

manual de buenas prácticas

# **inyección profunda** de **rechazos de** **desalación**

Ana Berreteaga

Elena Campos

Irene De Bustamante

José Antonio Iglesias

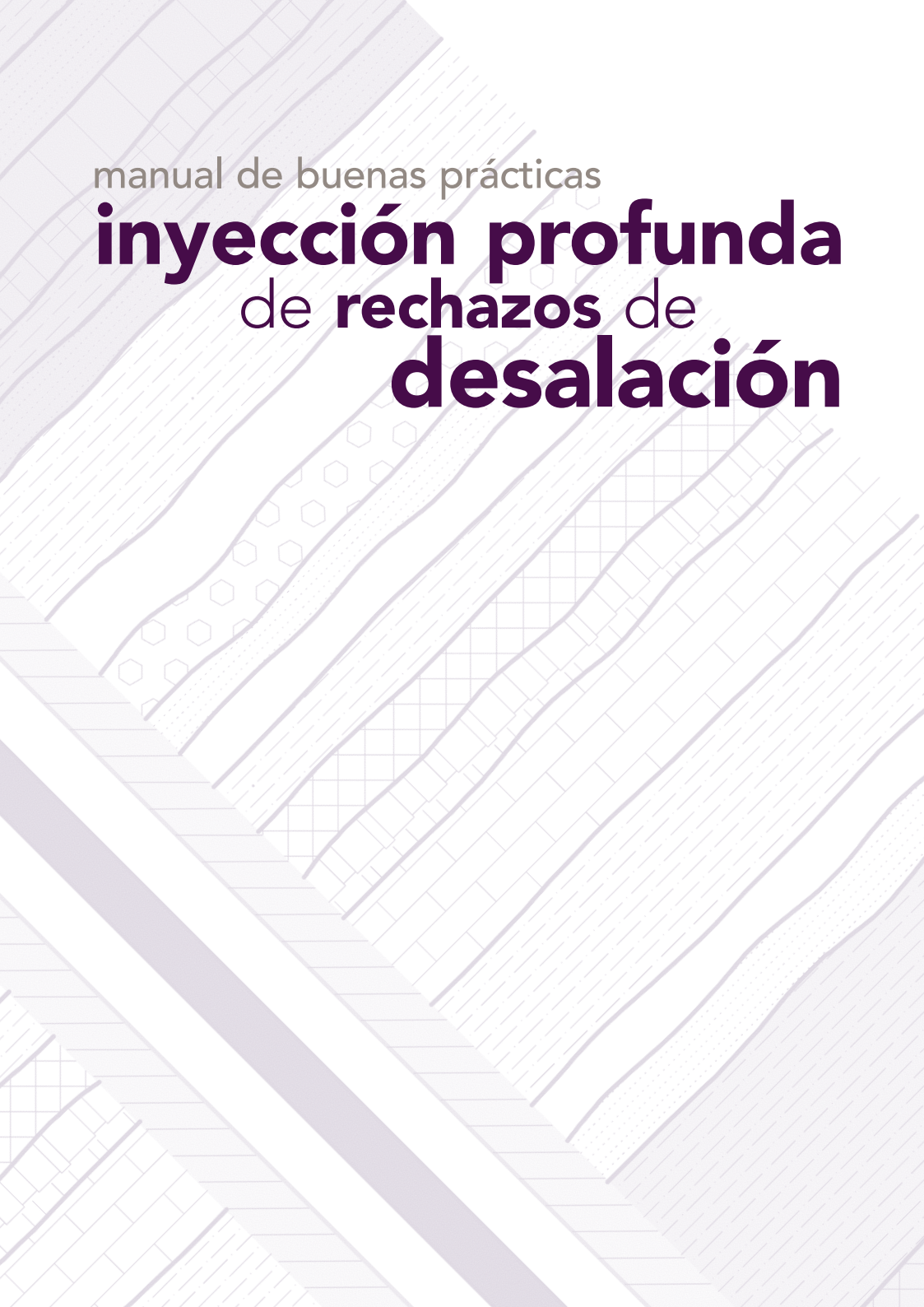
Javier Lillo

Domingo Zarzo



manual de buenas prácticas

# **inyección profunda** de **rechazos de** **desalación**



# índice

manual de buenas prácticas  
**inyección profunda**  
de rechazos de  
**desalación**

Prólogo .....	4
Resumen .....	8
Introducción .....	10
<b>Fases de una operación de inyección de rechazos</b> .....	<b>14</b>
1. Fase de estudio .....	15
1.1. Selección del emplazamiento .....	15
1.1.1. Características que debe cumplir una formación geológica para servir de emplazamiento .....	15
1.1.2. Tipos de emplazamientos para la inyección .....	16
1.1.3. Criterios para la selección del emplazamiento .....	17
1.2. Compatibilidad de fluidos .....	18
1.3. Recopilación de datos y cálculo de parámetros .....	19
2. Fase de diseño .....	21
2.1. Datos necesarios para el diseño del pozo y parámetros mínimos a establecer .....	22
2.2. Diseño del pozo .....	23
2.2.1. Esquema básico de las fases constructivas de un pozo de inyección profunda .....	23
2.2.2. Diseño de las fases constructivas .....	25
2.3. Diseño de la monitorización .....	30
3. Autorización .....	32
4. Fase de construcción o ejecución .....	33
4.1. Requisitos mínimos .....	33
4.2. Controles durante la realización del pozo .....	33
4.3. Comprobación de la estabilidad del pozo .....	34
5. Fase de operación .....	35
5.1. Control durante la inyección del residuo .....	35
5.1.1. Índice de inyectividad .....	37
5.2. Algunos posibles problemas durante la operación de inyección .....	37
5.2.1. Obturación parcial del almacén .....	38
5.2.2. Problemas en la migración del residuo .....	40
5.2.3. Disminución del rendimiento de la inyección con el tiempo .....	40
6. Fase de clausura .....	41
<b>Abreviaturas, bibliografía y portales web de interés</b> .....	<b>46</b>

# prólogo

manual de buenas prácticas  
**inyección profunda**  
de rechazos de  
**desalación**



Lo dije hace ya algún tiempo, y hoy lo tengo que repetir: ¡No falta agua, sobra sal!

Porque la sal, que es fuente de vida y da sabor a los alimentos, hace inutilizable al agua para muchos usos, y es por ello que la tecnología ha puesto empeños en la desalación y la desalobración, y ha conseguido avances muy notorios, especialmente en cuanto a costes y rentabilidad de estas operaciones...

Pero (y siempre hay un “pero”), cuando estas operaciones se realizan alejadas del mar, el problema lo plantean esas salmueras, rechazo de la operación, que hay que confinar, para hacer recomendable esta operación, necesaria y beneficiosa. Y ahí es donde el almacenamiento profundo, con el resguardo de barreras geológicas, puede ofrecer soluciones a las buenas prácticas, que permitan el afianzamiento de estas operaciones tierra adentro, en la lejanía de los mares.

Oportunidad, por tanto, no le falta a esta publicación, cuyas misiones deben ser las de difundir tecnologías, ofrecer caminos de actuación, ayudar a resolver incógnitas, colaborar en la selección de emplazamientos adecuados, aportar herramientas de buen hacer en el diseño y construcción de los dispositivos de inyección, y facilitar el acceso a metodologías apropiadas de control y mantenimiento.

En este sentido la experiencia muestra problemas derivados de inadecuados planteamientos, de errores del pasado, de técnicas inapropiadas, de afecciones hoy casi irreparables, y por ello, y para no recaer en esos problemas, en este Manual se muestra, paso a paso, el camino para un buen proceder, que debe conducir al encapsulamiento y confinamiento profundo de los rechazos de la desalación.

Todo ello porque, siendo sin duda la inyección una solución apropiada, también es igualmente cierto que requiere de un conocimiento profundo, de un conjunto multivariado de aspectos y condicionantes, para poder culminar con éxito esta operación. Y esto no sólo es cuestión que atañe a los técnicos, con responsabilidad en este quehacer, sino que también la utilidad se extiende a quienes, desde ámbitos de gestión del territorio y del subsuelo, tiene en su poder la llave para que se puedan realizar estas actuaciones.

Pero, además, aquí se sacan enseñanzas y aplicaciones para otras actuaciones hidrogeológicas como la de recarga artificial de acuíferos, a través de sondeos profundos; o la creación de barreras positivas frente a la intrusión salina; o la explotación de yacimientos de diferentes sales por disolución; o la minería por lixiviación profunda natural o ácida... Y esto son servicios que "sin querer, queriendo" presta este Manual de buenas prácticas.

Y es así que, en una lectura sencilla, de fácil comprensión para los no técnicos, y adecuada para los que lo son, se pasa revista y esquematizan aspectos trascendentes como lo son los requisitos geológicos para ese confinamiento en profundidad, en los que no puede pasar desapercibida la similitud, en algunos casos, entre el almacenamiento de estos fluidos y el de CO<sub>2</sub>, al que se están dedicando hoy tantos esfuerzos, en actuaciones que buscan reducir el "efecto invernadero".

Y aspecto importante es el referente a la compatibilidad de la mezcla de fluidos, con todas sus implicaciones de: reacciones físico-químicas, efectos sobre la roca almacén y sobre la instalación, perdurabilidad y vida útil, consecuencias no deseadas... Aquí debe entrar en juego la modelación de esas reacciones, que puede ser compleja y a veces difícil de simulación, por la serie de vectores que en ella inciden, exógenos y endógenos, sin excluir a aquellos que incluso pueden jugar papales contrapuestos, como los relacionados con presión y temperatura, pero también con procesos de absorción y adsorción, o con floculación y solubilidad,... Mundo todo éste apasionante y en el que científicos y técnicos, investigadores y usuarios pueden encontrar sendas por descubrir, con lo cual el manual será también, sin duda, inspiración para estudiosos y preocupados por el medio ambiente, pero igualmente para quienes buscan derroteros para ayudar a mejorar nuestra calidad de vida, y a suplir las necesidades de un mundo en el que día a día se traspasan barreras tecnológicas.

Ruego que, llegado a este punto, se me permita una reticencia. Para esa inyección se habla generalmente en el manual de "pozos", y me voy al Diccionario de la Lengua Española (RAE, 2001), y en su primera acepción encuentro una definición sin duda obsoleta y propia de zahoríes y radiestesistas: "*Perforación que se hace en la tierra para buscar una vena de agua*", sin dejar de ser inadecuada, también, la que lo define como "*Hoyo profundo para bajar a las minas*". Algún día la "docta corporación" debería definir con propiedad lo que es pozo





y lo que es sondeo (que entiendo es el que se realiza con una sonda, a la que el diccionario define como *"Barrena que sirve para abrir en el terreno taladros de gran profundidad"*), así se evitarían confusiones y todos nos entenderíamos mejor.

Importante es, sin duda, el abordaje que se hace en cuanto al diseño de esos pozos (para mi "sondeos") de inyección, clave para el éxito de la operación, para evitar problemas con los contextos hidrogeológicos que atraviesa, y para la vida y perdurabilidad de la obra. Y también se aborda lo referente a equipamiento de tuberías y obturadores y, como no podía ser menos, lo que constituyen los controles de la operación, para garantía de la misma, previsión de acciones correctoras, y base de seguimiento y decisiones.

