

# Comparación de la Evaporación Solar y la Extracción Directa de Litio para la Producción de Sales de Litio en Salares

La tecnología de evaporación solar a partir de salmueras para la extracción de litio ha sido cuestionada por presentar diversos inconvenientes, tales como enormes pérdidas de agua, largos tiempos de evaporación y su aplicación limitada a las salmueras con elevadas concentraciones de litio. Para evaluar los impactos económicos y medioambientales de la evaporación en nuevos proyectos, se está considerando la aplicación de tecnologías alternativas generalmente conocidas como extracción directa de litio (EDL). Estas tecnologías separan el litio de las salmueras con altos márgenes de rendimiento y selectividad, e idealmente la salmuera agotada puede ser reinyectada al subsuelo para evitar elevadas pérdidas de agua. Este artículo aborda las diferencias

con ventajas y desventajas entre estos dos enfoques para la producción de litio. Para ello, se utiliza información obtenida de la experiencia práctica, así como de estudios técnicos y de factibilidad de proyectos de litio. Como conclusión se constata que no existe una “solución perfecta”, como tampoco argumentos generales a favor o en contra de la extracción directa de litio o de la tecnología clásica por evaporación solar. Se trata siempre de una consideración caso por caso, en la que hay que evaluar cuidadosamente diversas variantes para determinar el enfoque óptimo para cada proyecto individual desde el punto de vista de la relación coste-beneficio, ambiental y socio-económico.

## 1 Introducción

En respuesta a la abrupta caída de los precios del litio, algunas empresas están reconsiderando la planificación de nuevos proyectos, buscando alternativas con menores gastos de capital y costes operativos. Aunque muchos consideran que la evaporación solar con cristalización fraccionada y posterior carbonatación del litio

es el proceso más fiable y económico, su impacto medioambiental, en particular el descenso del nivel freático y el resultante impacto en los recursos hídricos adyacentes, constituyen un motivo de preocupación y se están buscando alternativas más sostenibles. En consecuencia, el gobierno chileno ha decidido aprobar solo proyectos que utilicen la tecnología de extracción directa de litio

