

PROGRAMA DE VIGILANCIA HIDROGEOLÓGICA (PVH) DEL CENTRO DE ALMACENAMIENTO DE EL CABRIL DE ENRESA (EMPRESA NACIONAL DE RESIDUOS RADIOACTIVOS S.A.)

José Luis Fernández González¹, Alberto Rouco Forcada²

¹ NOTIO-CTAC Centro Tecnológico de Actividades de la Construcción de Castilla-La Mancha, Toledo, España, jl.fernandez@notio.es

² NOTIO-CTAC Centro Tecnológico de Actividades de la Construcción de Castilla-La Mancha, Toledo, España, Alberto.rouco@notio.es

Resumen

El presente trabajo describe la metodología técnica aplicada para el desarrollo del Programa de Vigilancia Hidrogeológica (PVH) del Centro de Almacenamiento (C.A.) El Cabril, orientado al control y seguimiento hidrogeológico del emplazamiento mediante redes de control piezométrico, meteorológico e hidrológico. Se exponen los procedimientos de planificación, adquisición, validación, análisis y gestión de datos hidrogeológicos, así como las actividades de mantenimiento, control instrumental y elaboración de informes técnicos requeridos para garantizar el correcto funcionamiento del programa de vigilancia.

La metodología planteada incluye la gestión de grandes volúmenes de información procedentes de la monitorización piezométrica (manual y automática), estaciones meteorológicas y estaciones hidrológicas, integrando procesos de validación, depuración y análisis de datos mediante herramientas SIG (Sistemas de Información Geográfica) y bases de datos específicas. Asimismo, se describen las actividades de descarga y mantenimiento de registradores automáticos tipo Diver®, la realización de ensayos hidráulicos con la Unidad Móvil de Caracterización Hidrogeológica, muestreos de agua, la perforación y construcción de piezómetros, y la revisión periódica del alcance del PVH.

Los resultados esperados incluyen la actualización continua de bases de datos hidrogeológicas, la elaboración de informes trimestrales y anuales para ENRESA (Empresa Nacional de Residuos Radioactivos S.A) y el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), así como propuestas de optimización de la red de control hidrogeológico del emplazamiento. Por otra parte, toda la información generada en el PVH se distribuye a distintos organismos y empresas con la finalidad de realizar o actualizar distintos modelos hidrogeológicos y de flujo, geoquímicos, etc.

Palabras Clave: Hidrogeología, vigilancia y control hidrogeológico, aguas subterráneas.

1 Introducción

El C.A. El Cabril fue desarrollado en los años 90 por mandato parlamentario. Se trata de una instalación para el almacenamiento de residuos radiactivos de muy baja, baja y media actividad en España. Uno de los aspectos más importantes a considerar en el análisis de la seguridad del C.A. El Cabril es el comportamiento hidrogeológico, hidrogeoquímico y radiológico del entorno en el que se encuentra.

El C.A. El Cabril dispone de un PVH destinado al control y seguimiento de las aguas subterráneas y superficiales del emplazamiento. Dicho programa integra diferentes redes de control piezométrico, meteorológico e hidrológico, cuyo objetivo principal es garantizar la monitorización y el conocimiento continuo del comportamiento hidrogeológico del entorno y apoyar las actividades de supervisión y licenciamiento de la instalación.

NOTIO-CTAC, entidad especializada en hidrogeología y medio ambiente, participa desde el año 2000 en distintos trabajos relacionados con la explotación, mantenimiento y caracterización hidrogeológica del C.A. El Cabril. Entre las actividades desarrolladas destacan la creación y mantenimiento de bases de datos hidrogeológicas, la caracterización hidráulica de sondeos, la explotación de redes de control piezométrico y la integración de información en sistemas de información geográfica (SIG).