Para completar el panorama y la amplia visión que se ofrece, en este manual, se hace un repaso a los distintos problemas que se pueden presentar, de muy diferente etiología, hasta llegar al planeamiento de clausura de la instalación.

Tal vez alguien podría pensar que un manual de apenas 50 páginas debería pasar casi de puntillas sobre muchos aspectos, sin embargo, conforme se desgrana y saborea su contenido, se percibe más y más la utilidad del mismo y el aporte fundamental que va a prestar a los que se inician en este quehacer, pero también a los que lo rondamos desde hace mucho tiempo. Es así que este manual debe traspasar fronteras y tener máxima difusión en los países hermanos de Iberoamérica, donde tanto se aprecian los aportes bibliográficos españoles.

Con todos estos componentes se puede asegurar la oportunidad de esta publicación, fruto del buen andar conjunto de la Universidad de Alcalá de Henares, a través de IMDEA Agua, y del Ministerio de Economía y Competitividad, a través de Consolider - Tragua.

**Rafael Fernández Rubio**

*Dr. Ingeniero de Minas*

*Premio Rey Jaime I a la Protección del Medio Ambiente*

# resumen

manual de buenas prácticas

**inyección profunda**  
de rechazos de  
**desalación**

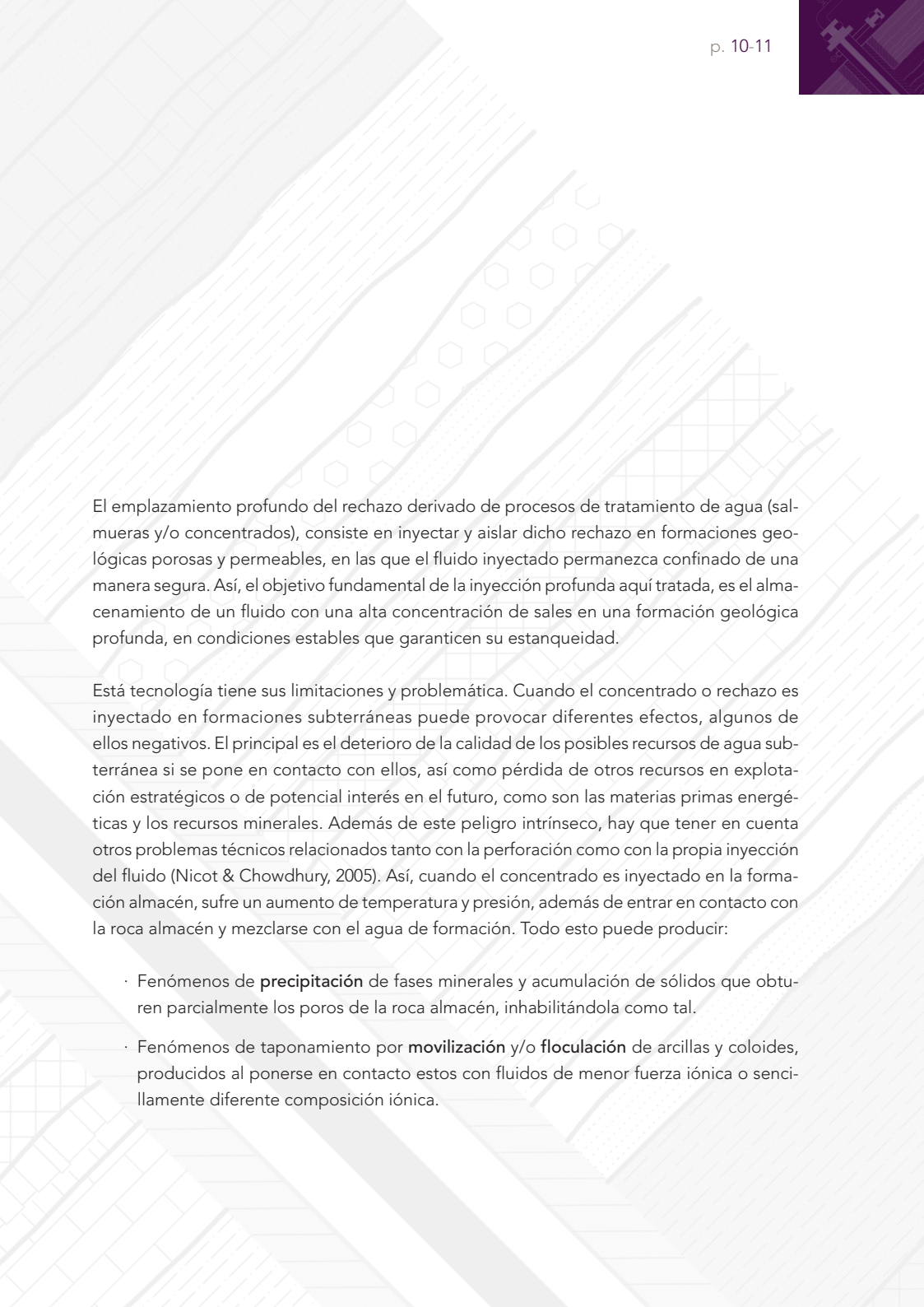
Existen diversos documentos que analizan las recomendaciones de seguridad para la inyección profunda del rechazo procedente de los distintos tratamientos de agua, como son la reutilización y la desalación (Van Voorhess, 2001, Ramos 2001, 2003; Frazier *et al.*, 2006; U.T.E Aquaplan-TEC4, 2007; UIC, 2010). Este documento pretende ser un manual de buenas prácticas que reúna todos aquellos requisitos, recomendaciones y directrices básicas necesarias para la realización de una inyección profunda del rechazo. Para ello se han tenido en cuenta las diferentes fases de dicho proceso (selección del emplazamiento y estudios previos, diseño, autorización, construcción de pozo, operación y clausura) y los requisitos que se han de cumplir en cada una de ellas.

Este Manual, se ha realizado dentro del *Proyecto de Investigación para el Desarrollo de Soluciones Innovadoras en la Gestión de los Vertidos de Salmueras Procedentes de Desaladoras* (Ref. FIT-310200-2007-225; 009/SGTB/2007/2.4; IAP-560620-2008-69) financiado por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Ministerio de Medio Ambiente y Ministerio de Ciencia e Innovación y con la colaboración del Programa Consolider-Tragua *Tratamiento y Reutilización de Aguas Residuales para una Gestión Sostenible* (Ref. CSD2006-00044).

# introducción

manual de buenas prácticas

**inyección profunda**  
de rechazos de  
**desalación**



El emplazamiento profundo del rechazo derivado de procesos de tratamiento de agua (salmueras y/o concentrados), consiste en inyectar y aislar dicho rechazo en formaciones geológicas porosas y permeables, en las que el fluido inyectado permanezca confinado de una manera segura. Así, el objetivo fundamental de la inyección profunda aquí tratada, es el almacenamiento de un fluido con una alta concentración de sales en una formación geológica profunda, en condiciones estables que garanticen su estanqueidad.

Esta tecnología tiene sus limitaciones y problemática. Cuando el concentrado o rechazo es inyectado en formaciones subterráneas puede provocar diferentes efectos, algunos de ellos negativos. El principal es el deterioro de la calidad de los posibles recursos de agua subterránea si se pone en contacto con ellos, así como pérdida de otros recursos en explotación estratégicos o de potencial interés en el futuro, como son las materias primas energéticas y los recursos minerales. Además de este peligro intrínseco, hay que tener en cuenta otros problemas técnicos relacionados tanto con la perforación como con la propia inyección del fluido (Nicot & Chowdhury, 2005). Así, cuando el concentrado es inyectado en la formación almacén, sufre un aumento de temperatura y presión, además de entrar en contacto con la roca almacén y mezclarse con el agua de formación. Todo esto puede producir:

- Fenómenos de **precipitación** de fases minerales y acumulación de sólidos que obturan parcialmente los poros de la roca almacén, inhabilitándola como tal.
- Fenómenos de taponamiento por **movilización** y/o **floculación** de arcillas y coloides, producidos al ponerse en contacto estos con fluidos de menor fuerza iónica o simplemente diferente composición iónica.

- **Disolución** de la roca almacén, lo que puede provocar colapsos y reducir ampliamente el volumen de almacenamiento, o incluso dar lugar a consecuencias en superficie (colapsos y subsidencias).
- **Superación** de la tasa de inyección que la formación hospedante es capaz de soportar.

Para evitar estos fenómenos, es necesario establecer unos criterios y requisitos básicos, tanto a la hora de seleccionar la formación donde depositar la salmuera, como en el resto de fases del proceso de inyección. La complejidad de cualquier proyecto de almacenamiento subterráneo hace necesario evaluar cada caso de manera individualizada, pudiéndose establecer criterios de seguridad y medioambientales a aplicar en todos los casos. En este manual se establecen algunos criterios y recomendaciones para cada fase de un proyecto de inyección, desde la selección de formaciones adecuadas para el emplazamiento subterráneo o profundo del rechazo, hasta la clausura del pozo de inyección. Este manual trata de aunar todas las recomendaciones de seguridad, basándose en trabajos y experiencias de inyección previos (Van Voorhess, 2001, Ramos 2001, 2003; Frazier *et al.*, 2006; U.T.E Aquaplan-TEC4,2007; UIC, 2010). Estos autores no están citados en cada una de las recomendaciones que aparecen aquí, sin embargo, todas ellas están tomadas de uno u otro modo en estos trabajos y/o experiencias. Hay que tener en cuenta que son criterios mínimos, y que la especificidad del fluido a inyectar y las condiciones geológicas de cada caso concreto, pueden determinar que haya que establecer criterios adicionales.

El objetivo final de todas las recomendaciones es la realización de una inyección profunda segura, de manera que se evite hipotecar otros recursos, como el agua subterránea, y asegurar la eficiencia de la inyección, impidiendo el deterioro de la formación almacén.



# fases de una operación de inyección de rechazos

manual de buenas prácticas  
**inyección profunda**  
de rechazos de  
**desalación**



Cada una de las fases presenta una problemática distinta, requiriendo un nivel mínimo de control y vigilancia en el desarrollo de cada una de ellas.

## 1. Fase de estudio

---

Previamente al diseño de un proyecto de inyección profunda, es preciso analizar y comprobar que: a) la formación almacén sea válida como tal y b) evaluar los posibles problemas de incompatibilidad de fluidos (precipitación, disolución etc.) que se puedan producir y buscar una solución para estos. Dichos requerimientos (a y b) son fundamentales y si no quedan resueltos, el proyecto de inyección no debería llevarse a cabo.

### 1.1. SELECCIÓN DEL EMPLAZAMIENTO

#### 1.1.1. Características que debe cumplir una formación geológica para servir de emplazamiento del rechazo

Es necesario que la formación almacén cumpla una serie de requisitos geológicos y legales que se detallan en el Cuadro 1.

