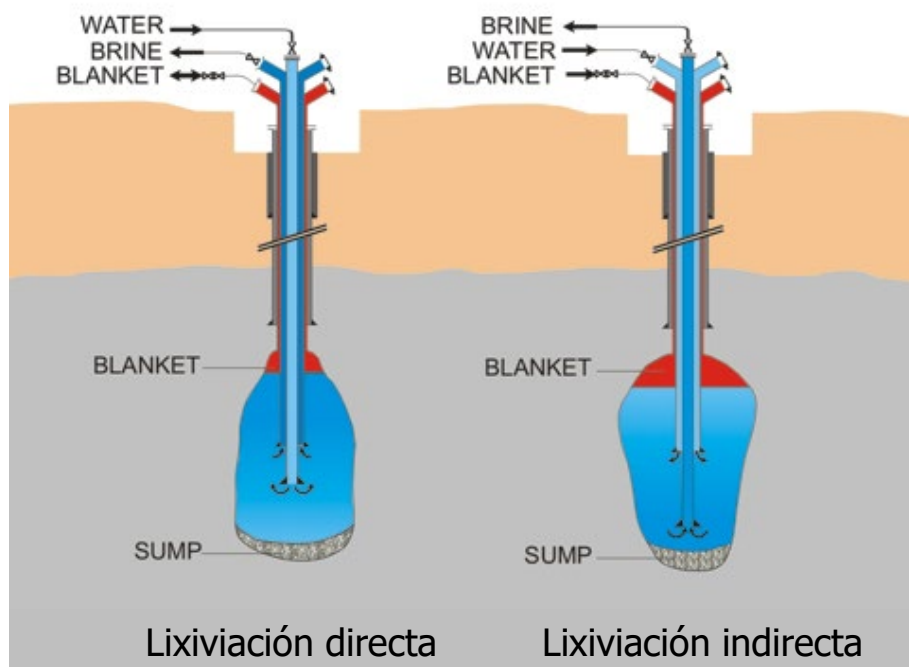


Yacimientos de sal

- El almacenamiento en cavernas en sal son una solución de minería in situ mediante sondeos en formaciones de sal.
- Estas formaciones pueden ser en capas de suficiente espesor o en forma de domos, ambos a profundidad hasta de 2.000m.
- Las dimensiones de las cavernas pueden llegar a ser de más de 300m de altura y entre 60 y 100m de diámetro. Esto implica unos volúmenes de 500.000 a 800.000m³.
- Las propiedades intrínsecas de la sal, hacen viable su uso como almacenamiento subterráneo de hidrocarburos líquidos y gaseosos, incluso como almacenamiento de aire comprimido.
- En 2004, se terminó la primera caverna natural en Europa para almacenamiento de gas, con un volumen útil de 1.1 MMm³.



