

### Memoria Anual 2021

Servicio de Seguimiento Hidrogeológico de Sardas, 2020-2022

Exp.: 1404-4422-2019/19

Cliente:





Programa Operativo Fondo Europeo de Desarrollo Regional de Aragón 2014-2020

Construyendo Europa desde Aragón

Código: A-513009-475

Marzo 2022

Santiago Rusiñol 12. 28040 Madrid (ESPAÑA)

Teléfono: +34 91 411 92 15 | Fax: +34 91 564 58 05

Contacto: info@emgrisa.es www.emgrisa.es









#### **ÍNDICE GENERAL**

0.	RESUMEN EJECUTIVO	10
1.	INTRODUCCIÓN	13
2.	ANTECEDENTES	14
2.1.	ANTECEDENTES GENERALES	14
2.2.	ANTECEDENTES EN EL VERTEDERO DE SARDAS	14
3.	OBJETIVO Y ALCANCE DE LOS TRABAJOS	16
4.	SEGUIMIENTO HIDROGEOLÓGICO Y CONTROL DE LA PLUMA DE FASE LIBRE	17
4.1.	TOPOGRAFÍA Y DISTRIBUCIÓN ZONAL DE PUNTOS DE CONTROL EN EL EMPLAZAMIENTO	17
4.2.	PRECIPITACIONES	20
4.3.	SEGUIMIENTO PIEZOMÉTRICO Y CONTROL DE ESPESORES	22
4.3.	Seguimiento piezométrico	22
4.3.2	Control de espesores de residuo libre	33
4.4.	CONTROL DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS	37
4.4.	1 Medidas manuales de parámetros	37
4.4.2	Seguimiento en continuo de parámetros	39
4.5.	PERFORACIÓN DE SONDEOS	39
4.6.	PURGAS, BOMBEOS Y CONTROL DE LIXIVIADOS	41
4.6.	1 Purgados	42
4.6.2	2 Desarrollos	44
4.6.3	Abatimiento de niveles el vaso de vertido	48
4.6.4	4 Drenaje cabecera	49
4.6.5	Control de salidas al pie del vertedero	51
4.7.	CONTROL DE RESIDUOS	52
4.8.	MUESTREOS DE SEGUMIENTO	53
4.8.2	1 Muestreo de control de aguas superficiales y lixiviados	53
4.8.2	2 Muestreo de seguimiento de aguas subterráneas	58
5.	TRATAMIENTOS DE DESCONTAMINACIÓN	69
5.1.	TRATAMIENTOS FISICOQUÍMICOS	70
5.1.3	1 Extracción mejorada con surfactantes (SEAR)	70
5.1.2	, 6	
5.1.3	,	
5.2.	TRATAMIENTO EN MEDIOS DE BAJA PERMEABILIDAD, TÉCNICAS ELECTROCINÉTICAS	86
5.2.	•	
5.2.2	Ensayos de tratamiento electrocinético (UCLM)	89
5.3.	TÉCNICAS DE BIOREMEDIACIÓN	102
5.3.	1 Introducción y estrategia	102
5.3.2	2 Inventario de fuentes de inóculos	105







5.3.3	Etapa 0. Análisis de la información existente (2020)	108
5.3.4	Etapa 1. Caracterización química del acuífero afectado	109
5.3.5	Etapa 2 Determinación de actividad biológica degradadora	110
5.3.6	Resultados y conclusiones	113
5.4. F	ITORREMEDIACIÓN EN RELLENOS DEL PIE DEL VERTEDERO	118
5.4.1	Introducción y objetivos	118
5.4.2	Preparación del ensayo	119
5.4.3	Previsión actividades fitorremediación 2022	121
	ODELIZACIÓN MATEMÁTICA	
6.1. A	ACTUALIZACIÓN DE LOS MODELOS DE FLUJO	122
6.1.1	Actualización del modelo 3D de flujo del vertedero de Sardas	122
6.1.2	Actualización del modelo de flujo 2D en planta a través del aluvial del río Gállego	124
6.1.3	Modelo 3D de transporte de solutos del vertedero	
6.2. C	CUANTIFICACIÓN DEL FLUJO MÁSICO DE LOS CONTAMINANTES	125
6.3. II	DENTIFICACIÓN, DELIMITACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE ENTRADAS	125
6.4. N	MODELOS DE ENSAYOS DE TRAZADORES, SURFACTANTES E ISCO	127
7. AD	PECUACIÓN Y MEJORA DE LAS INSTALACIONES	128
7.1. II	NSTALACIÓN DE DEPÓSITO DE AGUA DE RED DE 10 M³	128
7.1.1	Ubicación	128
7.1.2	Solución adoptada y Justificación	128
7.1.3	Descripción de las instalaciones y obra	130
7.2. V	VIAL ACCESO Y APARCAMIENTO, OFICINAS Y VESTUARIOS BLANCO Y NEGRO	133
7.2.1	solución adoptada y Justificación	133
7.2.2	Descripción de las instalaciones y obra	134
7.3. C	OTRAS ACTUACIONES	136
7.4. II	NCIDENCIAS OCURRIDAS	139
8. CO	NCLUSIONES Y PROPUESTAS DE MEJORA	140
8.1. C	CONCLUSIONES	140
8.2. P	PRÓXIMAS ACTUACIONES Y PROPUESTAS DE MEJORA	143







PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

#### **LISTADO DE PLANOS**

- Plano 1. Localización geográfica
- Plano 2. Mapa geológico
- Plano 3.1. Puntos de la red piezométrica y nuevos sondeos
- Plano 3.2. Puntos no operativos
- Plano 4.1. Puntos de muestreo y control de aguas superficiales y lixiviados
- Plano 4.2. Pozos de bombeo de fase libre
- Plano 4.3. Distribución zonal de puntos de control en el emplazamiento
- Plano 4.4. Puntos equipados con sensor de presión durante 2021
- Plano 5.1. Pluma de DNAPL General
- Plano 5.2. Pluma de DNAPL en relleno
- Plano 5.3. Pluma de DNAPL en limos
- Plano 5.4. Pluma de DNAPL en aluvial
- Plano 5.5. Pluma de DNAPL en FAD
- Plano 5.6. Pluma de DNAPL en marga
- Plano 6.1. Cartografía del vuelo de 1956
- Plano 7.1. Isolíneas del techo de los limos
- Plano 7.2. Isolíneas del techo de las gravas
- Plano 7.3. Isolíneas del techo de la marga
- Plano 7.4. Isopacas de limos
- Plano 7.5. Isopacas de gravas
- Plano 8.1. Evolución de isoconcentraciones de clorobenceno en el aluvial
- Plano 8.2. Evolución de isoconcentraciones de HCH en el aluvial
- Plano 9.1. Modelo conceptual. Perfil hidrogeológico del emplazamiento
- Plano 9.2. Perfiles hidrogeológicos zona frente del vertedero (faltan detalles)
- Plano 9.3. Perfiles evolución del emplazamiento 1950-2022
- Plano 10.1. Plano as built de instalaciones. Planta general
- Plano 10.2. Acceso zona de oficinas y blanco y negro
- Plano 10.3. Depósito de agua y reubicación blanco y negro superior







Programa Operativo Fondo Europeo de Desarrollo Regional de Aragón 2014-2020 Construyendo Europa desde Aragón

PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

#### **ANEXOS**

Anexo 1.	Aplicación de tratamiento fisicoquímico IMPROQUIMA (UCM)
Anexo 2.	Validación y diseño de técnicas electrocinéticas para la remediación de los limos del aluvial al
	pie del vertedero de Sardas (TEQUIMA UCLM)
Anexo 3.	Estudio y validación de técnicas de biorremediación para el tratamiento del acuífero aluvial al
	pie del vertedero de Sardas. Informe técnico de la etapa 2 (Biorem UAB)
Anexo 4.	Hidrogeología y modelos de balance hidrológico, modelos de flujo subterráneo y trpte. de
	contaminantes en los emplazamientos afectados por INQUINOSA: 3ª fase (ACUATERRA UDC)
Anexo 5.	Ensayos preliminares para la aplicación de una estrategia de fitorremediación en la parcela al
	pie del vertedero de Sardas (IMIDRA)
Anexo 6.	Registros de sondeos 2021
Anexo 7.	Seguimiento piezométrico, datos manuales
Anexo 8.	Seguimiento piezométrico, datos extraídos de sensores de presión
Anexo 9.	Datos manuales de conductividad y temperatura 2020
Anexo 10.	Seguimiento de conductividades y temperaturas, datos extraídos de sensores de presión
Anexo 11.	Resultados analíticos control de aguas superficiales y lixiviados 2020