El presente trabajo resume las metodologías propuestas para la ejecución de las actividades contempladas en el PVH, incluyendo la planificación del proyecto, el tratamiento y validación de datos, la descarga y mantenimiento de instrumentación, la elaboración de informes técnicos, la revisión del alcance del programa de vigilancia y las actuaciones de perforación de piezómetros, ensayos hidráulicos, muestreos de agua y control hidrogeológico. Con toda la información recopilada se realizan y actualizan diferentes modelos numéricos de seguimiento y control.

2 Objetivos

El presente trabajo persigue varios objetivos interrelacionados que abarcan el conjunto del PVH del C.A. El Cabril. En primer lugar, se describen en detalle las metodologías de trabajo aplicadas al programa, explicando los enfoques técnicos y científicos adoptados para garantizar un seguimiento riguroso y sistemático del comportamiento hidrogeológico del emplazamiento. Estrechamente ligado a ello, se definen los procedimientos de adquisición, validación y gestión de los datos hidrogeológicos, estableciendo los protocolos que aseguran la calidad, trazabilidad y coherencia de la información recopilada a lo largo del tiempo.

Por otro lado, se presentan las actividades llevadas a cabo para el mantenimiento y control de la instrumentación de medida, con el fin de garantizar el correcto funcionamiento de los equipos y la fiabilidad de las lecturas obtenidas. En este mismo marco operativo se establecen los criterios de revisión y optimización de la red de vigilancia hidrogeológica, orientados a mejorar su eficiencia y adaptarla a las necesidades cambiantes de la instalación, incluyendo el apoyo técnico al licenciamiento en todo lo relativo a la ejecución del PVH, así como la realización de ensayos hidráulicos en los sondeos de la red y en sondeos de nueva construcción, los cuales permiten caracterizar con mayor precisión las propiedades del medio subterráneo.

Finalmente, se documentan de forma sistemática los procedimientos de elaboración de informes técnicos y los entregables asociados al programa, con el objetivo de asegurar una comunicación clara y estructurada de los resultados obtenidos y de las actividades desarrolladas.

3 Metodología

3.1 Planificación y gestión del proyecto

La planificación del proyecto contempla la elaboración de un Plan Inicial de Actividades (PIA), un Plan Específico de Prevención de Riesgos Laborales (PE de PRL) y un Plan de Aseguramiento de la Calidad (PAC). Estos documentos definen el alcance de los trabajos, los

recursos humanos y materiales, los procedimientos operativos y los mecanismos de seguimiento y control.

Asimismo, se establecen revisiones trimestrales del programa de actividades mediante informes técnico-económicos de seguimiento, permitiendo detectar desviaciones y proponer medidas correctoras cuando sea necesario.

3.2. Adquisición, gestión y procesado de datos

El PVH genera un gran volumen de información procedente de diversas fuentes, entre las que se encuentran las medidas piezométricas obtenidas tanto de forma manual como automática, los datos meteorológicos registrados en el emplazamiento, los muestreos de agua realizados periódicamente y los registros procedentes de las estaciones de aforo. Esta diversidad de fuentes exige una metodología de gestión de la información estructurada y rigurosa que garantice la coherencia y calidad del conjunto de datos disponibles.

En este sentido, la metodología aplicada contempla, en primer lugar, la conversión y digitalización de los datos brutos recogidos en campo. A continuación, se lleva a cabo la actualización periódica de las bases de datos, asegurando que la información disponible refleje en todo momento el estado actual del sistema hidrogeológico. A partir de estos datos actualizados, se procede a la generación de tablas y gráficos de evolución que permiten visualizar las tendencias y variaciones temporales de las distintas variables monitorizadas, facilitando así su interpretación técnica. Paralelamente, se aplican procedimientos de validación y depuración de registros con el objetivo de identificar y corregir posibles errores, anomalías o datos atípicos que pudieran comprometer la integridad de la información. Cuando se detectan incidencias relevantes, se elaboran reportes técnicos específicos que documentan su naturaleza, origen y las medidas adoptadas para su resolución.