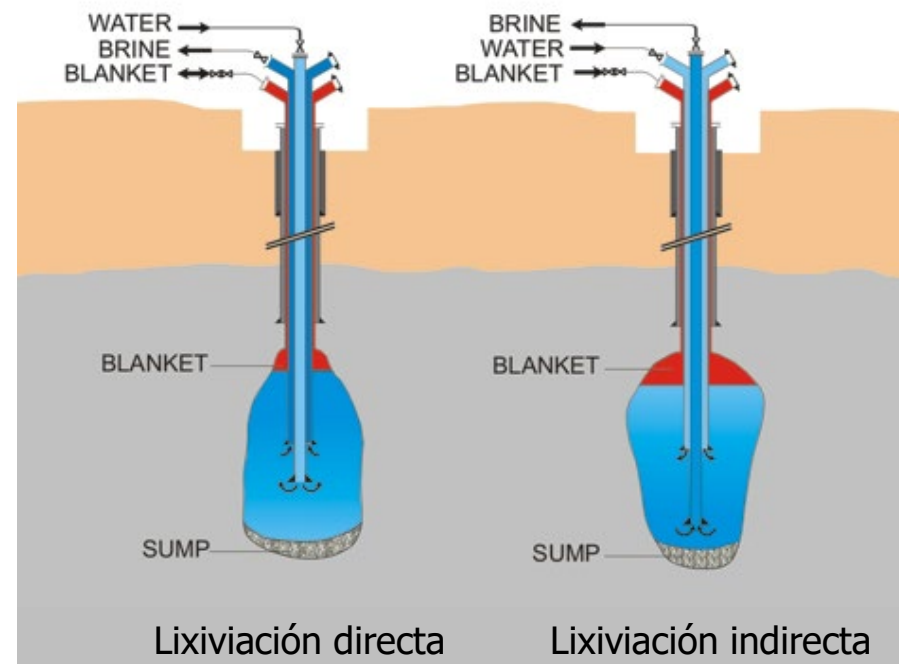
Yacimientos de sal



- La construcción de cavernas se hace mediante una combinación de disolución “directa” e “inversa”.
- Primeramente se inyecta un medio protector (blanket – manta) para asegurar la estabilidad del techo de la caverna. El medio protector es más ligero que la mezcla agua-salmuera y no es soluble en ésta.
- Una tubería con revestimiento múltiple concéntrico hace posible la combinación de los dos tipos de disolución.

Yacimientos de sal

- En la lixiviación directa, el agua fresca (o agua de mar) se inyecta por la sarta interior, mientras que la salmuera se recupera por el espacio anular interior. Con esta disposición, se construye con mayor rapidez las cavernas de menor sección.
- En la lixiviación indirecta, el agua fresca (o agua de mar) se inyecta por el anular, mientras que la salmuera se recupera por el revestimiento central. Con esta disposición, se construye con mayor rapidez las cavernas de mayor sección.
- La profundidad de la sarta interior y de cada uno de los anulares se ajusta de modo que se optimice el proceso de disolución.
- El espacio anular exterior se emplea para controlar el medio protector (blanket)