Requisitos	Características	Criterios específicos
Geológicos	Profundidad del emplazamiento	Formación almacén que se sitúe por debajo (a más profundidad) de la última fuente (acuífero) de agua potable subterránea. Consideradas como tales, al menos, las masas de agua que figuren en los registros de zonas protegidas de los Planes Hidrológicos de Cuenca.
	Litológicas y texturales	Rocas porosas y permeables.
		Formación almacén con capacidad suficiente para almacenar de forma segura la cantidad o volumen de fluido que se quiere inyectar.
		Existencia de formaciones o estructuras impermeables que confinen la formación almacén en la que inyectar y mantengan el residuo aislado de acuíferos que contengan agua con calidad apta para algún tipo de uso y de otros posibles recursos naturales. La formación almacén debe estar perfectamente confinada, tanto en la vertical como en la lateral.
	Continuidad	Las características de las formaciones (almacén y confinantes) han de mantenerse constantes.
	Tectónicas	Áreas tectónicamente estables. El área donde se localiza la inyección no debe presentar actividad sísmica significativa, ni ser un área potencialmente sísmica. Se debe comprobar la inexistencia de fallas activas cercanas o que afecten a las formaciones confinantes, ya que podría constituir una vía de escape del residuo almacenado.
	Geotérmicas y de presión	Áreas sin gradientes geotérmicos anómalos, y formaciones geológicas y/o fluidos de formación que no se hallen en condiciones de sobrepresión. Por tanto, se han de conocer la presión y temperatura del almacén en toda su extensión.
Hidráulicas	Régimen hidráulico de la formación conocido, ya que la estrategia de inyección ha de ser coherente con él.	
Geoquímicas	Compatibilidad geoquímica entre la composición de la roca almacén, la del agua de formación que alberga esta, y el fluido a inyectar. De manera que se evite la disolución o precipitación de grandes cantidades de nuevos minerales al producirse la interacción agua inyectada-agua de formación-roca encajante, así como la floculación de arcillas.	
Legales	Son diferentes en cada país, (apartado 3 de este manual).	

Cuadro 1. Características que debe cumplir una formación para ser considerada como potencial almacén del rechazo proveniente de la desalación.

### 1.1.2. Tipos de emplazamientos para la inyección de salmueras

Una vez establecidas las características que ha de cumplir la formación para ser un potencial almacén de salmueras (Cuadro 1), se deduce que los posibles emplazamientos del rechazo se reducen a los siguientes tipos (Cuadro 2):



Posibles emplazamientos para la inyección de salmueras	Formaciones permeables profundas.
	Yacimientos de gas y petróleo abandonados o en recuperación asistida.

Cuadro 2. *Posibles emplazamientos para la inyección profunda del rechazo de las plantas de tratamiento de agua según los criterios generales establecidos en el cuadro 1.*

Visto esto y dado el auge actual y la gran cantidad de información generada para el almacenamiento de  $\text{CO}_2$ , cabe destacar que los almacenes para salmuera son prácticamente los mismos que para el  $\text{CO}_2$  exceptuando que:

- El almacén de  $\text{CO}_2$  tiene necesariamente que estar a más de 800 metros de profundidad, el almacén de salmuera no.
- Las capas de carbón no explotables y los domos salinos se contemplan como posibles almacenes de  $\text{CO}_2$ , pero no de salmuera.

### 1.1.3. Criterios para la selección del emplazamiento

Son varios los criterios que conviene seguir para seleccionar la formación almacén más conveniente, de entre todas aquellas identificadas como potenciales almacenes. Sea de manera directa o indirecta, estos criterios tienen un acusado componente económico y/o ambiental:

- Cercanía al punto de generación del rechazo.
- Información geológica disponible (cartografía, sondeos, geofísica, etc.). La disponibilidad de una buena base de información obtenida previamente en proyectos de exploración (petróleo, yacimientos minerales, almacén de  $\text{CO}_2$ ) supone un importante abaratamiento de costes en las fases iniciales del proyecto de inyección, y una notable disminución del tiempo requerido para llevar a cabo dichas fases.
- Existencia de infraestructura previa utilizable o adaptable. Aquí se incluyen conducciones, vías de acceso, etc.
- Profundidad de la formación almacén. Hay que tener en cuenta que cuanto más profunda se localice la formación almacén, más elevado será el coste de la construcción, el bombeo y el futuro mantenimiento.
- Existencia de explotaciones de otros recursos naturales. Se trata generalmente de un factor negativo, excepto en la opción económicamente más rentable (aunque no siem-

pre posible) de inyección de salmuera en formaciones almacén de hidrocarburos para una recuperación asistida de estos.

- Existencia de áreas protegidas. Precisamente lo que se pretende con la inyección de salmueras es minimizar la afección al medio, por ello hay que considerar, además de los efectos de la propia inyección, aquellos derivados de la construcción e instalación de infraestructuras, incluyendo la ejecución del pozo.
- Geológicamente, además de los requisitos antes citados, es preferible que en la medida de lo posible, se eviten los medios corrosivos, ya que pueden producir el deterioro del sistema de inyección. También es de gran importancia tener en cuenta la geología estructural existente, ya que dependiendo de la forma y la existencia o no de estructuras geológicas, el fluido tenderá a tener un desplazamiento u otro dentro de la formación.

Estos criterios no son excluyentes, pero hay que ponderar su importancia en cada caso, para las potenciales formaciones y posibles puntos de inyección asociados a estas.

## 1.2. COMPATIBILIDAD DE FLUIDOS (CUADRO 3)

Criterios	Condiciones y características
Compatibilidad de fluido al entrar en contacto con la roca almacén y con el fluido que alberga	Evitar la precipitación que provocaría la obturación del almacén. Evitar la disolución.
Diferencia de densidad	Es preferible que la densidad del residuo inyectado sea mayor que la del líquido de la formación.
Características mínimas que controlar	Naturaleza y concentración de las especies disueltas, solubilidad de estas en las condiciones resultantes de la mezcla del fluido inyectado con el agua de formación (temperatura, presión, pH, estado redox, etc.), características biológicas, como presencia de microorganismos cuya actividad metabólica pueda afectar a los diferentes procesos. Es conveniente llevar a cabo pruebas en la zona de almacenamiento o, al menos, simulando las condiciones del almacenamiento.

Cuadro 3. *Criterios relativos a las condiciones y características del fluido a inyectar.*

Las características físico químicas del residuo a inyectar (teniendo en cuenta todos los tratamientos químicos, físicos, biológicos o térmicos que puede sufrir el residuo antes de ser inyectado) deben ser compatibles con los componentes mecánicos del sistema de inyección, con el fluido natural que alberga la formación almacén y con la naturaleza de la propia for-



mación almacén. De manera que no se produzca una corrosión que afecte al sistema de inyección, ni reacciones de precipitación o de disolución que puedan llegar a obturar el almacén o a provocar una movilización de material que llegue generar colapsos (apartado 2.3 de este trabajo). Así, es importante evitar una composición de fluido que al interactuar con la roca almacén y el fluido que esta alberga, produzca la conversión de especies solubles en insolubles, dando lugar a precipitaciones, que puedan llegar a taponar el sistema de inyección. Igualmente, un fluido con diferente carga iónica podría producir la floculación de coloides en suspensión, lo que puede ocluir los poros y huecos intergranulares, disminuyendo drásticamente la porosidad eficaz.

La diferencia de densidad del residuo a inyectar y el fluido existente en la formación almacén, condicionan considerablemente el movimiento que puede tener el fluido inyectado en la formación. Es preferible que la densidad del residuo sea mayor que la del fluido de la formación, pues el residuo se dispersará aprovechando todos los espacios de almacenamiento, en caso contrario el residuo quedará localizado en las partes superiores de la formación.

### 1.3. RECOPIACIÓN DE DATOS Y CÁLCULO DE PARÁMETROS IMPRESCINDIBLES

A continuación se enumeran un mínimo de datos imprescindibles a conocer y parámetros a calcular en la fase de estudio, antes de llevar a cabo la inyección.

Recopilación de datos (Cuadro 4):

<b>Datos de las formaciones almacén y confinantes</b>	Formación almacén	Litología y composición, porosidad, permeabilidad, presión, temperatura, condiciones hidrogeológicas y parámetros hidráulicos, riesgo sísmico, continuidad lateral, espesores, estructuras geológicas, presión de fracturación y volumen disponible para el almacenamiento.
	Formaciones sello o confinante	Grado de impermeabilidad, continuidad, litología, composición, estructuras geológicas, presión de fracturación y sísmica existente.
<b>Datos de los fluidos implicados en la inyección</b>	Fluido que alberga la formación almacén	Composición y características fisicoquímicas (pH, Eh, turbidez, densidad, dureza, solubilidad, adsorción alcalinidad, poder de corrosión, temperatura, composición, elementos traza, aniones, cationes, TSD, gases disueltos, etc...)
	Fluido a inyectar	Composición y características fisicoquímicas (pH, Eh, turbidez, densidad, dureza, solubilidad, adsorción alcalinidad, poder de corrosión, temperatura, composición, elementos traza, aniones, cationes, TSD, gases disueltos, etc.) y características biológicas. Pruebas de inyección si se trata de residuos orgánicos.

Cuadro 4. Resumen de los datos necesarios para evaluar la viabilidad de inyección en una formación.

La caracterización del medio en el que se va a llevar a cabo la inyección se basa en la realización de un estudio hidrogeológico, con un buen conocimiento geológico y estructural del área donde se ubica el almacén, que abarquen tanto a la formación almacén como a las que la sellan. Igualmente se deben caracterizar los fluidos que contengan las formaciones almacén y sus suprayacentes. Estos datos son necesarios para realizar el diseño del pozo de inyección y evitar reacciones o procesos físico-químicos no deseados, que puedan malograr la formación, la instalación del pozo y los elementos mecánicos de la inyección.

La adquisición de datos se puede llevar a cabo mediante diversas técnicas, que variarán en función de la localización y condiciones geológicas de cada caso. Entre ellas se incluyen técnicas geofísicas para el conocimiento del subsuelo (sísmica de reflexión, diagráfias etc...), la realización de sondeos y ensayos para el estudio de las propiedades físico-químicas de presión, temperatura, composición de la rocas confinantes y de la roca almacén y del fluido que alberga. El estudio de todas estas características (Cuadro 4) permite establecer la posibilidad de que un emplazamiento funcione o no como almacén del rechazo, y en caso afirmativo, estas características condicionarán directamente el diseño del pozo, el caudal de inyección e incluso, la duración de operación del pozo de inyección.

Además de la recopilación de datos es necesario llevar a cabo el cálculo de algunos parámetros mínimos (Cuadro 5).

Cálculo	Datos necesarios
Volumen libre o disponible en la roca almacén	Porosidad útil, permeabilidad, presión, temperatura, condiciones hidrogeológicas y parámetros hidráulicos, continuidad lateral y potencia, dimensiones de la formación litologías, composición, estructuras geológicas.
Posibles reacciones e índices de solubilidad resultantes	Datos sobre temperatura, presión, pH, estado redox, y composición del fluido a inyectar y del fluido de formación. Composición del fluido a inyectar, del fluido de la formación, y de la roca almacén.
Estimación de la pérdida de porosidad	Volumen disponible a partir de una estimación de material precipitado.

Cuadro 5. Algunos cálculos imprescindibles a llevar a cabo antes de la inyección.