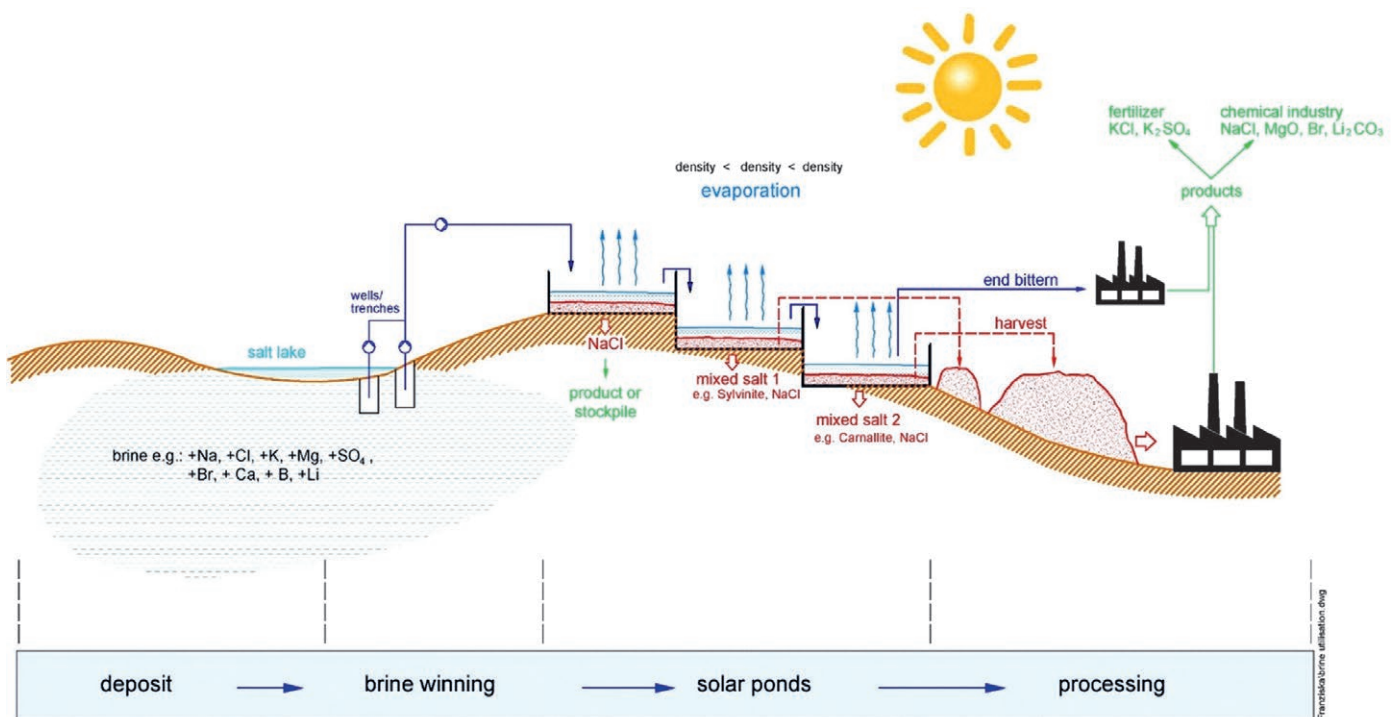


Fig. 1. Evaporación solar de salmueras con cristalización fraccionada. Fuente: K-UTECH

(EDL) para preservar los recursos de agua dulce. En contraste, otros países, como Argentina, permiten a las empresas decidir sobre la tecnología de producción. Por lo tanto, es crucial elegir la tecnología de proceso más adecuada entre las disponibles para cada proyecto de litio.

En ese artículo se discuten las ventajas y desventajas de cada proceso de producción para ayudar a los responsables de la toma de decisiones a seleccionar la tecnología más adecuada para un determinado proyecto de litio.

## 2 Evaporación solar de salmueras con cristalización fraccionada de sales

El proceso tradicional de separación del litio de las salmueras implica la cristalización fraccionada, donde las salmueras se concentran en lagunas de evaporación aprovechando la energía solar (Figura 1). Estas salmueras son altamente corrosivas, con concentraciones de sales de 3 a 8 veces superiores a las del agua de mar, compuestas principalmente por cloruro y sulfato de metales alcalinos y alcalinotérreos. Antes de la producción de sales de litio, las salmueras son concentradas durante 12 a 18 meses hasta que la concentración de litio alcance ca. 2 a 6%. A continuación, se las lleva a la fábrica de litio donde, tras otros procesos de concentración, purificación y recristalización, se las utiliza para producir típicamente sales de carbonato o hidróxido de litio en función de la calidad requerida para la producción de baterías. La eliminación de sustancias interferentes como el magnesio y el sulfato requiere a menudo una precipitación, particularmente utilizando cal. Durante el proceso de concentración, sales menos solubles precipitan y son recolectadas. Para aumentar la rentabilidad del proceso se puede producir productos adicionales como sales de potasio y magnesio, utilizadas particularmente en la industria química y de fertilizantes, para su comercialización.

El proceso de evaporación solar tiene ventajas y desventajas, las cuales se resumen en la tabla 1.

La concentración de salmuera mediante energía solar tiene algunas ventajas incuestionables: se trata de una tecnología probada y escalable que ya se utiliza con éxito desde hace décadas en salares para la extracción de litio. El uso de energía solar en

zonas remotas y de baja precipitación, sin acceso a gas o electricidad, es una excelente manera de ahorrar en costos de operación y reducir la huella de dióxido de carbono del proyecto. Según un estudio de la Universidad Católica de Chile (Memo, 2022), el método de evaporación solar tiene la huella de carbono más baja de todas las tecnologías de producción de litio actualmente empleadas, con una estimación de 4,0 kg de CO<sub>2</sub> equivalente por tonelada de carbonato de litio. Los costes de producción son generalmente inferiores a los de las tecnologías alternativas y pueden reducirse aún más mediante la producción de subproductos comerciales valiosos. Aunque la construcción de grandes lagunas de evaporación requiere elevados costes de inversión, éstos son a menudo inferiores a los de la utilización de tecnologías alternativas altamente sofisticadas.

Por otro lado, no se pueden obviar las deficiencias de la evaporación solar. En primer lugar, se necesitan grandes extensiones para instalar lagunas de evaporación, lo que exige una gran huella ecológica con impactos potencialmente negativos en la fauna local.

El largo tiempo de evaporación, necesario para la concentración del litio y la separación esencialmente de las sales de sodio, magnesio, potasio y calcio, puede retrasar muchos meses el inicio de la producción de litio. Este inconveniente puede minimizarse iniciando la construcción y el llenado de las lagunas de evaporación en la fase inicial de construcción. Por tanto, lo ideal sería ya disponer de la salmuera concentrada cuando la planta de carbonato de litio esté lista para funcionar, y que la primera producción pueda comenzar inmediatamente sin perder tiempo valioso.