Anexo 12. Resultados analíticos seguimiento de aguas subterráneas







#### **ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1. Perfiles de la evolución histórica del emplazamiento	15
Figura 2. Precipitación mensual acumulada del año 2021	21
Figura 3. Evolución de la precipitación del año 2021	21
Figura 4. Precipitaciones anuales acumuladas (mm)	22
Figura 5. Sonda de presión electrónica sobre la base de descarga de datos USB	23
Figura 6. Cotas agua en sensores de presión y precipitaciones Zona 1. Perimetrales parta alta	26
Figura 7. Cotas agua en sensores de presión y precipitaciones Zona 2. Vaso de vertido	27
Figura 8. Cotas de agua en datos manuales en margen derecha de la carretera N-330. Año 2021	28
Figura 9. Cotas de agua en datos manuales en limos parcela al pie. Año 2021	29
Figura 10. Cotas de agua en sensores de presión y precipitaciones en Zona 6. Aluviales al pie. 2021	30
Figura 11. Cotas de agua en sensores de presión y precipitaciones en Zona 8. Margas al pie. 2021	31
Figura 12. Cotas de agua en sensores de presión y precipitaciones en Zona 2. Vaso de vertido. 2021	32
Figura 13. Registro anual de precipitaciones (mm) y bombeo de lixiviados en S37	33
Figura 14. Representación de la presencia de DNAPL en el emplazamiento	35
Figura 15. Extracción de DNAPL en el emplazamiento de Sardas 2010-2021	42
Figura 16. Ubicación del dren de cabecera sobre cartografía de 1956	50
Figura 17. Hidrograma del dren de cabecera abril-diciembre 21	51
Figura 18. Caudales del aforador Parshall 2021	52
Figura 19. Concentraciones HCH y CB ST1C. 2015-2021	68
Figura 20. Zona de actuación SEAR en perfil.	70
Figura 21. Ubicación de los piezómetros monitorizados en SEAR.	71
Figura 22. Perfiles predichos en UCM para F, eq (1) en el Evento 3 altura de capa de gravas 1 m	72
Figura 23. Fotografía de DNAPL decantado a 7-8 h de reposo tras bombeo en evento 4	76
Figura 24. Esquema de la planta de tratamiento mediante hidrólisis alcalina (línea 1)	77
Figura 25. Esquema depósitos de recepción principales	79
Figura 26. Esquema dosificación.	79
Figura 27. Esquema del reactor de hidrólisis y aireación	80
Figura 28 . Esquema filtros carbón activado	80
Figura 29. Hidrólisis alcalina sómero HCH y pentaciclohexenos (PentaCX) a triclorobencenos (TCBs)	83
Figura 30. Hidrólisis isómeros (HeptaCH) y hexaciclohexenos (HexaCX) a (TetraCBs)	83
Figura 31. Conversión COCs suelo en caso 2 en tres eventos de inyección y dist. inyección (PS14M)	84
Figura 32. Fotografía previa a la construcción de la variante de la N-330	86
Figura 33. Concentraciones de HCH limos someros (suma de isómeros) Estudio 2010	87
Figura 34. Actuaciones realizadas durante el primer año de ejecución del proyecto "electro"	90
Figura 35. Esquema instalación experimental para el estudio de movilidad de contaminantes	91
Figura 36. Dispositivo experimental para ensayos electrorrem. disposición a) vertical; b) horizontal	92
Figura 37. Esquema de la instalación empleada para el estudio de volatilización	92
Figura 38. Difusividad a) y velocidad efectiva b) por familias de compuestos	95
Figura 39. Vista de la instalación de 12 maquetas correspondientes a la Secuencia 1 de ensayos	96