El **cálculo del volumen libre o disponible** consiste en la estimación del volumen total de poros, válido para el almacenamiento en la formación seleccionada como almacén, reducido por algunos factores que impiden la ocupación total del espacio (heterogeneidad, efectos de diferencias de densidad, etc.). Existen diversos métodos para llevar a cabo este cálculo (Bradshaw *et al.* 2005, Ruiz *et al.* 2007 y 2009 y Hurtado *et al.* 2008), aunque la



mayor parte de estas técnicas han sido desarrolladas para el almacenamiento de  $\text{CO}_2$  y por ello es necesario aplicarles algunos cambios dada la diferente naturaleza de los fluidos inyectados.

El conocimiento de las **posibles reacciones** del fluido a inyectar al entrar en contacto con el fluido de formación y la roca almacén es imprescindible, ya que permite evitar problemas derivados de la precipitación y/o disolución de algunas fases minerales. Para primeras aproximaciones al cálculo de posibles reacciones, se pueden utilizar códigos o modelos matemáticos de mezcla ya existentes, en los que partiendo de las composiciones y condiciones de los diferentes fluidos se pueden obtener las posibles reacciones de mezcla. Es evidente que la mezcla de fluidos y su interacción con la roca encajante darán lugar a un sistema dinámico. El cálculo de los índices de solubilidad de los diferentes minerales nos indicará la posibilidad de disolución o precipitación de los mismos. A pesar de que parece relativamente sencillo de evaluar con la ayuda de los códigos existentes, la cinética de las reacciones hace que sea una tarea complicada. También será necesario conocer las posibles reacciones del fluido a inyectar con las partes integrantes del pozo, con la finalidad de evitar posibles deterioros y corrosiones de las mismas. Estos valores definen la inyectabilidad de un fluido en una formación concreta.

Una vez valorada la posibilidad de precipitación es necesario llevar a cabo una **estimación de la pérdida de porosidad** originada por la precipitación secundaria (lo mismo es aplicable, pero en sentido contrario, en el caso de procesos de disolución/corrosión).

En definitiva, el grado de conocimiento de la formación almacén, el fluido que alberga esta y las formaciones confinantes condicionan toda la operación de inyección y, por tanto, todo el estudio de viabilidad de la misma depende de la precisión en el conocimiento de estos elementos. Un buen estudio de viabilidad facilitará el diseño y, por tanto, el desarrollo de toda de la operación de inyección.

## 2. Fase de diseño

---

En esta fase se definen el diseño constructivo, así como los planes de monitorización, de explotación u operación y de clausura y sellado.

## 2.1. DATOS NECESARIOS PARA EL DISEÑO DEL POZO Y PARÁMETROS MÍNIMOS A ESTABLECER (CUADRO 6)

Son necesarios todos los datos recogidos durante la etapa previa o fase de estudio, ya que estos van a condicionar el diseño del pozo.

<b>Parámetros de diseño que hay que conocer</b>	Profundidad del acuífero (con agua apta para algún uso) suprayacente más próximo a la formación almacén, en el área del pozo a proteger.
	Litología y características físicas y químicas de las diferentes formaciones que atraviesa el pozo de inyección, las formaciones confinantes y la almacén o zona de inyección.
	Litología y características físicas y químicas de la formación almacén o zona de inyección.
	<b>Inyectividad</b> de la formación almacén o capacidad de esta para recibir y almacenar fluidos inyectados. La inyectividad está relacionada con la roca almacén, define su aptitud para recibir fluidos inyectados.
	Presión de fracturación de la roca que, generalmente, siempre debe ser superior a la presión que se escoja para la inyección.
	Características físicas y químicas del fluido de la formación almacén (densidad, temperatura, pH, turbidez, dureza, alcalinidad, poder de corrosión y composición principal: aniones, cationes, elementos traza, TSD, materia en suspensión, gases disueltos, etc.)
	Características físico químicas del fluido a inyectar (densidad, temperatura, pH, turbidez, dureza, alcalinidad, poder de corrosión y composición principal: aniones, cationes, elementos traza, TSD, materia en suspensión, gases disueltos, etc.)
	Profundidad de la zona de inyección.
<b>Inyectabilidad</b> o compatibilidad del fluido inyectado con la roca almacén y el agua que contiene. La inyectabilidad está relacionada con el fluido a inyectar, define su comportamiento y compatibilidad con la roca y con el fluido almacén.	
<b>Parámetros de diseño que hay que establecer</b>	Presión de inyección.
	Temperatura de inyección.
	Caudal de inyección.

Cuadro 6. *Parámetros que hay que conocer y establecer en la fase de diseño.*

Respecto a los parámetros a establecer:

La **presión de inyección** vendrá determinada por las características geológicas de la formación almacén. Depende del caudal inyectado y de la profundidad de inyección. Generalmente, la presión de inyección debe ser siempre menor a la de fracturación de la roca para no producir fracturas en las formaciones confinantes y no debe alterar significativamente la capacidad de movimiento del fluido en el pozo. En determinados casos, puede ser interesante generar una fracturación forzada (hidrofracturación) de la formación almacén, en el entorno





del pozo, con el fin de aumentar la inyectividad. Ello requiere un exhaustivo estudio previo, ya que la facturación de las formaciones confinantes podría permitir la migración del fluido inyectado fuera de la zona prevista. La presión de inyección debe ir variando a lo largo del tiempo de explotación del pozo, tal y como indica Robin (2005).

La **temperatura del fluido a inyectar** también es un parámetro que debe ser establecido previamente, dada su influencia en las reacciones que puedan tener lugar durante la inyección.

El **caudal de inyección** va a depender principalmente de la inyectividad de la formación y la presión.

## 2.2. DISEÑO DEL POZO

### 2.2.1. Esquema básico de las fases constructivas de un pozo de inyección profunda

Lo primero que se tiene que establecer es el diámetro del pozo, en función de múltiples factores, como inyectividad (apartado 5.1.), inyectabilidad, caudal y velocidad de inyección que se pretende obtener, presión de inyección, profundidad de la inyección etc... Todos estos factores condicionarán la construcción del pozo y materiales a utilizar, desde la perforación hasta su clausura.

Fases principales para la construcción de un pozo de inyección profunda (Cuadro 7):

Fase	Descripción
Perforación de pozo hasta la profundidad del acuífero con agua útil más próximo a la formación almacén	Se perfora hasta una profundidad similar o ligeramente superior al acuífero más profundo con agua útil, se introduce una tubería de revestimiento y se cementa el espacio anular que queda entre la perforación y la tubería de revestimiento.
Perforación completa del pozo, revestimiento y cementación	Perforación hasta la roca almacén y colocación de la tubería de revestimiento (desde boca de pozo). En función de las características de la formación almacén se diseñará el pozo en esa zona: tubería de revestimiento hasta el techo de la formación almacén y cementación anular hasta la superficie y frente a la formación almacén sin revestir o con tubería de revestimiento con tramos filtrantes y empaque de grava.
Colocación del obturador y del entubado	Introducción de la tubería de inyección y del obturador. Se crea un espacio anular que será rellenado por un fluido inerte.

Cuadro 7. *Esquema básico de construcción de un pozo de inyección profunda.*

- La primera fase consiste en perforar hasta la base de la formación acuífera a proteger más profunda, seguidamente se introduce hasta el fondo de esta primera perforación una tubería de acero de unos 170-300 mm de diámetro exterior. Se cementa el espacio anular entre la tubería y la pared de la perforación, para que no haya ninguna contaminación o interferencia con el acuífero a proteger.
- La siguiente fase consiste en continuar perforando hasta alcanzar la zona de inyección; una vez se ha llegado a la profundidad adecuada se introduce una tubería protectora o tubería de revestimiento con un diámetro exterior aproximado de 127-254 mm (inferior a la tubería colocada en la zona superior donde existían los acuíferos de agua potable), disponiéndose desde la superficie hasta el final de la perforación. El final de la tubería depende del sistema que se elija para la parte más profunda del pozo y finalmente se cementará el espacio anular que se ha creado.

Existen dos esquemas básicos para la ejecución de la parte del sondeo que atraviesa la formación almacén; la selección de uno u otro sistema depende de la consistencia y litología del almacén.

- Sondeo abierto:

Este método se usa para formaciones muy consolidadas (areniscas y carbonatos principalmente). En este caso se perfora hasta el techo de la formación, se instala el entubado y se cementa hasta la superficie. A continuación se perfora en menor diámetro desde el techo de la formación almacén hasta la base del sondeo.

- Sondeo con tubería de revestimiento con tramos filtrantes y empaque de grava:

Este método se utiliza principalmente en materiales arenosos no consolidados que se disgregan fácilmente. Se perfora hasta el fondo de la formación almacén, se coloca el entubado con tramos filtrantes en las zonas donde se encuentra la formación objetivo donde inyectar. Esta tubería se lleva hasta la boca del sondeo; se coloca un empaque de grava en el espacio anular entre la tubería de revestimiento y la formación almacén, cementándose el resto del anular entre las tuberías hasta la boca del sondeo. A pesar de ser el método más costoso, es el que permite una mayor capacidad de inyección.

- Finalmente se introduce la tubería de inyección y un obturador, al comienzo de la zona de inyección. El obturador es atravesado por la tubería de inyección, a través de la que se inyecta el fluido. El espacio entre la tubería de revestimiento y el tubo de inyección, se denomina anillo, y su finalidad es inhibir la corrosión de los tubos y asegurar el control del confinamiento de este espacio. Así, el espacio anular o anillo se puede rellenar con un fluido que inhiba la corrosión de los tubos, habitualmente, un aceite mineral inerte. El obturador, que se encuentra situado en el fondo del anillo, se infla



contra las paredes de la tubería de revestimiento, permitiendo el aislamiento del fluido contenido en el anillo y del fluido inyectado. En el anillo se mantiene una presión mayor que la presión a la que se inyecta el fluido, así en el caso de que se produzca una rotura en la tubería de inyección, se podría detectar inmediatamente una pérdida de presión en el anillo.