Otro inconveniente de la evaporación solar que no es tan fácil de mitigar es su dependencia meteorológica, ya que el tiempo de evaporación depende en gran medida de las precipitaciones anuales, así como de las fluctuaciones del viento y de la temperatura. Sin embargo, un sistema inteligente de gestión de lagunas puede mitigar estas fluctuaciones y producir de forma continua salmuera concentrada de una calidad más estandarizada.

Una de las principales razones en contra del uso de la evaporación solar es la gran cantidad de salmuera que hay que bombear desde el subsuelo hasta las lagunas de evaporación y el hecho de que la mayor parte del agua se pierde por evaporación en zonas donde el agua ya es escasa. Dependiendo de la concentración de litio en la salmuera y de la concentración final de litio deseada, deben evaporarse típicamente entre 200 y 600 m<sup>3</sup> de agua por cada tonelada de carbonato de litio producida. Las salmueras menos concentradas por lo general se concentran aún más en la planta de carbonato de litio mediante ósmosis inversa u otro proceso de evaporación técnica y una gran parte del agua evaporada puede ser recuperada y reutilizada. La protección del equilibrio hidrológico y de las tasas máximas permitidas de bombeo de salmuera en un salar es un punto de discusión constante entre las empresas mineras, las comunidades locales y las agencias medioambientales. El entorno hidrogeológico de un salar es complejo, y la simulación hidrológica para predecir los efectos de las interacciones entre diferentes acuíferos a largo plazo tiene sus limitaciones. En general, se teme que la extracción constante de salmuera reduzca gradualmente el nivel de las aguas subterráneas, lo que podría afectar a los recursos colindantes de agua dulce. Por lo tanto, durante la fase de explotación se

Principales ventajas	Principales desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>Tecnología probada y escalable.</li> <li>Reduce la huella de CO<sub>2</sub> del proceso mediante el uso de energía solar renovable para la evaporación del agua.</li> <li>Cristalización fraccionada de subproductos de valor comercial.</li> <li>OPEX y CAPEX comparablemente bajos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pérdida de agua por evaporación.</li> <li>Requiere grandes superficies para la instalación de piletas, con una elevada demanda de inversión.</li> <li>Largos tiempos de evaporación.</li> <li>Depende del clima.</li> <li>Es necesario almacenar y disponer grandes cantidades de sales residuales.</li> <li>Pérdidas de litio durante concentración solar.</li> </ul>

Tabla 1. Ventajas y desventajas del proceso de evaporación solar.