POLITÉCNICA

UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE MINAS Y ENERGÍA

Mining Technology Innovative Lab

Opening minds, creating opportunities

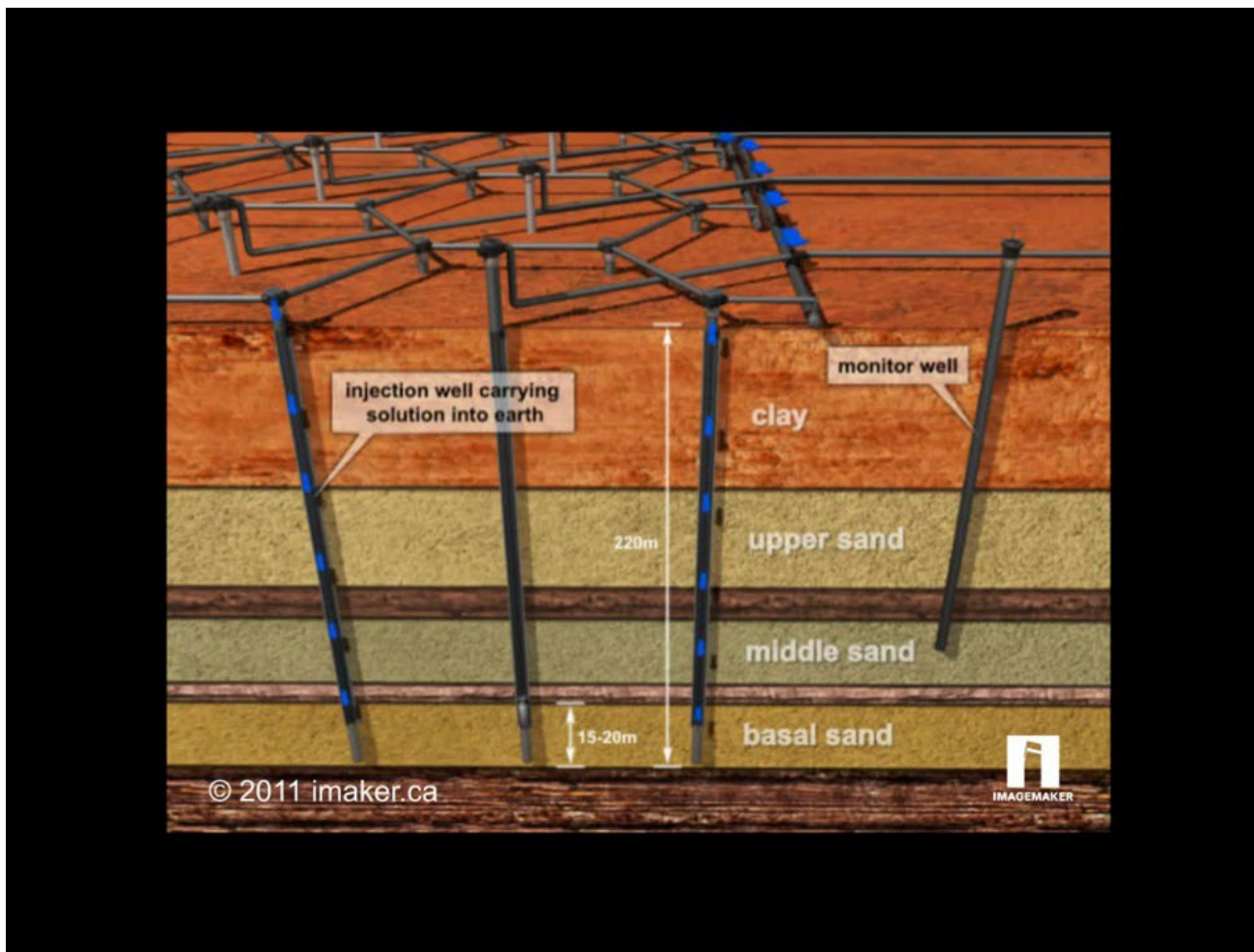


APLICACIÓN A LA MINERÍA DEL URANIO

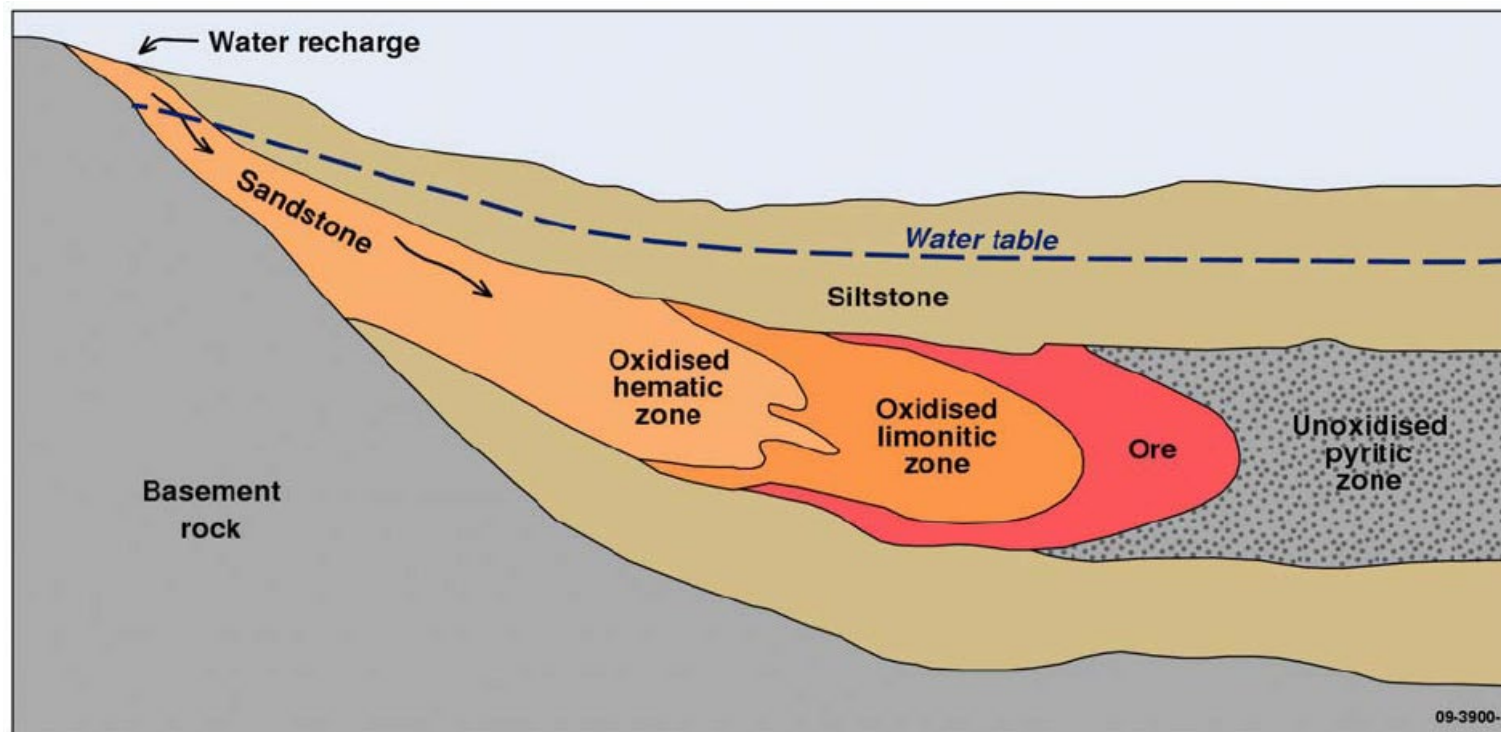
Aplicación a la Minería de Uranio

- Los depósitos de uranio son favorables a la aplicación de la técnica de lixiviación in situ porque aparecen en formaciones de arenas permeables o areniscas, preferiblemente confinadas, a techo y a muro, por capas impermeables siempre por debajo del nivel freático.
- Hay dos regímenes establecidos para la lixiviación in situ del uranio, condicionadas por la geología, las aguas subterráneas y las condiciones medioambientales:
 - **Alcalino:** Si el mineral contiene carbonatos (normalmente en forma de caliza) el uso de lixiviantes alcalinos es más efectivo.