Toda esta información se gestiona mediante herramientas informáticas específicas y sistemas de información geográfica integrados en el entorno de trabajo de ENRESA, lo que permite centralizar, organizar y explotar los datos de manera eficiente, asegurando su accesibilidad y trazabilidad a lo largo de la vida del programa.

3.3. Descarga y mantenimiento de instrumentación

La red de control piezométrico cuenta con registradores automáticos sumergibles tipo Diver® instalados en los piezómetros que conforman la red de vigilancia. Estos dispositivos permiten obtener series temporales continuas de los niveles piezométricos, constituyendo una pieza fundamental para el seguimiento del comportamiento hidrogeológico del emplazamiento. Su correcto funcionamiento es, por tanto, una condición indispensable para garantizar la calidad y continuidad de los datos registrados.

Con el fin de asegurar la operatividad de estos equipos, se llevan a cabo de forma sistemática una serie de actividades de mantenimiento y control. Con periodicidad trimestral se realiza la descarga de los datos almacenados en los registradores, proceso que va acompañado de una verificación funcional de los equipos para comprobar que operan dentro de los parámetros esperados. Asimismo, se efectúan tareas de limpieza y mantenimiento preventivo orientadas a prolongar la vida útil de los dispositivos y a minimizar el riesgo de fallos. En aquellos casos en los que se detecta un funcionamiento anómalo, se procede a la sustitución del dispositivo afectado para evitar lagunas en los registros. Una vez descargada la información, se aplican procedimientos

de validación y correlación de los registros piezométricos, garantizando así la coherencia y fiabilidad de los datos incorporados a las bases de datos del programa.

Las tareas de comprobación se complementan con ensayos funcionales realizados en laboratorio, que permiten verificar el estado de calibración de los equipos antes de su reinstalación. Adicionalmente, se lleva a cabo un control de la presión atmosférica, necesario para corregir correctamente las lecturas de presión registradas por los sensores, así como un análisis detallado del comportamiento de los hidrogramas obtenidos, a partir del cual es posible identificar tendencias, anomalías o respuestas del sistema ante eventos externos que requieran una atención específica.

3.4. Elaboración de informes técnicos

Se elaboran informes trimestrales y anuales que integran de forma estructurada la información procedente de las distintas redes de control, ofreciendo una visión global y actualizada del comportamiento hidrogeológico del emplazamiento.

Estos documentos recogen, en primer lugar, el análisis de los datos meteorológicos registrados en la estación localizada en el C.A. El Cabril, cuyos registros resultan imprescindibles para contextualizar e interpretar la respuesta del sistema hidrogeológico ante las variaciones climáticas. A continuación, se incluye la evaluación de las medidas piezométricas obtenidas tanto de forma manual como automática, abarcando una red de aproximadamente 115 sondeos equipados con sensores y cerca de 100 sondeos con medición manual, lo que proporciona una cobertura espacial amplia y representativa del área de vigilancia.

Complementariamente, se incorpora el análisis de los datos hidrológicos procedentes de las cinco estaciones de aforo distribuidas en el entorno, que permiten caracterizar el régimen de escorrentía superficial y su relación con el medio subterráneo.

Los informes recogen igualmente un registro detallado de las incidencias detectadas durante el período analizado, así como de las labores de mantenimiento llevadas a cabo sobre la instrumentación y la red de control. Todo ello se acompaña de la generación de mapas, tablas y gráficos de evolución que facilitan la interpretación visual de los datos y el seguimiento de las tendencias observadas. El informe anual constituye el principal documento de síntesis del PVH y representa el instrumento de comunicación formal de los resultados del programa ante el CSN, al que va específicamente destinado.

3.5 Revisión del alcance del PVH

El trabajo contempla revisiones periódicas de la funcionalidad de la red piezométrica mediante herramientas de evaluación y análisis multicriterio que consideran aspectos como la posición y representatividad de los puntos de control, las características geológicas e hidrogeológicas del entorno, el tipo y frecuencia de medida empleados, la utilidad hidrogeoquímica y radioquímica de cada punto, así como la evolución piezométrica y el comportamiento hidrodinámico observado. La integración de todos estos criterios permite obtener una visión completa del rendimiento de la red y, a partir de ella, proponer las modificaciones y actualizaciones que resulten necesarias para mejorar la eficacia y adecuación del PVH a lo largo del tiempo.