### 2.2.2. Diseño de las fases constructivas (Cuadro 8)

Parte o acción	Característica a establecer	Factores que condicionan el diseño	Opciones más comunes
Selección del diámetro del pozo	Diámetro del pozo	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Inyectabilidad</li> <li>· Caudal y velocidad de inyección</li> <li>· Presión de inyección</li> <li>· Materia disponible para la construcción del pozo</li> <li>· Profundidad de la inyección</li> </ul>	<p>En la parte superior donde se encuentran las masas de agua a proteger, diámetro de la tubería de revestimiento &gt;170 – 300 mm.</p> <p>En el resto de la perforación, diámetro de la tubería de revestimiento &gt; 140 – 260 mm</p>
Perforación	Método de perforación	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Profundidad</li> <li>· Diámetro</li> <li>· Velocidad de avance</li> <li>· Litologías que perforar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Rotopercusión</li> <li>· Percusión</li> <li>· Rotación inversa</li> <li>· Rotación directa</li> </ul>
Tubería de inyección	Dimensiones y clases de tuberías (espesor, diámetro, peso nominal, longitud, tipo de unión y material de construcción)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Diámetro</li> <li>· Resistencia</li> <li>· Compatibilidad con el fluido de inyección (protección a la corrosión)</li> <li>· Poder de corrosión del fluido inyectado y del fluido de la formación a sus respectivas temperaturas</li> <li>· Vida útil del pozo</li> <li>· Profundidad de la zona de inyección</li> <li>· Presión de la inyección, presión externa, presión interna y carga axial</li> <li>· Litología (composición y textura) de las zonas de inyección y confinamiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Fibra de vidrio reforzada con plásticos y resina epoxi</li> <li>· Diferentes aceros inoxidables</li> </ul>
Parte inferior del pozo	Sistema	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Litología y consistencia de la formación almacén</li> <li>· Poder de corrosión del fluido inyectado, del fluido de la formación y sus respectivas temperaturas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Sondeo abierto</li> <li>· Entubado perforado y empaquetamiento de grava</li> </ul>

Parte o acción	Característica a establecer	Factores que condicionan el diseño	Opciones más comunes
Obturadores	Tipo de obturador	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Material de la tubería de inyección</li> <li>· Presiones en las tuberías y espacio anular</li> <li>· Composición de los diferentes fluidos</li> </ul>	· Diferentes tipos de obturadores en el mercado
Espacio anular	Relleno	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Materiales en contacto con el espacio anular</li> <li>· Fluido inyectado</li> </ul>	· Aceite inerte
	Diámetro	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Caudal de inyección</li> </ul>	
Tuberías de revestimiento superficial y general (a lo largo de todo el sondeo)	Material espesor	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Profundidad de la zona de inyección</li> <li>· Presión de la inyección, presión externa, presión interna y carga axial</li> <li>· Diámetro del pozo</li> <li>· Dimensiones y clases de tuberías del entubado (espesor, diámetro, peso nominal, longitud tipo de unión y material de construcción)</li> <li>· Poder de corrosión del fluido inyectado, del fluido de la formación y sus temperaturas</li> <li>· Litología de las zonas de inyección y confinamiento</li> <li>· Tipo y calidad del cemento</li> </ul>	
Cementación superficial y general (a lo largo de todo el sondeo)	Espesor	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Diámetro de la tubería de revestimiento y diámetro del pozo</li> <li>· Naturaleza del cemento empleado</li> </ul>	· Espesor mínimo aproximado 13 cm
	Naturaleza del cemento empleado	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Fluido inyectado</li> <li>· Aditivos utilizados durante la realización del pozo</li> <li>· Formaciones o litologías con las que entra en contacto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Cementos</li> <li>· Resina epoxi</li> </ul>

Cuadro 8. Factores que condicionan el diseño de un pozo de inyección.

### Perforación:

En función de las características de los materiales a atravesar, de la profundidad y diámetro del pozo se debe escoger el método de perforación que se va a emplear. Las técnicas más comúnmente utilizadas para sondeos profundos son la rotación directa, inversa, la rotopercusión y la percusión.

En la ejecución de la perforación de un pozo para una ISP (Inyección en Sondeo Profundo) no se recomienda la utilización de lodos bentoníticos en el caso en el que estos puedan invadir la formación almacén reduciendo su permeabilidad. Si los lodos son necesarios, es más recomendable el uso de lodos a base de polímeros.

### Elementos constructivos

Los principales elementos que conforman el pozo son: tuberías de revestimiento, cementaciones anulares, tubería de inyección y obturador, tal y como se muestra en la Fig. 1.

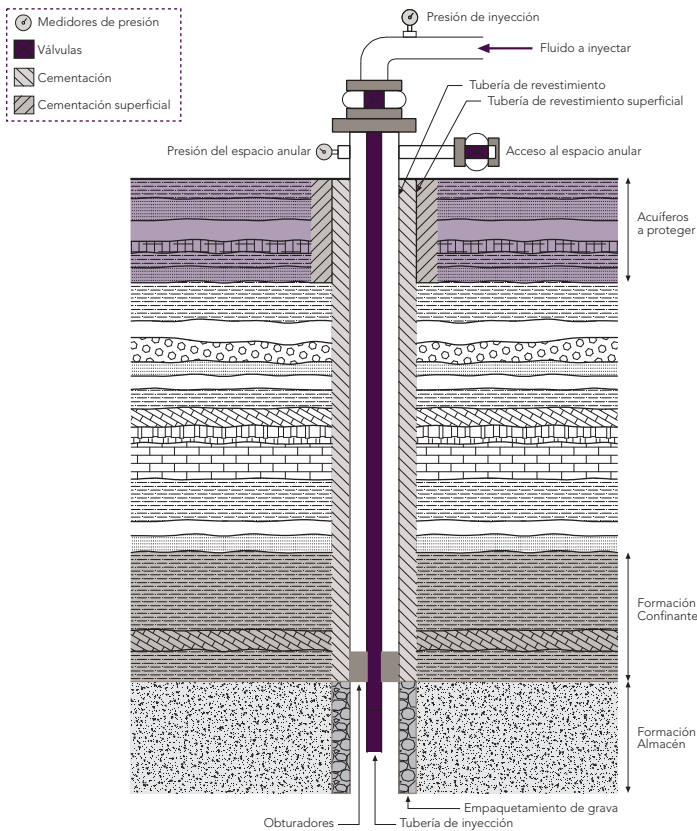


Figura 1. Esquema de los elementos principales recomendados para un sondeo de inyección profunda: Cabeza de pozo, tuberías de revestimiento, cementaciones anulares, tubería de inyección, obturador y medidores de presión.

Es muy importante considerar los materiales utilizados en la construcción del pozo ya que determinarán, en gran medida, el grado de conservación, y la vida útil del pozo.

Los factores que afectan al diseño de los diferentes elementos constructivos son principalmente:

- Profundidad de la zona de inyección.
- Presión de la inyección, presión externa, presión interna y carga axial.
- Diámetro del pozo.
- Diámetro de las tuberías de revestimiento y de inyección (espesor, diámetro, peso nominal, longitud, tipo de unión y material de construcción).
- Poder de corrosión del fluido inyectado, del fluido de la formación y sus temperaturas.
- Litología de las zonas de inyección y confinamiento.
- Tipo y calidad del cemento.

### Tubería de inyección

Es el tubo a través del que se inyecta el residuo a almacenar. Permite llevar el fluido inyectado desde la superficie hasta la zona de inyección, aislándolo de la tubería de revestimiento, reduciendo la corrosión y prolongando la longevidad de los pozos. El material de esta tubería ha de ser resistente a la corrosión provocada por el fluido a inyectar, y dadas las altas profundidades a las que se trabajará son necesarios materiales de una resistencia adecuada, para evitar la rotura y el colapso. En el caso de la inyección de salmueras, los materiales utilizados en el entubado son plásticos reforzados con fibra de vidrio que presentan la ventaja de ser bastante económicos, pero únicamente son idóneas para poca profundidad; no siendo aptos en inyección profunda (más de 1000 metros), por su baja resistencia. En ese caso, generalmente se usa acero inoxidable.

El diseño de la tubería se ha de adecuar a las necesidades de cada residuo a inyectar, evitando en gran medida la resistencia por fricción, de tal forma que las dimensiones sean las idóneas. El diámetro de la tubería de inyección condiciona el diseño del resto de los elementos de la inyección, por lo que es muy importante su dimensionamiento adecuado.

En algunos casos de inyección profunda, se puede prever la instalación de una segunda tubería de inyección, en función de la vida útil del pozo y del tipo de residuo que se vaya a inyectar.



## Obturadores

Los obturadores son dispositivos cuya finalidad es mantener aislada la zona de inyección del resto del pozo. El tipo de fluido a inyectar y las presiones que va a sufrir son factores importantes para el diseño y /o elección del obturador.

## Tuberías de revestimiento y cementaciones

Un adecuado revestimiento y cementación de los espacios anulares impiden la entrada y el movimiento de los fluidos entre diferentes formaciones de agua subterránea y mejoran la integridad y la longevidad del pozo.

La adhesión del cemento y la tubería de revestimiento deben de ser óptimas para conseguir un aislamiento máximo.

El espesor mínimo de la cementación será de unos 13 cm, para lo que el diámetro de la perforación ha de ser uno o dos diámetros nominales superiores al diámetro de la entubación, de esta manera el anillo de cementación que rodea todo el entubado tendrá un espesor adecuado. La correcta distribución del cemento en las operaciones de cementación depende de que exista hueco suficiente que permita la distribución de manera homogénea, sin que se generen huecos o bolsas de aire.

Entre los factores a tener en cuenta para la elección de la tubería de revestimiento y la cementación es imprescindible considerar: 1) la profundidad de la zona de inyección, 2) la presión de inyección, la presión externa, la presión interna, y la carga axial, 3) el tamaño del pozo, 4) el tamaño y diámetro de la tubería de revestimiento, 5) corrosividad y temperatura del líquido inyectado y de los fluidos de la formación, 6) litología de la zona de inyección y de los intervalos de confinamiento y 7) tipo o grado de cementación. Además, debido a que la tubería de revestimiento y el cemento estarán en contacto con los fluidos inyectados en la zona de inyección, la naturaleza del cemento empleado ha de ser compatible con el fluido a inyectar, para evitar la corrosión y las fugas. En numerosas construcciones de este tipo se usan aditivos para proteger al cemento frente a la corrosión o degradación. En el caso de que no se pueda garantizar la protección anticorrosión, o se utilicen otros aditivos que puedan afectar negativamente al cemento, este se puede sustituir por una resina de epoxi.

### 2.3. DISEÑO DE LA MONITORIZACIÓN

En función de las características de la inyección y del marco geológico donde se realice esta, se establecerá un área de control alrededor del pozo durante la inyección. Como regla general, se establece un radio mínimo de 3,5 Km (EPA), siempre y cuando las condiciones, fundamentalmente geológicas, no determinen la necesidad de un área mayor. En estos casos, el área de control se acomodará a cada situación principalmente en función de posibles problemas de migración del fluido.

#### Sistema de control (Cuadro 9):

<b>Sistema de control y monitorización</b>	
Parámetros mínimos que controlar durante toda la inyección	Presión
	Temperatura
	Caudal inyectado
Requisitos	Establecer los parámetros que son necesarios controlar en cada caso y el intervalo de control
	Los aparatos de detección de posibles averías deben seguir un estricto plan de mantenimiento y ser cambiados con regularidad
	El sistema debe parar automáticamente la inyección y reducir la presión de inyección si se detecta una bajada en la presión o variaciones significativas en los otros parámetros que se miden de continuo
Ejemplo de sistema	El espacio anular entre el tubo de inyección y el entubado exterior se rellena con un aceite inerte. El flujo salino ejerce una presión anular a lo largo de toda la columna. Esta presión del fluido anular debe mantenerse constante, siempre que no haya un deterioro de la cementación o del entubado (Fig. 2). Johnston et al (1997)

Cuadro 9. Características generales del sistema de control y monitorización.

El control continuo de la presión de inyección, el caudal de inyección, volumen inyectado y la presión del anillo asegurarán que el pozo estará operando en condiciones idóneas y proporciona una alerta temprana de posibles problemas. Las características principales del fluido inyectado (temperatura, composición, etc.) deben ser controladas cíclicamente. Así mismo, cabe la posibilidad de que sea necesario controlar otros parámetros, que han de ser establecidos en esta fase de diseño, dependiendo de la problemática de cada pozo. Ante el riesgo ambiental que podría provocar un error en el sistema de control por posibles averías, los aparatos de detección deben someterse a un programa de calibración y mantenimiento, por lo que es necesario tener en cuenta este programa en el coste económico de explotación. Por otra parte, hay que considerar que incluso después de la clausura de un pozo es necesario llevar a cabo un seguimiento y control.