 - **Ácido:** En otros casos es más efectiva la aplicación de lixiviantes ácidos.

Aplicación a la Minería de Uranio



Aplicación a la Minería de Uranio



Aplicación a la Minería de Uranio

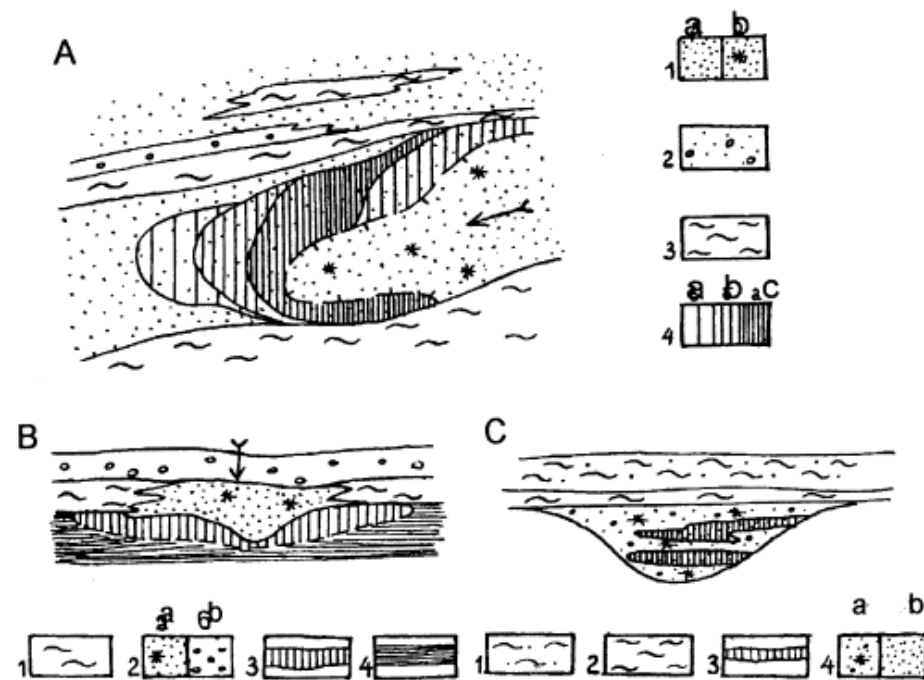


FIG. 3.1. Morphology of uranium deposits in loose rock: A — vertical section of roll-type deposit (vertical scale 10 times horizontal): 1 — sand (a -grey, b — oxidized), 2 — gravel, 3 — clay, 4 — (a, b, c) — high, average, low uranium content; B — vertical section of sheet-like deposition in stratabound deposit: 1 — clay, 2 — oxidized sand (a), gravel (b), 3 — ore deposit, 4 — coal; C — lenticular deposit in basal channel of paleoriver: 1 — loam, 2 — clay, 3 — ore lens, 4 — oxidized sand (a), grey sand (b).