Figura 40. Vista superior de maquetas a) cabezales herméticos para pozos + agujero para lodos; b
electrodos clavados en el suelo + relleno de lodo; c) vista final con arena superficial97
Se han llevado a cabo dos estrategias de ensayos, en los primeros de ellos los electrodos se instalaron
dentro de un pozo de electrolito, y en los segundos los electrodos estaban directamente clavados en
el suelo como se muestra en la93
Figura 41. Difusividad efectiva a) maquetas electrodos pozo electrolito; b) electrodos clavados suelo 98
Figura 42. Velocidad efectiva a) maquetas electrodos pozo electrolito; b) electrodos clavados suelo 98
Figura 43. Cantidad de compuestos evaporados en %99
Figura 44. Variación temporal intensidad de corriente. Campo eléctrico 1.0 V/cm en cuatro maquetas 103
Figura 45. Esquema conceptual de barrera reactiva en planta 103
Figura 46. Esquema conceptual de barrera biorreactiva en perfil104
Las placas de Petri de medio genérico consisten en un preparado comercial de agar y nutrientes que
favorecen el crecimiento de la mayoría de los géneros de bacterias aerobias ( 10!
Figura 47. Crecimiento de colonias en medio genérico. Muestra de agua del pozo PS5E 100
Figura 48. Fuentes de carbono de las placas Biolog Ecoplate100
Figura 49. Placa Biolog Ecoplate de muestra del pozo PS5E. El color violeta indica actividad metabólica 103
Figura 50. Configuración de la placa MT2 108
Figura 51. Ubicación de los pozos de estudio. Isoconcentraciones de suma de HCH (jun. 21) 113
Figura 52. Microcosmos experimentales para cada tratamiento con agua subterránea de los 3 pozos 113
Figura 53. Resultados concentración de compuestos organoclorados microcosmos pozo PS16E a 13°C. 114
Figura 54. Preparación de suelo para ensayo de fitorremediación119
Figura 55. Diseño del ensayo de fitorremediación en el umbráculo120
Figura 56. Contenedores para ensayo de fotorremediación
Figura 57 Esquema conceptual del vertedero con principales entradas y salidas 120
Figura 58. Cuneta perimetral en escalera sobre viga zona S35E y S35F. Prueba de flujo subsuperficial 120
Figura 59. Módulo de la velocidad real calculada cerca del sondeo PS16K123
Figura 60. Ubicación del depósito de agua de 10 m3128
Figura 61. Plano de la solución adoptada para el depósito de agua129
Figura 62. Fotografía de detalle de zanjas y conducciones junta a depósito 130
Figura 63.Fotografía del depósito de PRFV 10 m <sup>3</sup> 13:
Figura 66. Esquema y características grupo automático de presión G-S ROMA 5.5
Figura 67. Bomba dosificadora y contador de impulsos para cloración133
Figura 68. Fotografía de perspectiva general nuevo de acceso, aparcamiento y oficinas y B/N 133
Figura 69. Obra de construcción de acceso al emplazamiento de Sardas







#### **ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1. Distribución de puntos de control Sardas. Ano 2021	18
Tabla 2. Coordenadas sondeos ejecutados en 2021	19
Tabla 3. Datos de precipitación mensual	20
Tabla 4. Campañas manuales de niveles piezométricos. Año 2021	23
Tabla 5. Resumen <i>Divers</i> 2021	24
Tabla 6. Puntos equipados con sensores de control 2021	25
Tabla 7. Campañas manuales de fondos de piezómetro realizadas. Año 2021	34
Tabla 8. Campañas perfiles de parámetros fisicoquímicos realizadas. Año 2021	37
Tabla 9. Características de las perforaciones realizadas en 2021	40
Tabla 10. Campañas de purgado realizadas. Año 2021	43
Tabla 11. Resultados campañas de purgado. Año 2021	44
Tabla 12. Resumen de los trabajos de desarrollo de piezómetros ejecutados. 1º trimestre 2021	45
Tabla 13. Resumen de los trabajos de desarrollo de piezómetros ejecutados. 3º trimestre 2021	46
Tabla 14. Resumen de los trabajos de desarrollo de piezómetros ejecutados. 4º trimestre 2021	48
Tabla 15. Volúmenes de lixiviados extraídos desde S37. Año 2021	49
Tabla 16. Volúmenes de entradas drenados y precipitación 2021 (inicio aforo en abril)	50
Tabla 17. Muestras de aguas superficiales tomadas. 2021	54
Tabla 18. Características de los puntos de control. 2021	54
Tabla 19. Analíticas aguas superficiales	55
Tabla 20. Muestras de lixiviados tomadas. 2021	56
Tabla 21. Características de los puntos de control. 2021	56
Tabla 22. Analítica de lixiviados	56
Tabla 23. Muestreas tomadas. Seguimiento trimestral 2021	59
Tabla 24. Muestreos de aguas subterráneas realizados. Seguimiento trimestral 2021	59
Tabla 25. Analíticas seguimiento trimestral	61
Tabla 26. Muestras de aguas subterráneas seguimiento quincenal. 2021	66
Tabla 27. Analíticas seguimiento quincenal	67
Tabla 28. Eventos de inyección de surfactante (trazador según casos) abr. – Oct. 21. Zona PS14s	73
Tabla 29. Fracciones másicas del DNAPL del suelo del aluvial de Sardas antes y después de alcalinizar.	83
Tabla 30. Valores de la velocidad efectiva y la difusividad efectiva de las especies evaluadas	94
Tabla 31. Condiciones experimentales testigos secuencia 1	100
Tabla 32. Resultados analíticos caracterización biorremediación. Dic 2020	109
Tabla 33. Parámetros más significativos de los pozos de muestreo seleccionados	110
Tabla 34. Esquema de microcosmos que se construyen para cada pozo y tiempos de muestreo	112
Tabla 35. Porcentajes de eliminación de compuestos organoclorados tras tratamiento secuencial	116
Tabla 36.Caudales medios de entrada de agua al vertedero (m3/d)	127