El sistema de control debe parar automáticamente la inyección o reducir la presión de inyección, si detecta una bajada en la presión del sistema y en los otros parámetros significativos que se miden en continuo. La presión existente en la parte anular ha de estar controlada a través de equipos que permitan detectar cualquier cambio o avería que se pueda producir dentro de la perforación. De esta manera, se logra que la inyección se pueda ejecutar y el pozo se pueda cerrar sin llegar a afectar a los acuíferos productivos. En el caso de que no exista anillo habrá que controlar cualquier pérdida de presión que pueda estar originada por un escape o filtración del fluido inyectado.

Johnston *et al* (1997) diseñaron un sistema de monitorización consistente en controlar la presión del fluido que rellena el espacio anular situado entre el tubo de inyección y la tubería de revestimiento. De manera que existe una presión anular a lo largo de toda la columna que debe mantenerse constante, siempre que no haya un deterioro de la cementación o del entubado (Fig. 2).

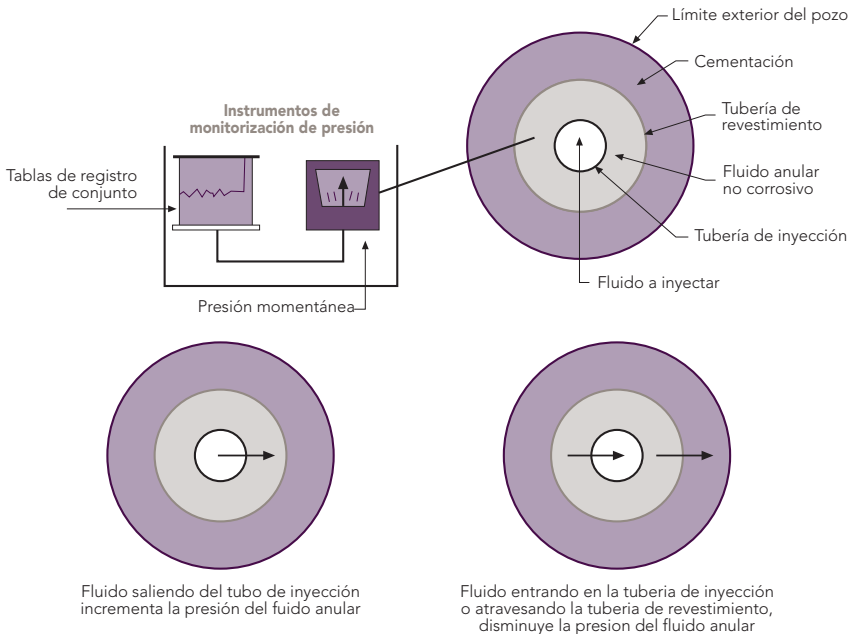


Figura 2. Sistema de control de la presión. Johnston *et al* (1997).

### Piezómetros de control (Cuadro 10):

Un buen control de la instalación de inyección precisa de varios piezómetros de control. Los piezómetros se clasifican en:

Clasificación	Tipo	Características	Finalidad
En función de la distancia	Control inmediato	30 m del pozo	Control inmediato de cualquier incidencia
	Control de la zona	2-3 Km en la formación almacén y niveles superiores	Verificar el aislamiento y controlar el movimiento del fluido
	Control regional	Límites de la formación almacén	Verificar el aislamiento y controlar el movimiento del fluido a largo plazo

Cuadro 10. *Clasificación de los piezómetros o sondeos de control.*

Para la instalación de estos puntos de control es necesario tener en cuenta el protocolo de construcción a seguir durante la realización o construcción de un sondeo de inyección profunda, tanto en el tipo de material como los otros factores citados anteriormente

En esta fase de diseño además de la construcción y monitorización también se han de establecer los parámetros de la operación (apartado 5 de este manual) y el plan de la clausura y sellado (apartado 6 de este manual).

## 3. Autorización

La normativa para la autorización de una inyección profunda varía según el país, por lo que en este apartado sólo se trata la normativa vigente en el Estado Español.

La desalación de las aguas continentales tienen que someterse al régimen previsto en el Real Decreto Legislativo 1/2001 para la explotación del dominio público hidráulico (capítulo V, artículo 13).

Además, la inyección profunda está contemplada en la sección B del artículo 3 de la Ley 22/1973 de Minas, por lo que parece preceptivo solicitar autorización de aprovechamiento de la "estructura subterránea", que debe incluir el proyecto justificativo de la necesidad de dicha utilización, así como la designación del perímetro de protección.



Por otra parte, todo el proyecto debe estar sometido a un estudio de impacto, de manera que se le aplicará la ley de responsabilidad medioambiental y reglamento en vigor (*Ley 26/2007 y Real Decreto 2090 /2008*).

## 4. Fase de construcción o ejecución

---

### 4.1. REQUISITOS

- Seguir al detalle las directrices que han sido indicadas en la fase previa de diseño y planificación en todos los aspectos (presiones, condiciones del residuo a inyectar, vigilancia y control, etc.)
- Construcción de un pozo piloto de investigación siempre y cuando el grado de incertidumbre de la información existente en la zona lo haga necesario.
- Evitar el vertido en superficie de fluidos procedentes de la construcción del pozo, o de acuíferos perforados que presenten agua de baja calidad.
- Obtención del mayor número de datos, estudios etc. posibles, para poder realizar con mayor criterio las fases de operación y clausura.
- Recopilación en un informe final de todas las incidencias ocurridas durante la realización del pozo y las modificaciones del proyecto original, en caso que se hubieran producido, exponiendo las causas que las generaron.
- Elaboración de un informe con los resultados recopilados de todas las pruebas que se hayan realizado en el pozo (bombeo, inyección, etc.)
- Redacción de un manual de operación y mantenimiento, para que los operarios del sistema puedan conocer el funcionamiento del mismo y cómo actuar en caso de emergencia (manual de contingencia).

### 4.2. CONTROLES DURANTE LA REALIZACIÓN DEL POZO (CUADRO11)

Durante la construcción de la ISP también es necesaria la realización de diferentes ensayos para conseguir garantizar al máximo el aislamiento de la conducción y la previsión de posibles medidas correctoras. Entre dichos ensayos se incluye la comprobación de la verticalidad con una periodicidad aceptable para asegurar que la ISP perfora los materiales deseados y

que llega a la profundidad establecida. Así mismo, se incluyen una serie de registros geofísicos y la realización de pruebas durante las diferentes fases de construcción (Cuadro 11).

Fase	Test que realizar
Ejecución	· Desviación, para asegurar que se perforan los materiales deseados.
Antes de instalar el revestimiento superficial	· Diagrafías o perfiles eléctricos de resistividad y potencial espontáneo, perfiles de porosidad, rayos gamma y caliper.
Después de instalar el revestimiento superficial y la cementación anular	· Adhesión del cemento, perfiles de temperaturas y densidad.
Comprobación de la viabilidad de la construcción	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Registro de adherencia del cemento. Exploración del contacto y de la adherencia del cemento.</li> <li>· Registros de temperatura. Control de la temperatura dentro de las 48 horas posteriores a la cementación.</li> <li>· Prueba de estanqueidad en las cementaciones entre las tuberías de revestimiento y entre la tuberías de revestimiento y la pared del pozo. A una presión igual o superior a 1,5 veces la presión esperada de trabajo y no inferior a 50psi (3,4 atm), durante una hora y sin caídas de presión.</li> <li>· Prueba de bombeo.</li> <li>· Análisis químico del agua procedente de las formaciones en contacto con el pozo.</li> <li>· Pruebas de inyección y presión inicial antes de dar comienzo a la operación.</li> <li>· Pruebas de desplazamiento del fluido almacenado.</li> </ul>

Cuadro 11. *Parámetros a controlar durante la fase de ejecución.*

#### 4.3. COMPROBACIÓN DE LA ESTABILIDAD DEL POZO

Para saber si la construcción es fiable y funcional, y el aislamiento es correcto, es necesario realizar un test de verificación después de terminada la construcción y antes de dar comienzo a la inyección s.s. Dicho test ha de consistir en:

- Comprobación del contacto y de la adherencia de la cementación.
- Registro de la temperatura. Control de la temperatura dentro de las 48 horas posteriores a la cementación.
- Prueba de estanqueidad en las cementaciones entre las tuberías de revestimiento y entre la tuberías de revestimiento y la pared del pozo. A una presión igual o superior a 1,5 veces la presión esperada de trabajo y no inferior a 50 psi (3,4 atm), durante una hora y sin caídas de presión una vez hechas las correcciones de temperatura.



- Prueba de bombeo para determinar si el pozo tiene una capacidad adecuada y para obtener muestras representativas del agua subterránea.
- Análisis químico del agua procedente de los estratos en contacto con el pozo.
- Pruebas de inyección.
- Pruebas de desplazamiento del fluido almacenado.

## 5. Fase de operación

Este apartado del manual está basado en Ramos (2001, 2003).

Una vez llevada a cabo una comprobación positiva de la estabilidad del pozo (Apartado 4.3 de este manual) se puede proceder a la fase de operación. Durante esta fase es fundamental seguir estrictamente el proyecto, ajustándose a las especificaciones establecidas en el mismo.

### 5.1. CONTROL DURANTE LA INYECCIÓN DEL RESIDUO (CUADRO 12)

Fase	Test que realizar
Operación	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Test de integridad mecánica externa: Trazadores, temperatura y perfiles sónicos.</li> </ul>
Periódicamente durante la vida útil del pozo. El intervalo de medida depende de la naturaleza de la formación almacén, los fluidos inyectados y del rendimiento general del pozo	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Medición de parámetros químicos:</li> <li>· Test de integridad mecánica externa: trazador radioactivo, temperatura, sónicos o de evaluación del cemento. Un intervalo típico sería de cinco años; sin embargo, debe existir la posibilidad de cambiar el intervalo en función de la naturaleza y el volumen del fluido inyectado y de la formación que lo recibe.</li> <li>· Test de integridad mecánica interna o medida de presión de inyección. Se puede medir prácticamente en continuo: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Caudal de inyección</li> <li>- Presión en la cabeza de inyección</li> <li>- Presión anular</li> <li>- Presión del acuífero principal y de los vecinos de la formación receptora que puedan ser susceptibles de ser afectados por la inyección</li> <li>- Medida de temperatura de residuo inyectado</li> </ul> </li> </ul>
Si el obturador tiene que ser recolocado	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Pruebas de presión adicionales</li> </ul>

Cuadro 12. *Parámetros a controlar durante la fase de operación.*

La planificación de los parámetros a medir y la metodología para su medición se establecen en la fase de diseño (apartado 2.3.4. de este manual). Cada inyección es diferente, pues la geología regional, la formación almacén y el residuo a inyectar tienen particularidades que son analizadas con detenimiento en la fase de estudio para que las condiciones de inyección sean óptimas. Los parámetros a medir y los intervalos de medición dependen de diversos factores. Sin embargo, en todas las inyecciones, es aconsejable controlar de forma continuada y durante toda operación de inyección los siguientes parámetros:

- Test de integridad mecánica interna o medida de presión de inyección.
- Caudal de inyección
- Presión en la cabeza de inyección
- Presión del anillo
- Presión del acuífero principal y de los vecinos a la formación receptora que puedan ser susceptibles de ser afectados por la inyección
- Medida de temperatura de residuo inyectado

Los aparatos registradores permiten la comparación y evolución de la presión y del caudal de inyección, Es imprescindible conocer la mayor presión admisible por el sistema en cada momento y medir la presión constantemente, ya que esto permitirá detectar diferentes incidencias en el sistema.