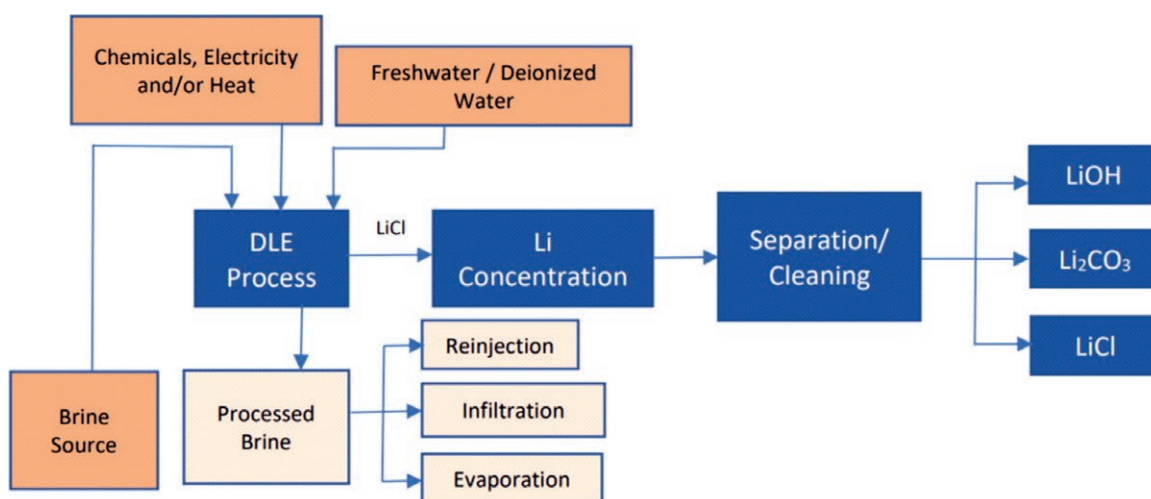


Fig. 2. Proceso EDL general aplicado a las salmueras. Fuente: K-UTEC

requiere un seguimiento estricto y continuo de los volúmenes de extracción de salmuera y de agua dulce, de los niveles de agua y de la calidad del agua, que permita controlar el impacto de la extracción y procesamiento de la salmuera sobre los recursos hídricos. El objetivo de todo seguimiento medioambiental debe ser demostrar que el proyecto no pone en peligro el abastecimiento de agua de las comunidades locales ni repercute negativamente en la flora y la fauna del ecosistema del salar.

En cuanto a los impactos ambientales causados por las lagunas de evaporación durante su funcionamiento, no se ha encontrado en la literatura ningún impacto ambiental significativo validado sobre la población de flamencos u otra fauna. Dado que en la cristalización de las sales no suelen utilizarse sustancias nocivas para el medio ambiente, el principal impacto ambiental de las lagunas de evaporación puede describirse como contaminación visual, lo que puede tener un impacto negativo en el turismo y la población local.

### 3 Extracción directa de litio, EDL

Para superar las limitaciones de la evaporación solar en la extracción de litio, se requieren procesos que extraigan selectivamente el litio de las salmueras de manera eficiente con alto rendimiento y selectividad, permitiendo además la reinyección de la salmuera agotada en el subsuelo. Las tecnologías de extracción directa de litio (EDL) ofrecen tiempos de procesamiento mucho más cortos, posiblemente revolucionando la producción de litio de manera más sostenible. El enfoque principal es reducir rápidamente grandes volúmenes de salmuera a un concentrado de litio de alta calidad, eliminando impurezas para obtener sales de litio aptas para baterías, y reinyectar las salmueras procesadas para proteger el equilibrio hidrológico.

Se han desarrollado sorbentes orgánicos e inorgánicos que selectivamente adsorben litio de soluciones acuosas de sales. Los sorbentes de hidróxido de aluminio (ATH) y manganeso han sido probados en proyectos piloto y a escala industrial. Se están evaluando nuevas tecnologías a nivel de laboratorio y planta piloto de extracción líquido-líquido, así como sorbentes e intercambios

biadores iónicos más selectivos y estables. Además, tecnologías de membrana, a menudo combinadas con procesos electroquímicos están en proceso de desarrollo para la separación selectiva de litio.

Las tecnologías EDL pueden agruparse en cuatro categorías principales:

- Adsorción,
- intercambio de iones,
- extracción con disolventes,
- procesos de membrana/electroquímicos.

El proceso general de EDL puede resumirse como se muestra en la figura 2.

En la actualidad existen pocas aplicaciones industriales para la extracción directa de litio a partir de salmueras, y aún falta información sobre la escalabilidad y la estabilidad de muchas de las tecnologías a largo plazo. Entre los proyectos con una trayectoria demostrada de aptitud industrial son el proyecto Fénix de Livent en Catamarca/Argentina y los proyectos Qinghai Salt Lake de Fozhao Lanke Lithium Co Ltd y Qinghai Salt Lake Lithium Industry en China. Los proyectos mencionados ya utilizan con éxito desde hace años una combinación de preconcentración solar con una adsorción selectiva de litio utilizando un óxido-hidróxido de aluminio (ATH).

Basándose en las experiencias conocidas de la aplicación de las estrategias EDL, se pueden resumir las siguientes ventajas competitivas potenciales en comparación con la evaporación solar:

- Producción más rápida: la primera producción de litio se puede lograr en días o semanas en vez de meses.
- Huella ecológica reducida: la huella ecológica se reduce, ya que no se necesitan grandes superficies para lagunas de evaporación y la salmuera procesada puede ser reinyectada o reinfiltrada.
- Menor alteración del equilibrio hidrológico: Al devolver la salmuera procesada al salar, el balance hídrico es menos alterado.