Aplicación a la Minería de Uranio

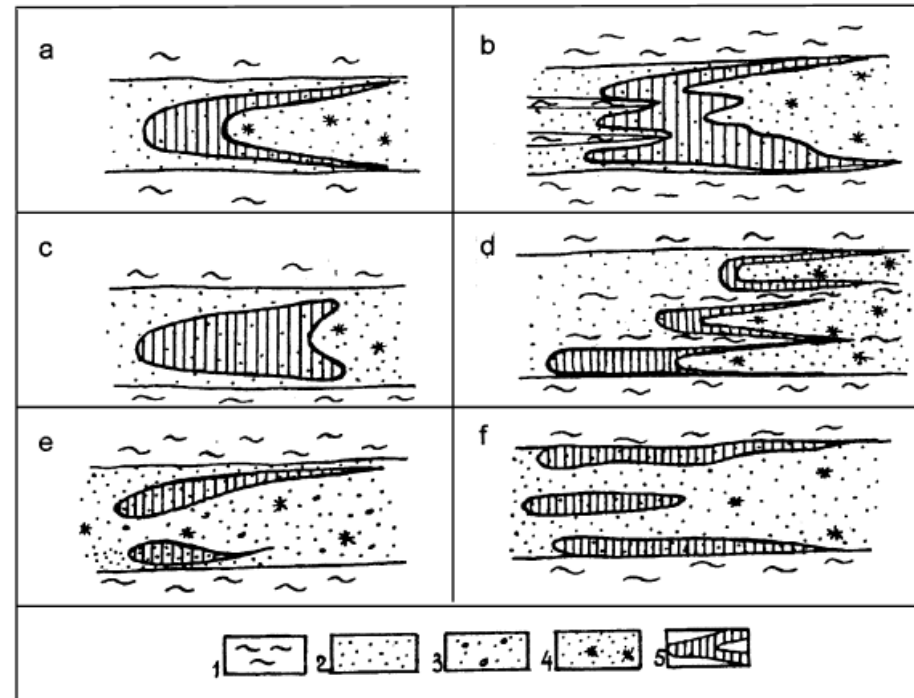


FIG. 3.2. Morphology of roll-type deposits (in section): a — simple roll-type deposit, b — complicated roll, c — simple orebody with predominant roll and weakly developed limbs, d — series of simple rolls within aquifer with zones of reduced permeability, e — stratiform deposits with no roll, f — lenticular deposits at several levels: 1 — clay, 2 — sand, 3 — gravel, 4 — limonitization, 5 — ore deposit.

Aplicación a la Minería de Uranio

- En base a una comparación de experiencias entre la minería de uranio convencional y ISL (tanto ácida y alcalina), se encontró que la minería ISL tener las siguientes ventajas:
 - Bajos costes de capital y operativos del proyecto;
 - El flujo de caja alto en un año;
 - La rápida recuperación de la inversión;
 - Rápido desarrollo del proyecto y puesta en marcha reducida;
 - Bajo consumo de energía y menos equipo necesario;
 - Reducción de la mano de obra por unidad producida;
 - Reducción de exposición a la radiación y disminuir los impactos ambientales (contaminación, etc);
 - Reducción en gran medida los residuos sólidos (sin colas);
 - La recuperación económica de los minerales de baja ley, por lo tanto la utilización de recursos cada vez mayor;
 - Posibilidad de recuperar el uranio de depósitos inaccesibles por otros métodos de extracción.