El estudio de las reacciones químicas que se están produciendo durante la inyección requiere un control de la composición química del fluido inyectado y del fluido en la formación. Los parámetros químicos a determinar y su frecuencia de medida son variables, en función de los casos. Como mínimo, es aconsejable una frecuencia, al menos, trimestral. Así mismo, una prueba de integridad mecánica externa garantiza que los líquidos inyectados permanecen en la formación objetivo y que no afectan a la porción de tubería de revestimiento debajo del obturador o al cemento de la parte inferior del orificio. La prueba de integridad mecánica externa se basa en: trazador radioactivo, temperatura, sónicos o de evaluación del cemento. El intervalo de tiempo adecuado para estos registros depende de la naturaleza de la formación y de los líquidos inyectados. Un intervalo típico sería de cinco años; sin embargo, debe existir la posibilidad de ajustar el intervalo en función de la naturaleza y el volumen del fluido inyectado y de la formación que lo recibe.



### 5.1.1. Índice de inyectividad (Ramos, 2001)

La inyectividad se refiere a la roca almacén y su capacidad para recibir fluidos inyectados. El índice de inyectividad (Donalson, 1974) relaciona el caudal inyectado con la presión de inyección, por unidad de espesor de formación. En una representación cartesiana, la X o eje de abscisas corresponde al caudal inyectado y la Y o eje de ordenadas a la presión de inyección, siendo la pendiente de la recta obtenida el valor del índice de inyectividad. Este índice es característico de cada sondeo. Si se mantiene constante indica que la porosidad y la permeabilidad de la formación y el radio de influencia del pozo no han sufrido cambios. Si la pendiente aumenta implica una pérdida de porosidad y permeabilidad en la formación inyectada, ocasionado generalmente por un relleno u oclusión de los poros. Si contrariamente la pendiente disminuye implica un aumento del radio de influencia, probablemente debido a una fractura inducida hidráulicamente. La evolución del índice de inyección puede revelar daños en el pozo, drenaje del residuo hacia otros niveles, u otras deficiencias que pueden surgir durante la inyección.

Para conocer qué daños ha podido sufrir el pozo, es útil conocer la evolución del pozo y las incidencias que ha habido durante la realización de la perforación. Un conocimiento del estado de esfuerzos al que está sometida la formación, también es útil en la identificación de posibles fracturas hidráulicas que se pueden dar en el sistema. Por ejemplo, en general, en las formaciones sedimentarias los esfuerzos verticales aumentan proporcionalmente con la profundidad (presión litostática), mientras que los esfuerzos laterales son función de las condiciones geológicas existentes.

## 5.2. ALGUNOS POSIBLES PROBLEMAS DURANTE LA OPERACIÓN DE INYECCIÓN (CUADRO 13) (TOMADO DE RAMOS, 2001)

Los principales problemas en las operaciones de inyección en pozos profundos derivan de la rotura del equilibrio químico existente (previo a la inyección) entre la roca almacén y el agua que contiene, equilibrio estabilizado a lo largo de un prolongado tiempo durante el cual las condiciones físico-químicas han permanecido inalteradas. Son los llamados problemas de compatibilidad.

La mayoría de los efectos negativos que se pueden presentar tienen que ver con pérdidas de inyectividad, fundamentalmente por disminución de la porosidad de la roca almacén al obturarse los poros. Pueden producirse colmataciones debido a la presencia de finos procedentes de la perforación o el arrastre de finos de la propia formación. Igualmente, se pueden producir colmataciones debidas a procesos químicos de precipitación por un cam-

bio de temperatura, reacción del lodo de perforación con el agua del almacén, reacción entre la salmuera y la roca almacén y/o el agua contenida. O colmataciones debidas a la existencia de partículas en suspensión en la salmuera.

Otros problemas derivan de un exceso en la presión de inyección, ya que pueden generarse fracturas en la masa de roca o propagar las existentes con efectos imprevistos, tales como aumento de la capacidad de almacenamiento hasta pérdida de estanqueidad y puesta en conexión con otros acuíferos. También por efecto de la presión se puede producir un cierre de los poros en los materiales más cercanos a la zona de inyección, disminuyendo la capacidad de infiltración. El *Ground Water Protection Council* (GWPC, 2010) propone una limitación de la velocidad (y por tanto del caudal) de infiltración a 2,5 m/s. Otro problema relativamente frecuente es la obturación de los poros de la formación en la proximidad a la zona de inyección debida a la presencia de burbujas de aire.

#### Posibles problemas durante la operación de inyección

Obturación parcial del almacén	Existencia de partículas sólidas en suspensión en el líquido a inyectar
	Presencia o generación de burbujas de gas al inyectar fluidos en el interior del pozo
	Presencia de microorganismos y organismos vivos
	Presencia de arcillas en la formación de almacenamiento
Migración del residuo y contaminación de aguas subterráneas	
Disminución del rendimiento de la inyección con el tiempo (Saparilli et al., 2000)	

Cuadro 13. *Resumen de algunos de los problemas más habituales que se pueden dar en una operación de inyección profunda. Un buen estudio durante las fases previas evitaría la mayor parte de ellos.*

#### 5.2.1. Obturación parcial del almacén

Se puede producir por:

- A) Existencia de partículas sólidas en suspensión: la detección de estas partículas es fundamental para el buen funcionamiento del sistema. La presencia de estas partículas puede dar lugar a:
- Obturación del pozo de inyección por acumulación de sólidos en el fondo.
  - Taponamiento y/o invasión de la formación almacén por acumulaciones concéntricas al pozo.





- Formación de una costra de decantación sobre el material de la formación, en la parte interior del pozo.

Las partículas pueden tener tres orígenes posibles:

- Procedentes del fluido inyectado.
- Presentes en la formación almacén
- Formadas por precipitación como consecuencia de problemas de compatibilidad

B) Existencia de procesos de precipitación producidos por la mezcla de la salmuera con el agua de formación, y que igualmente puede dar lugar a:

- Obturación del pozo de inyección por acumulación de precipitados en el fondo
- Oclusión de los poros de la formación almacén en el entorno cercano al pozo
- Formación de una costra de precipitación sobre el material de la formación, en la pared del sondeo

C) Presencia de burbujas de gas puede dar lugar a problemas de obturación del pozo, perdiendo capacidad de inyección, especialmente en litologías detríticas.

D) Presencia de microorganismos y organismos vivos (algas, mohos, bacterias ferruginosas, bacterias sulfato-reductoras y bacterias productos de lodos) que puedan dar lugar a rellenos biogénicos y a problemas de obturación del pozo, perdiendo también capacidad de inyección. Según las características químicas que presente el residuo a inyectar puede dar lugar a ambientes reductores no aptos para el crecimiento de este tipo de bacterias.

E) Presencia de arcillas en la formación almacén que se pueden hidrolizar al entrar en contacto con el residuo disminuyendo así, posteriormente, la permeabilidad de la formación.

Todo este tipo de problemas se deben prever en las fases de estudio y de diseño, aunque durante la perforación también se obtiene información. Para evitarlos es necesario (apartados 1.2 y 1.3 de este manual):

- Conocer la permeabilidad de la formación y qué procesos físicos y físicoquímicos pueden modificarla (se estudia con ensayos en laboratorio sobre testigos extraídos durante la perforación).
- Estudiar y modelizar las reacciones salmuera-agua de formación y salmuera-formación almacén, en diferentes condiciones de presión, temperatura y concentración.

- A veces, aplicar un tratamiento previo del agua a inyectar para que los problemas de colmatación sean reducidos al máximo.

### 5.2.2. Problemas en la migración del residuo

El grado de incertidumbre sobre la migración del residuo es elevado debido a la imposibilidad de conocer la formación almacén y su régimen hidráulico con precisión en toda su extensión. Aunque se pueden utilizar modelos matemáticos de flujo para poder prever el movimiento del residuo, los principales problemas o dificultades de la modelización de un proyecto de inyección profunda son:

- Dispersión hidrodinámica.
- Flujo multifase.
- Flujo en medios fracturados.
- Reacciones químicas y microbiológicas.
- Desconocimiento de la extensión y los contaminantes en la zona saturada.
- Cambios en el movimiento del fluido debido a la dispersión y/o floculación física, adsorción e intercambio iónico, disolución y/o precipitación de minerales e iones.

### 5.2.3. Disminución del rendimiento de la inyección con el tiempo

Existen modelos de simulación de la disminución de la inyectividad en un pozo de inyección profunda (Saparilli *et al.*, 2000). Esta disminución depende, entre otros parámetros, de las particularidades físico-químicas del residuo a inyectar y del tipo de acondicionamiento del pozo realizado en la zona de la formación almacén (apartado 2.2). Es importante conocer las propiedades de la formación almacén, el volumen y la presión de inyección, el diseño constructivo del pozo, los daños iniciales que se pueden producir en el pozo y la construcción y operaciones características de cada proyecto de inyección profunda.

## 6. Fase de clausura (Cuadro 14)

Un correcto diseño del sellado y abandono de un pozo puede evitar, en un futuro, posibles problemas de contaminación en los acuíferos de agua potable. El programa de clausura detallado debe presentarse a la autoridad antes de otorgarse la autorización de explotación. Una vez terminada la explotación dicho programa puede ser revisado.

Antes de abandonar el pozo de inyección, es necesario que éste sea sellado con cemento para evitar el movimiento del fluido residual hacia los acuíferos.

No se dispone de una legislación española que marque las directrices en la realización de esta etapa de abandono de una inyección profunda. La guía base de sellado y abandono puede basarse en los criterios establecidos en EEUU por UIC y la EPA para la clausura de un pozo de inyección profunda de clase I.

Actividades	Descripción
Informes y notificaciones a la autoridad competente	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Notificación del cierre y clausura</li> <li>· Aprobación de la integridad de los sondeos de control</li> <li>· Presentación del informe de clausura y abandono</li> </ul>
Planes de clausura	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Disminución de la presión</li> <li>· Comprobación de la integridad de los mecanismos</li> <li>· Utilización de fluidos amortiguadores</li> <li>· Medidas de prevención por el fluido existente entre el entubado dentro y fuera de la tubería de inyección</li> <li>· Toma de muestras</li> </ul>
Planes y controles después de la clausura	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Evaluación del Coste</li> <li>· Información hidrogeológica</li> <li>· Acciones correctoras</li> <li>· Pozos de control y monitoreo</li> <li>· Documentación</li> </ul>

Cuadro 14. *Recomendaciones para la fase de clausura. Explicación en el texto.*

Los requerimientos básicos que hay que cumplir para el sellado, clausura y abandono de un pozo, deberían ser (cuadro14):

- Notificación al organismo técnico y medioambiental competente. Se propone una notificación del propietario o del operador del pozo como mínimo 45 días antes del comienzo del sellado a menos que se especifique o esté regulado lo contrario.