3.6 Perforación y construcción de piezómetros

El programa incluye la ejecución de nuevos sondeos y piezómetros destinados al seguimiento hidrogeológico de nuevas plataformas de almacenamiento. Los trabajos contemplan perforación con recuperación de testigo continuo, instalación de tubería piezométrica de PVC y acondicionamiento de tramos filtrantes mediante grava silíceo y sellos de bentonita.

3.7 Ensayos hidráulicos en los sondeos de la red de vigilancia

Como información complementaria relevante a la toma de datos de la red de vigilancia de las aguas subterráneas, se realiza la caracterización hidrogeológica de algunos de los piezómetros que la componen, incluyendo los de nueva construcción.

Debido a la importante heterogeneidad del terreno (se trata de materiales metasedimentarios paleozoicos de plataforma siliciclástica de batimetría media-profunda, altamente deformados y fracturados por diferentes fases de deformación), la caracterización de rangos de conductividad hidráulica es variable (entre 10^{-10} y 10^{-3} m/s).

NOTIO utiliza su Unidad Móvil de Caracterización Hidrogeología –diseñada y desarrollada al uso por técnicos y profesionales con más de 20 años de experiencia en trabajos de hidrogeología de campo– está concebida para la realización de trabajos de testificación hidráulica altamente especializados (ensayos de extracción/inyección, cuchareo o slug y pulso) y de muestreo hidrogeoquímico en sondeos situados en zonas de difícil acceso (vehículo ligero de gran movilidad con tracción a las 4 ruedas), con el objetivo de adquirir datos de forma precisa y fiable, minimizando el tiempo necesario para la realización de ensayos en sondeos. Adicionalmente, el equipamiento adscrito a la Unidad permite la testificación hidráulica y la toma de muestras de agua entre obturadores en sondeos de hasta 45° de inclinación y hasta 500 m de profundidad, la medida en continuo de parámetros físico-químicos básicos del agua y la instalación de dispositivos especiales, temporales o permanentes, para el control piezométrico e hidroquímico de acuíferos (Figura 1, Figura 2 y Figura 3).



Figura 1. Unidad Móvil de Caracterización Hidrogeológica de NOTIO.



Figura 2. Instrumentación de la Unidad Móvil de Caracterización Hidrogeológica de NOTIO.