- Reducción de químicos: En general, la demanda de ciertos productos químicos como la cal y el cloruro de calcio disminuye, mientras que la de ácidos minerales y hidróxido de sodio puede aumentarse, dependiendo de la tecnología utilizada.
- Independencia de las condiciones meteorológicas: con la mayoría de las tecnologías EDL es más fácil generar un producto de calidad constante, independientemente de las condiciones meteorológicas y ambientales locales (precipitaciones, tasa de evaporación, presión atmosférica, etc.).
- Altas tasas de recuperación de litio: las tasas de recuperación de litio de las tecnologías EDL se sitúan típicamente entre el 80 y el 95 %, muy superiores a las de los procesos de evaporación solar no optimizados.
- Limpieza del producto más fácil: la EDL suele reducir las impurezas críticas en la salmuera, lo que facilita la limpieza o el pulido del producto.
- Recursos de baja calidad accesibles: varias técnicas de EDL son aptas para salmueras con bajas niveles de litio, ya sea por su capacidad para procesar grandes volúmenes o por el resultado de una extracción selectiva que concentra el litio. Esto potencialmente viabiliza proyectos de litio de baja ley, aunque el punto de equilibrio depende de variables locales como condiciones hidrogeológicas, ingeniería, logística y ambientales, requiriendo una evaluación individualizada.

• Potencialmente menor CAPEX: la EDL no requiere la construcción de costosas lagunas de evaporación solar y, por lo tanto, puede requerir menores costes de inversión en algunos casos.

Las tecnologías de EDL también se enfrentan a una serie de inconvenientes que hay que tener en cuenta para tomar una decisión sobre su selección, incluyendo:

- Incertidumbres en cuanto a fiabilidad, economía e impacto ambiental: aún faltan más pruebas prácticas de la fiabilidad, eficacia, economía e impacto medioambiental de las tecnologías de EDL a escala industrial durante largos periodos de tiempo.
- El rendimiento depende de la química de la salmuera y de las condiciones locales: El rendimiento de las tecnologías de EDL depende más a menudo de la química de la salmuera, de la disponibilidad de agua dulce y de recursos energéticos, así como de condiciones ambientales como la temperatura ambiente y la presión atmosférica (altitud). Esto requiere un mayor nivel de pruebas piloto para

determinar la idoneidad técnica y económica del proceso en condiciones reales.

- Dilución del yacimiento: La reinyección de la salmuera procesada sin litio al mismo acuífero requiere una gestión cuidadosa para prevenir la degradación gradual de la calidad del recurso por dilución. Al mismo tiempo es esencial entender las condiciones hidrogeológicas del sitio antes de considerar la reinyección para evitar impactos negativos, especialmente en los cuerpos de agua potable.
- Mayores gastos operativos: con varias tecnologías de EDL y dependiendo de la química de la salmuera, se genera una solución diluida de iones de litio que debe concentrarse mediante técnicas de evaporación a menudo alto consumo energético, antes de poder cristalizar el producto deseado.
- No hay producción de subproductos valiosos: las estrategias de EDL no suelen tener en cuenta la separación y el procesamiento de productos de valor comercial, como las sales de potasio o magnesio.
- Mayor demanda de agua dulce: dependiendo de la tecnología, se requieren cantidades bastante grandes de agua dulce para el proceso, de la que una parte puede recuperarse para su reutilización. Esto supone un reto logístico y medioambiental, sobre todo en regiones áridas donde el agua dulce es un recurso escaso.

Comparación tentativa de evaporación solar con EDL

	Evaporación Solar	EDL
Tecnología probada y escalable	si	en parte (adsorción con ATH)
Superficie necesaria	muy alta	baja
CAPEX necesario	US\$ 15.000 – 34.000/tpa LCE	US\$ 26.000 – 54.000/tpa LCE
OPEX	US\$ 3000 – 5300/t LCE	US\$ 3100 – 7800/t LCE
Tasa de recuperación del litio	50 – 85 %	80 – 95 %
Costes de limpieza del producto	medio – alto	bajo – medio
Tiempo hasta la primera producción	larga (dependiendo de logística)	corto (dependiendo de logística y tecnología)
Posibilidad de explotar recursos de baja ley	bajo (típico > 500 mg/l Li es viable)	medio – alto (< 500 mg/l Li posible)
Dependencia de la química de la salmuera	medio – alto	bajo – alto
Demanda de agua dulce	bajo (a menudo 10-25 m <sup>3</sup> /t LCE) <sup>1)</sup>	medio – alto (típico 30 – 150 m <sup>3</sup> /t LCE) <sup>2)</sup>
Demanda de energía	bajo	medio – alto
Demanda de químicos	medio – alto (e.g. cal, CaCl <sub>2</sub> )	bajo – alto (e.g. HCl, NaOH)
Producción de subproductos comercializables	si (ej. KCl, Mg(OH) <sub>2</sub> )	no
Dependencia climática de la producción	medio – alto	bajo
Pérdidas de agua por evaporación	muy alto (a menudo entre 200 y 600 m <sup>3</sup> /t LCE)	muy pequeño o insignificante con reinyección de salmuera <sup>3)</sup>
Alteración del equilibrio hidrológico	bajo – alto	potencialmente bajo
Huella de carbono (CO <sub>2</sub> )	bajo	medio
Huella ecológica	medio – grande	pequeño – medio
Generación de residuos	medio – grande	pequeño