- Comprobación de la integridad de la instalación. El propietario o el operador tendrán que demostrar que el pozo mantiene los piezómetros y/o sondeos necesarios para el control después de la clausura.
- Presentación del informe de clausura y abandono. El propietario o el operador deberán presentar un informe del sellado y abandono en un plazo máximo de 60 días después del sellado del mismo. Igualmente, este plazo tendrá que ajustarse a la regulación existente si hubiera lugar.

En todo caso, el propietario u operador del pozo ha de tener el permiso de abandono. La obligatoriedad de implementar el plan perdurará hasta la finalización del permiso.

El proyecto de clausura debería contemplar los siguientes puntos:

- Disminución de la presión. Las caídas de presión se deben medir para cada intervalo de tiempo que marque el proyecto de diseño y construcción del pozo.
- Integridad de la instalación. El propietario u operador del pozo deberá realizar ante un responsable del organismo competente una demostración de los mecanismos que se usan habitualmente en el funcionamiento de la inyección de un pozo. Las demostraciones han de incluir como mínimo un test de presión, test y log del entubado, control de la cementación y los diferentes parámetros del flujo. Es importante que todos los sondeos de control se mantengan en funcionamiento y en buen estado de conservación para que una vez esté cerrada la operación se pueda tener un control del fluido y su evolución.
- Fluidos amortiguadores. Con la finalidad de asegurar el aislamiento del rechazo es conveniente inyectar un fluido amortiguador adecuado antes del abandono del pozo. Hay que tener en cuenta las condiciones físico-químicas que se pueden dar con el fluido existente en la formación almacén, así como también con en el mismo fluido inyectado.
- Medidas de prevención para impedir el movimiento del fluido existente entre el entubado y dentro y fuera del pozo. El pozo ha de ser sellado de manera que se evite el movimiento de fluidos desde la zona de inyección al acuífero protegido:
  - Cementación del pozo. Si no se han producido problemas en el entubado del pozo debe ser rellenado con cemento. En el caso de que esto no fuera posible es necesario que el pozo pase el test SAPT (Standard Annulus Pressure), para asegurar que el fluido no es desplazado hacia las capas del acuífero a proteger.

- Cementación desde el exterior del pozo. Si es necesario se perfora y se inyecta cemento a presión hacia el entubado para eliminar cualquier hueco y que no pueda circular el flujo residual fuera de la zona de inyección.
- Toma de muestras. Será apropiada la toma de muestras en el acuífero suprayacente a la formación almacén, por lo que al menos debe existir un pozo de control en la zona a muestrear.

En cualquier caso, cada operación de ISP ha de ser estudiada independientemente en base a todos los criterios, de manera que el abandono tenga los efectos negativos mínimos.

En todos los casos, la presión es un parámetro que debe ser controlado y, si es posible, con tomas de medida periódicas para poder ver la evolución de la misma.

Han de llevarse a cabo un plan de seguimiento y una serie de controles después de la clausura y abandono de la inyección. El plan de control y seguimiento, debe ser entregado antes de comenzada la explotación y revisado antes de que el informe de abandono sea entregado, debe incluir:

- Estimación del Coste:  
Estimación del coste del mantenimiento y seguimiento de todo el programa de control hasta el abandono definitivo de la instalación.
- Información hidrogeológica:  
Información que ayude a valorar la posible migración futura del residuo desde la zona de inyección. Ha de incluir la siguiente información:
  - Rango de presiones de la zona de inyección antes de que se inicie la inyección propiamente dicha.
  - Estimación del valor de la presión en la zona de inyección cuando ésta se clausure.
  - Estimación del tiempo necesario para que la presión hidrostática en la capa de inyección sea menor que la que tenga el acuífero a proteger más profundo.
  - Predicción de la situación del frente de avance del residuo durante el abandono y la clausura.
- Acciones correctoras:  
Informar a la autoridad competente de todas actuaciones, correcciones o modificaciones que se hayan realizado en el pozo.
- Pozos de control y seguimiento:  
El sistema de control y seguimiento debe incluir piezómetros de control en los que se

registre en continuo la presión y los parámetros de calidad del agua, al menos, hasta el tiempo establecido en el apartado 2c de planes de después del abandono.

No será necesario un control adicional en las instalaciones si el nivel piezométrico de la formación almacén es inferior al nivel piezométrico del acuífero a proteger más profundo.

· Informe final:

Su contenido mínimo incluirá la siguiente información:

- Presentación de un estudio geológico de la zona donde se indique la localización del pozo como punto de referencia. Este estudio geológico debe contemplar la misma información que el estudio geológico inicial indicando si existe alguna modificación debida a la perforación y/o inyección.
- Elaboración de una notificación del estado del pozo que incluya la siguiente información:
  - Volumen total de residuo inyectado en cada pozo y ritmos de inyección.
  - El tiempo total de inyección.
  - La zona de inyección y las características de la capa confinante
  - Relación de los escapes que se han dado durante la inyección y una estimación del rango de escape que pueden tener durante el abandono y la clausura.
  - Conservación de la relación de los volúmenes y la composición del residuo inyectado durante, al menos, tres años después de la clausura.
  - Resultados del control analítico.
  - Resultados de los test de control de estanqueidad.



# abreviaturas, bibliografía y portales web de interés

manual de buenas prácticas

**inyección profunda**  
de rechazos de  
**desalación**



## Abreviaturas

---

- EPA (Environmental Protection Agency)
- GWPC (Ground Water Protection Council)
- ISP (Inyección en sondeos profundos)
- Test SAPT (Test Standard Annulus Pressure)
- UIC (Underground Injection Control)

## Bibliografía

---

Bradshaw, J., Bachu, S., Bonijoly, D., Burruss, R., Christensen, N.P. & Mathiassen, O. M. (2005). *Discussion Paper on CO<sub>2</sub> Storage Capacity Estimation. Phase 1*. The CSLF Technical Group Meeting. Oviedo. Spain.

[http://www.cslf.orum.org/documents/oviedo\\_storage\\_capacity\\_estimation.pdf](http://www.cslf.orum.org/documents/oviedo_storage_capacity_estimation.pdf)

Donalson, Erle C.; Thomas, Rex D.; Johnston, Kenneth H. (1974). *Subsurface Waste Injection in the United States: Fifteen Case Histories*. Bureau of Mines, Washington, D.C.

Frazier, M., Platt, S., Codrington, A. & Heare, S. F. (2006). *Drinking Water Treatment Residual Injection Wells. Technical Recommendations. Technical Report*. Environmental Protection Agency (EPA), Underground injection Control (UIC), National Technical Workgroup (NTW), 36pp.

GWPC (2010). Ground Water Protection Council.

[http://www.gwpc.org/home/GWPC\\_Home.dwt](http://www.gwpc.org/home/GWPC_Home.dwt). Accedida el 21 de enero de 2010

- Hurtado, A.; Eguilior, S.; Prado, A. J.; Ruiz, C.; Campos, R.; Lomba, L.; Pelayo, M.; Pérez del Villar, L.; Recreo, F. (2008). *Almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>: Metodología de estimación de Capacidades*. Comunicación escrita en el IX Congreso Nacional de Medio Ambiente (CONAMA) Madrid. Diciembre 2008. 31pp.
- Johnston, W.R., Tanji, K.K., Burns, R.T. (1997). *Drainage water disposal*. In FAO. Management of agricultural drainage water quality, by C.A. Madramootoo, W.R. Johnston & L.S. Willardson, eds. FAO Water Reports No. 13. Rome.
- Molina, J.A. y Lozano, J. (2009). *Técnicas de perforación de sondeos para captación de aguas subterráneas*. In: Conceptos y Técnicas en hidrogeología. Monografías sobre geología aplicada I.
- Nicot, J. P., Chowdhury, A.H. (2005). *Disposal of brackish water concentrate into depleted oil and gas fields: a texas study*. Desalination, 181: 61-74.
- Ramos, G. (2001). *Gestión de la salmuera de rechazo de las plantas de ósmosis inversa mediante inyección en sondeos profundos (ISP)*. In: Los acuíferos costeros y las desaladoras. Pulido Bosch, A., Vallejo Izquierdo, A., Pulido Leboeuf, P.A. eds. Universidad de Almería. 225-253
- Ramos, G. (2003). *Posibilidades de aplicación de la inyección mediante sondeos profundos a la gestión de salmuera de rechazo de plantas desaladoras en España*. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. 352pp.
- Robin, G. (2005). "Bioslurryfrac" A class V experimental UIC permit. Environmental protection Agency (EPA). Region 9.
- Ruiz, C., Prado, A. J. ; Campos R., Hurtado A., Pelayo M., de la Losa A., Martínez R., Ortiz G., Sastre J., Pérez del Villar L. , Eguilior S., Lomba L., Recreo F. (2009). *Almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>: Criterios de selección de emplazamientos*. X Congreso Nacional de Medio Ambiente (CONAMA).
- Ruiz, C., Recreo, F., Prado, P., Campos, R., Pelayo, M., de la Losa, A., Hurtado, A., Lomba, L., Pérez del Villar, L., Martínez, R., Ortiz, G., Sastre, J., Zapatero, M.A., Suárez, I. y Arenillas, A. (2007). *Almacenamiento geológico de CO<sub>2</sub>. Criterios de selección de emplazamientos*. Informes Técnicos CIEMAT, 1106, 100 pp.
- Saripalli, K.P., Sharma, M.M. & Bryant, S.L. (2000). *Modeling injection well performance during deep-well injection of liquid wastes*. Journal of Hydrology, 227: 41-55.
- UIC (2010). *Underground Injection Control* perteneciente a la EPA (Environmental Protection Agency). Accedida el 10 de enero de 2010.  
<http://www.epa.gov/ogwdw000/uic/>

U.T.E Aquaplan-TEC4 (2007). *Estudi hidrogeologic per l'anàlisi de la viabilitat de la injecció directa de salmorres producte de la desplaçió a la planta d'Abrera d'Atll*. Informe tècnic FCiHS, 90pp.

Van Voorhees, R. F. (2001). *Removed From The Environment*. Environmental Law Institute. Washington. 23-31.

## Portales web de interes

---

- API (American Petroleum Institute):  
<http://www.api.org>
- EPA (Environmental Protection Agency):  
<http://www.epa.gov>
- GWPC (Ground Water Protection Council):  
<http://www.gwpc.org>
- UIC (Underground Injection Control):  
<http://www.epa.gov/ogwdw000/uic>

**Editor:**

Consolider Tragua

**ISBN:**

978-84-695-3633-9

**Diseño y maquetación:**

base 12 diseño y comunicación



manual de buenas prácticas

# inyección profunda de rechazos de desalación



Universidad  
de Alcalá



Universidad  
Rey Juan Carlos

instituto  
**imdea**  
agua

 Convalider  
**tragua**