#### **0. RESUMEN EJECUTIVO**

Los principales **objetivos y líneas de trabajo** del Seguimiento Hidrogeológico de Sardas durante 2021 han sido siguientes:

- Control, seguimiento y mejora de la seguridad ambiental del emplazamiento para minimizar el riesgo de que el medio receptor principal (el río Gállego) se vea afectado por el vertedero de Sardas
- **Descontaminación** del emplazamiento mediante el bombeo y tratamiento de residuo libre, lixiviados y aguas subterráneas para evitar y minimizar la afección al río Gállego
- Investigación de técnicas de tratamiento de suelos y aguas subterráneas con la participación de la UCM, UDC, UCLM, UAB y UPM para la aplicación de nuevas técnicas de tratamiento y la mejora de las disponibles
- Mejora del modelo conceptual del vertedero con el trabajo de caracterización e interpretación continuo y el empleo de modelos matemáticos para confirmar el correcto análisis de la situación y optimizar la gestión ambiental del emplazamiento
- Mantenimiento y mejora de las instalaciones de bombeo, drenaje, vestuarios y oficinas
- Prevención de los riesgos laborales del personal participante en el seguimiento es una prioridad continua del Servicio.

#### Seguimiento Hidrogeológico y mejora de la seguridad ambiental

El control y seguimiento de la situación ambiental del vertedero de Sardas se llevado a cabo mediante la toma y análisis de cientos de muestras de aguas subterráneas, aguas superficiales, lixiviados, residuo libre y suelos. Se han analizado diversos parámetros, además las habituales concentraciones de compuestos organoclorados, también iones y metales, para control biológico, parámetros geotécnicos, etc. Asimismo, se han recogido miles de datos *in situ*, tanto manualmente como de forma automática.

Como en anteriores servicios y por evidentes motivos de seguridad y fiabilidad, la prioridad en cuanto al drenaje de aguas, lixiviados, fluidos de limpiezas, etc., es favorecer el movimiento por gravedad de los fluidos frente al bombeo.

Del seguimiento realizado se desprende que la situación ambiental del emplazamiento es estable respecto de años anteriores.

#### Descontaminación

La descontaminación del emplazamiento, en función de la naturaleza de la matriz (gravas, rellenos, etc.) y su grado de afección, se plantea como un tren de actuaciones que abarcan desde técnicas ya probadas y operativas, como el **bombeo de fase libre organoclorada** a través de los más de 15 pozos de bombeo que se viene realizando en el emplazamiento desde 2010; o su **extracción mejorada con surfactante** (SEAR por sus siglas en inglés), desarrollada en los últimos 5 años del Servicio; hasta otras técnicas en desarrollo o investigación como la oxidación química, la biorremediación o técnicas electrocinéticas.

Durante 2021 se ha extraído del subsuelo mediante bombeo, un total de 1.880 m³ de lixiviados y aguas subterráneas. La mayor parte correspondientes a lixiviados del vertedero bombeados para el abatimiento del nivel en el vaso de vertido con el fin de evitar surgencias. Por ota parte, se han extraído mediante bombeo







neumático 38 m³ de aguas subterráneas y fase libre desde los pozos y 28 m³ mediante desarrollos con camión autoaspirante. 1,53 m³ corresponden a residuo libre organoclorado. El volumen acumulado de fase libre extraída es de unos 12 m³.