Aplicación a la Minería de Uranio

- Basado en una comparación de los resultados de estas operaciones es posible enumerar las ventajas y desventajas tecnología ISL de recuperación ácida respecto a a la uso de carbonatos (alcalina).
- Las ventajas de la lixiviación in situ empleando solventes ácidos son:
 - Un mayor grado de recuperación de uranio a partir de mineral (70-90%).
 - Un relativamente corto período de lixiviación de 2-5 años para el ácido (dependiendo del campo de pozos, la permeabilidad de mineral, malla de perforación, etc.).
 - Posibilidad de recuperar los subproductos;
 - La filtración limitada más allá del límite de campo de drenaje debido a la formación de baja permeabilidad química precipita que el flujo de bloques;
 - Además no es necesario la adición de oxidantes debido a la amplia presencia de óxido de hierro de las soluciones recicladas;
 - Posibilidad de auto-restauración (o auto atenuación) de la solución de lixiviación restante debido al auto-limpieza o "re-circulación" de las soluciones contaminadas a través de rocas estériles adyacentes.

Aplicación a la Minería de Uranio

- Las desventajas de la lixiviación in situ empleando solventes ácidos son:
 - El consumo de ácido en los minerales de carbonato aumenta los costos de químicos y puede hacer que el proceso no económico.
 - El riesgo de taponamiento de los poros (es decir, por las burbujas de gas y químicos).
 - Aumento de la concentración de sólidos disueltos en soluciones de lixiviación reciclados (a 15-25 g / l);
 - Utilización obligatoria de los materiales y equipos resistentes a la corrosión, y, comparativamente alto costo de reactivos.



Aplicación a la Minería de Uranio

- Las consideraciones medioambientales que hay que tener en cuenta para el caso de la lixiviación in situ en la minería de uranio son:
 - Acidificación de las aguas subterráneas
 - Movilización de metales pesados radioactivos, incluso hasta la superficie.
 - Modificación del nivel freático, contaminación de acuíferos y del terreno por encima del yacimiento
 - Destrucción del hábitat y otros microorganismos.



Rehabilitación después de lixiviación in situ

- Después de la terminación de una operación de lixiviación in situ, los lodos de desechos producidos deben eliminarse de forma segura, y el acuífero, contaminado por las actividades de lixiviación, se deben restaurar.
- La restauración de las aguas subterráneas es un proceso muy tedioso que aún no se controla completamente.
- Hasta el momento, no es posible restaurar la calidad del agua subterránea a las condiciones anteriores a la explotación.

Rehabilitación después de lixiviación in situ

- Los mejores resultados se han obtenido con el siguiente esquema de tratamiento , que consiste en una serie de diferentes pasos:
 - **Fase 1:** Bombeo de agua contaminada: la inyección de la solución de lixiviación se detiene y el líquido contaminado es bombeado desde la zona de lixiviación. Posteriormente, el agua subterránea limpia fluye desde fuera de la zona de lixiviación.
 - **Fase 2:** como 1, pero con el tratamiento del líquido bombeado (por ósmosis inversa) y re- inyección en la antigua zona de lixiviación. Este esquema resulta en la circulación del líquido .
 - **Fase 3:** como 2 , con la adición de un reductor químico (por ejemplo sulfuro de hidrógeno H_2S o Na_2S sulfuro de sodio) . Esto hace que la precipitación química y por lo tanto la inmovilización de las principales contaminantes .
 - **Fase 4:** Circulación del líquido por bombeo y re-inyección , para obtener condiciones uniformes en toda la antigua zona de lixiviación .