<sup>1)</sup> El consumo neto de agua puede ser incluso negativo, es decir, técnicamente es factible generar agua dulce a partir de salmueras y efluentes.

<sup>2)</sup> En estudios piloto se ha demostrado que con algunas tecnologías es posible requerir menos de 20 m<sup>3</sup>/t de LCE.

<sup>3)</sup> Significativamente mayor si se infiltra la salmuera agotada.

Tabla 2. Comparación semicuantitativa de las tecnologías de EDL con la evaporación solar.



#### 4 Una comparación semicuantitativa de la evaporación solar y de la EDL

La comparación de la evaporación solar con la cristalización fraccionada de sales y de la EDL requiere un conocimiento profundo de las características del proyecto y del proceso. Deben tenerse en cuenta las características geoquímicas e hidrogeológicas, así como la disponibilidad de recursos energéticos e hídricos. Por otra parte, las propiedades técnicas, económicas y ecológicas difieren para cada proveedor de tecnologías de EDL. Una evaluación exhaustiva de las distintas tecnologías de EDL queda fuera del alcance de este artículo. Sin embargo, basándonos en nuestra propia experiencia y en los resultados publicados de estudios técnicos o de factibilidad (ver por ej. Vera et al., 2023, base de datos SEDAR), la tabla 2 presenta una comparación semicuantitativa de las tecnologías de EDL con la evaporación solar.

#### Referencias

- Memo, Economía, Política y Poder (2022), Litio: la huella de carbono argentina es más alta que la chilena, 29.12.2022.
- Olivia Murphy y Maha N. Haji (2022), A review of technologies for direct lithium extraction from low Li+ concentration, Front. Chem. Eng., 30 November 2022, Sec. Sustainable Process Engineering Volume 4 – 2022.
- Vera, M.L., Torres, W.R., Galli, C.I. et al. Environmental impact of direct lithium extraction from brines. Nat Rev Earth Environ 4, 149–165 (2023).
- SEDAR base de datos, <https://www.sedarplus.ca/>

En conclusión, no existe una “solución perfecta”, ni argumentos generales a favor o en contra de la extracción directa de litio o de la tecnología clásica de evaporación solar. Se trata siempre de una consideración caso por caso, en la que hay que valorar cuidadosamente ciertas variantes básicas para encontrar el enfoque óptimo para cada proyecto individual desde el punto de vista coste-beneficio, ambiental y socio-económico.

#### Más información

Dr. Oswald Eppers  
[oswald.eppers@k-utec.es](mailto:oswald.eppers@k-utec.es)  
<https://www.k-utec.de/es>

#### Autor

Dr. Oswald Eppers, Representante de K-UTEC AG Salt Technologies en América de Sur, Buenos Aires/Argentina



## Más de 70 años de experiencia en tecnologías de sales

### La tradición se une a la innovación

K-UTEC es una empresa de ingeniería e investigación que es considerada como un centro tecnológico para todas las tecnologías relacionadas con la minería y la ingeniería de procesos en la industria de extracción y procesamiento de sales.

Las áreas centrales de trabajo son la exploración y evaluación de yacimientos de sales, la planificación de la extracción y el procesamiento químico-físico de materias primas, el desarrollo de conceptos para el aprovechamiento posterior de cavidades mineras y la supervisión de instalaciones mineras activas y clausuradas.

Además de las sales procedentes de la industria tradicional de la potasa y la sal gema, K-UTEC se dedica desde hace años cada vez más a la extracción de compuestos de litio.

K-UTEC opera en todo el mundo.

**K-UTEC**  
SALT TECHNOLOGIES

K-UTEC AG Salt Technologies  
 Sondershausen, ALEMANIA  
[www.k-utec.de](http://www.k-utec.de)