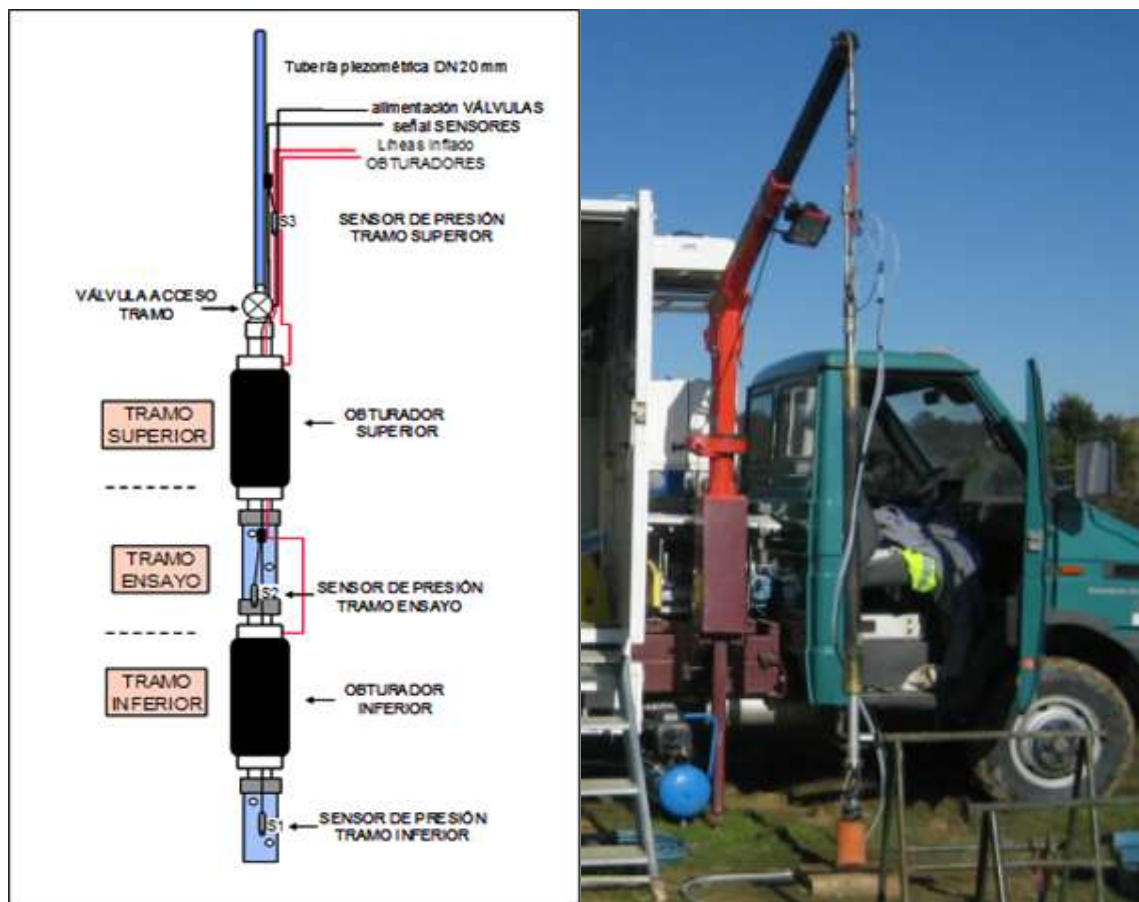


Figura 3. Instrumentación de ensayos hidráulicos.

Se realizan, de menor a mayor conductividad hidráulica (K), los siguientes tipos de ensayos:

3.7.1 Ensayos de Pulso (EP)

Consisten en la extracción o inyección instantánea de un pequeño volumen de agua (decenas de mililitros), midiendo en continuo la recuperación de la variación del nivel piezométrica provocada a presión de la formación. Se utilizan para la determinación de las características hidráulicas de las formaciones menos permeables ($10^{-8} > K > 10^{-10}$ m/s). Por su naturaleza, con este tipo de ensayos no se puede obtener un valor fiable del coeficiente de almacenamiento (S) y sólo se puede hacer en tramos obturados en sondeos sin revestimiento.

3.7.2 Ensayos de Cuchareo o "Slug" (ES)

Al igual que los EP, se trata de la extracción o inyección instantánea de un pequeño volumen de agua, aunque algo mayor que en el caso anterior (desde centenas de mililitros a algunos litros), midiendo en continuo la recuperación de la variación del nivel piezométrica provocada, pero esta vez, a presión atmosférica. Se utilizan para la determinación de las características hidráulicas de las formaciones con una K media-baja ($10^{-6} > K > 10^{-8}$ m/s). Con este tipo de ensayos no se puede obtener un valor fiable del S, pero sí se puede hacer a sondeo abierto (en piezómetros revestidos o con poco espesor saturado) o en tramos obturados (en piezómetros con espesores saturados superiores a 5 m y sin revestimiento interior).

3.7.3. Ensayos de Inyección o Extracción Finita (EIF y EEF)

Consisten en la extracción o inyección agua con caudal constante hasta salir de la influencia del volumen del almacenamiento en sondeo (S_w), midiendo en continuo el caudal y la evolución piezométrica en la fase de inyección o extracción, así como durante la recuperación del mismo. Se utilizan para la determinación de las características hidráulicas de las formaciones con una K media-alta ($10^{-2} > K > 10^{-6}$ m/s). Con este tipo de ensayo solo se puede obtener un valor fiable del S si, durante el ensayo se produce una afección a un punto de control cercano. Los ensayos de extracción se llevan a cabo a sondeo abierto, y los de inyección se pueden hacer tanto a sondeo abierto como entre obturadores.