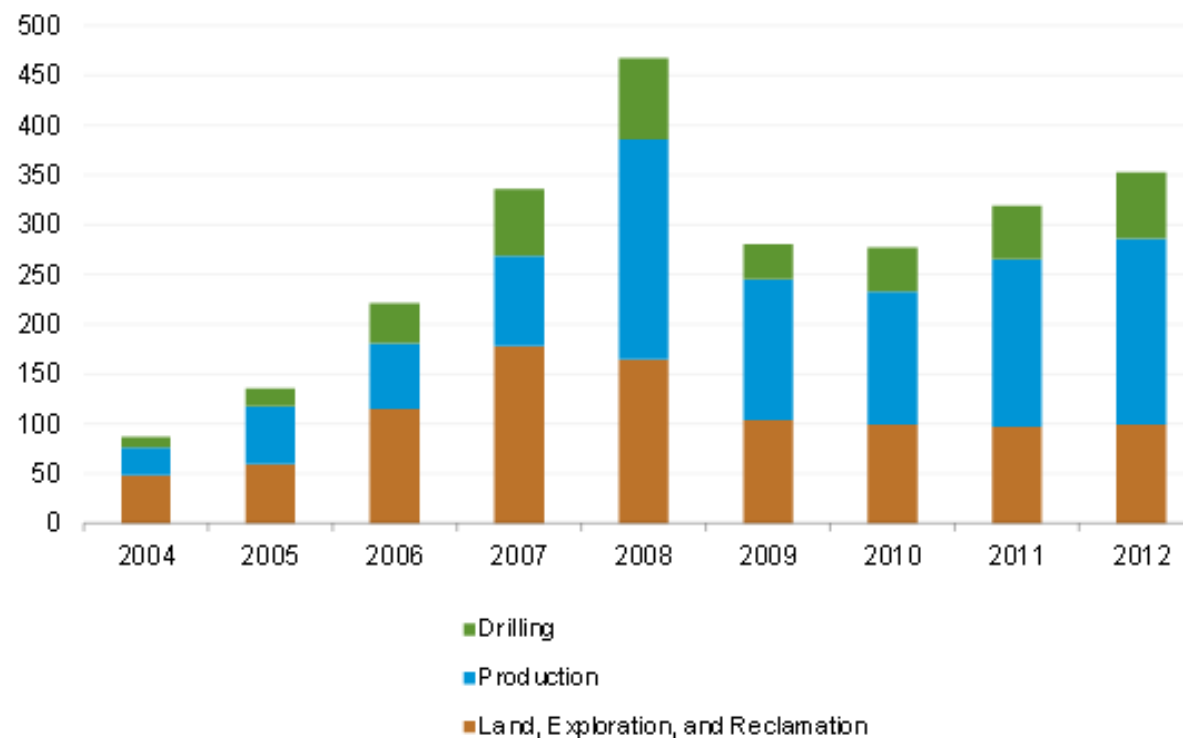
Rehabilitación después de lixiviación in situ

- Pero , incluso con este esquema de tratamiento, varios problemas siguen sin resolverse:
 - Los contaminantes, que son móviles en condiciones de reducción química, como el radio, no se pueden controlar.
 - Si las condiciones de reducción química se perturban más tarde por cualquier razón, los contaminantes precipitados se vuelven a movilizar.
 - El proceso de restauración se toma muy largos períodos de tiempo.
 - No todos los parámetros se pueden reducir apropiadamente.
- La mayoría de los experimentos de restauración conocidos se refieren al régimen de lixiviación alcalina, ya que este esquema es el único utilizado en el mundo occidental operaciones in situ a escala comercial.

Rehabilitación después de lixiviación in situ

Figure 4. U.S. uranium expenditures, 2004-2012

million dollars



Source: U.S. Energy Information Administration: Form EIA-851A, "Domestic Uranium Production Report" (2004-2012).



BIBLIOGRAFÍA

- *"Manual of acid in situ leach uranium mining technology"*, International Atomic Energy Agency, Vienna 2001
- Taylor et al. "Review of Environmental Impacts of the Acid In-situ Leach Uranium Mining Process", CSIRO Land and Water, Australia, 2004.
- Llorente, E. *"Minería Química"*, ITGE, Madrid, 1991
- López, C. *"Manual de Sondeos. Aplicaciones"*. ETSI Minas, UPM, Madrid, 2001
- KBB Underground Technologies GmbH, Hannover, 2011, www.kbbnet.de



Dudas y preguntas



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MINAS Y ENERGIA
LABORATORIO DE TECNOLOGÍAS MINERAS

TECHNICAL UNIVERSITY OF MADRID
HIGHER TECHNICAL SCHOOL OF MINING AND ENERGY ENGINEERING
MINING TECHNOLOGIES LABORATORY