Se han tratado las aguas subterráneas mediante SEAR, *Surfactant Enhanced Aquifer Remediation*, por sus siglas en inglés. El tratamiento realizado entre abril y octubre de 2021, ha consistido en la ejecución de 8 eventos de inyección de una solución con surfactante en el acuífero y el posterior bombeo y tratamiento.

#### Investigación de técnicas de tratamiento

Las líneas generales de acción anteriormente descritas para la descontaminación, así como la complejidad técnica en general del emplazamiento confieren un claro carácter multidisciplinar al Servicio de Seguimiento hidrogeológico de Sardas que EMGRISA ha potenciado con la incorporación a su equipo de varios grupos de investigación de ámbito universitario especialistas en sus respectivos campos:

- Grupo de investigación IMPROQUIMA (INtensificación de PROcesos de interés QUImico y MedioAmbiental) de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Complutense de Madrid con la coordinación de Aurora Santos.
- Laboratorio de Ingeniería Electroquímica y Ambiental (Electrochemical & Environmental Engineering
   Lab E3L) de la Universidad de Castilla la Mancha con Manuel Rodrigo
- Grupo de Investigación Consolidado de Degradación de Contaminantes Industriales y Valorización de Residuos del Departamento de Ingeniería Química, Biológica y Ambiental de la Universidad Autónoma de Barcelona (DIQBA) coordinado por Teresa Vicent.
- Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario (IMIDRA), con Carmen Lobo.

En relación con la investigación de técnicas de tratamiento se han tomado y analizado cientos de muestras de aguas subterráneas, lixiviados, fase libre y suelos para aportar datos a los grupos de investigación; se han llevado a cabo ensayos en laboratorio de técnicas electrocinéticas con suelo real y con maquetas de suelo.

Se ha llevado a la práctica la extracción mejorada con surfactantes (SEAR) con la validación de la aplicabilidad de la técnica en el aluvial del Gállego y la mejora en el ajuste de dosificaciones, caudales y tiempos. En cuanto a técnicas electrocinéticas se ha continuado con la realización de ensayos con suelos reales y en maquetas con la obtención de parámetros para el diseño y la validación de la metodología de los ensayos.

#### Mejora del modelo conceptual

La mejora continua del modelo conceptual del vertedero y su entorno inmediato con el trabajo de caracterización e interpretación continuo y el empleo de modelos matemáticos es fundamental para confirmar el correcto análisis de la situación y optimizar la gestión ambiental del emplazamiento.

Para ello se ha ampliado la red de control con la perforación de 27 nuevos sondeos con un total de 469 m de perforación que ha permitido la mejora de la caracterización, la reducción de incertidumbres, así como la inclusión de nuevos puntos significativos en el control analítico rutinario. Existen en el emplazamiento un total de 170 piezómetros de control.







Destaca la mejora de la caracterizado los suelos bajo la carretera N330, que intersecta el emplazamiento, mediante la perforación de 11 sondeos sobre el terraplén de la carretera en su margen descendente (oeste).

En la mejora del modelo conceptual del vertedero de Sardas, han intervenido el grupo de investigación AQUATERRA (Gestión Sostenible de Recursos Hídricos y del Suelo) de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de A Coruña, dirigido por **Javier Samper**, para el desarrollo de modelos matemáticos de flujo de aguas subterráneas en continuidad con lo realizado en 2020.

- Actualización de los modelos de flujo
- Cuantificación del flujo másico de los contaminantes que salen del vertedero y del flujo másico de salida de los contaminantes del emplazamiento de Sardas a través de las gravas del aluvial hacia el embalse
- Identificación, delimitación y cuantificación de las principales zonas de entrada de agua al vertedero de Sardas
- Modelos de los ensayos de trazadores, ensayos ISCO y ensayos con surfactantes

#### Mantenimiento y mejora de las instalaciones

Entre las principales actuaciones relacionadas con la mejora de las instalaciones del emplazamiento y su mantenimiento destacan la construcción de un nuevo vial de acceso al emplazamiento, la instalación de las oficinas y vestuarios blanco y negro en Sardas, así como la colocación de un depósito de agua potable y la reubicación del blanco y negro de la parte alta del vertedero.

Además se ha realizado una limpieza general de las cunetas perimetrales del vertedero incluyendo el desbroce de la vegetación más próxima para facilitar el correcto drenaje de las aguas superficiales.