3.7.4. Ensayos de Interferencia (EI)

Se trata de ensayos similares a los EEF, pero con un periodo de extracción mucho más largo (de unos 5 días). Se utilizan para determinación de conexiones hidráulicas y la caracterización hidráulica de las formaciones geológicas, obteniendo valores experimentales de K y S, en los sitios de interés. Para ello, además de en el punto de extracción se controlan en continuo la evolución del nivel del agua en piezómetros cercanos.

3.7.5. Ensayos para la determinación de Gradientes hidráulicos Verticales (EGV)

Consiste en la determinación de los gradientes hidráulicos verticales potencial de un sector dividiendo la zona saturada de los piezómetros mediante obturadores. El tiempo de obturación es superior a 12 h.

4 Resultados

La aplicación sistemática de la metodología descrita se traduce, en primer lugar, en la actualización continua de las bases de datos hidrogeológicas del emplazamiento. La integración periódica de los datos procedentes de las distintas redes de control (piezométrica, meteorológica, hidrológica e hidrogeoquímica) garantiza que la información disponible refleje en todo momento el estado real del sistema, constituyendo un repositorio sólido y fiable sobre el que sustentar cualquier análisis o toma de decisiones técnicas.

Asociado a lo anterior, la metodología implementada permite una mejora progresiva del control y la validación de la información piezométrica, reduciendo la presencia de errores o registros anómalos y aumentando la coherencia del conjunto de datos. Este proceso de depuración continua, combinado con las revisiones periódicas de la red, favorece asimismo la optimización de la red de vigilancia, adaptando su configuración, densidad y frecuencia de medida a las necesidades reales del programa y al comportamiento observado del medio hidrogeológico.

Otro resultado relevante es la generación de informes técnicos periódicos, tanto trimestrales como anuales, que sintetizan la evolución del sistema y documentan las incidencias y actuaciones realizadas. Estos informes, destinados al CSN, se complementan con la integración de la información hidrogeológica en sistemas de información geográfica, lo que permite una visualización espacial avanzada de los datos y facilita su interpretación en el contexto del emplazamiento.

Finalmente, el conjunto de resultados obtenidos proporciona un apoyo técnico sólido al proceso de licenciamiento y supervisión del emplazamiento, aportando la evidencia científica necesaria para respaldar las decisiones regulatorias. Asimismo, la información acumulada y validada contribuye a la actualización periódica de los modelos numéricos asociados al emplazamiento, incluyendo los modelos hidrogeológicos, de flujo y geoquímicos, cuya calibración y mejora continua son esenciales para el adecuado seguimiento a largo plazo del comportamiento del sistema.

5 Conclusiones

La metodología propuesta para el PVH del C.A. El Cabril permite garantizar un control sistemático y trazable del comportamiento hidrogeológico del emplazamiento mediante procedimientos normalizados de adquisición, validación y análisis de datos.

La integración de redes de control piezométrico, meteorológico e hidrogeológico, junto con el empleo de sistemas de información geográfica y protocolos de aseguramiento de calidad, proporciona una base técnica sólida para la supervisión hidrogeológica de la instalación.

Asimismo, la revisión periódica del alcance del PVH y las actuaciones de mantenimiento e instrumentación contribuyen a optimizar la funcionalidad de la red de vigilancia y a mejorar la capacidad de respuesta ante posibles incidencias o necesidades regulatorias.

En la actualidad, NOTIO-CTAC desarrolla otros proyectos para ENRESA en las zonas donde se tiene previsto ampliar el C.A. El Cabril. Toda la información generada en estos proyectos de investigación será incluida progresivamente en el PVH.