#### 1. INTRODUCCIÓN

Los trabajos del Seguimiento Hidrogeológico de Sardas descritos en este documento los realiza la Empresa para la Gestión de Residuos Industriales S.A., S.M.E., M.P. (en adelante EMGRISA) en el ámbito de los contratos de servicio promovidos por el Departamento de Agricultura, Ganadería y Medio Ambiente del Gobierno de Aragón (en adelante DGA): "Seguimiento Hidrogeológico de Sardas 2020-2022", con número de expediente: 1404-4422-2019/19

El presente informe incluye la relación de trabajos ejecutados durante el año 2021, los resultados obtenidos y un análisis de estos.

En esta memoria se reúne la descripción de los trabajos del Servicio de Seguimiento Hidrogeológico, así como todos los asociados al mismo, entre ellos, destacan el bombeo de fase libre densa (DNAPL), la campaña de sondeos, ensayos hidrogeológicos, ensayos de tratamiento, muestreos, mediciones de niveles y diversos parámetros, obras para la mejora del drenaje de lixiviados y de su vertido a balsas y del sistema de bombeo, etc.

Todos estos trabajos han quedado reflejados en notas técnicas mensuales, informes trimestrales de seguimiento e informes específicos. En este documento se resumen los datos más significativos de estos informes a los que se añaden propuestas de mejora para años sucesivos, así como conclusiones.

En esta memoria se incluyen los trabajos de colaboración con EMGRISA de los equipos de investigación que conforman el equipo de trabajo de EMGRISA en el Servicio de seguimiento:

- Grupo de investigación IMPROQUIMA (INtensificación de PROcesos de interés QUImico y MedioAmbiental) de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Complutense de Madrid.
- Grupo de investigación Gestión Sostenible de Recursos Hídricos y del Suelo (AQUATERRA) de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de La Coruña.
- Laboratorio de Ingeniería Electroquímica y Ambiental (Electrochemical & Environmental Engineering Lab E3L) de la Universidad de Castilla la Mancha
- Grupo de Investigación Consolidado de Degradación de Contaminantes Industriales y Valorización de Residuos del Departamento de Ingeniería Química, Biológica y Ambiental de la Universidad Autónoma de Barcelona (DIQBA)
- Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario (IMIDRA).

Estos grupos de investigación han participado en la realización de ensayos y tratamiento de aguas y suelos, así como en la modelización matemática del flujo de las aguas subterráneas, en fitorremediación y en la mejora del modelo conceptual del emplazamiento.







#### 2. ANTECEDENTES

#### 2.1. ANTECEDENTES GENERALES

El lindano, uno de los isómeros del hexaclorociclohexano (HCH), ha sido uno de los pesticidas más usados en todo el mundo en épocas recientes. A causa de su peligrosidad y persistencia en el medio ambiente, el lindano y varios isómeros del HCH han sido incluidos en la lista de contaminantes orgánicos persistentes (POP por sus siglas en inglés) del Convenio de Estocolmo.

En España, el lindano fue producido en 4 factorías: dos de ellas situadas en el País Vasco; una tercera en Galicia y la cuarta en Sabiñánigo (Huesca), la antigua fábrica de Inquinosa, que aún hoy permanece en estado de ruina y sin desmantelar a escasos 10 m del cauce del río Gállego. Inquinosa produjo lindano desde 1975 hasta 1988 y cesó su actividad definitivamente en 1992. Durante este periodo se estima que Inquinosa produjo más de 150.000 t de residuos con alto contenido en lindano, HCH y otros compuestos organoclorados, no en vano por cada kg de lindano producido, se generan aproximadamente 10 kg de residuos de otros isómeros de HCH. Estos residuos, en forma de polvo y de líquido, se vertieron de forma incontrolada en el vertedero de Sardas y posteriormente en el vertedero de Bailín, que fue construido expresamente para este tipo de residuos.

Por tanto, en el entorno de Sabiñánigo existen tres emplazamientos con una importante problemática ambiental relacionada con los residuos de producción de lindano. La antigua factoría de Inquinosa, el vertedero de Bailín y el vertedero de Sardas.

#### 2.2. ANTECEDENTES EN EL VERTEDERO DE SARDAS

El vertedero de Sardas fue sellado en 1997 aunque de forma deficiente y con una parte importante de los residuos fuera del sellado. La problemática del vertedero de Sardas parecía controlada tras el sellado del mismo en 1997 y no fue hasta 2009 cuando se detectó producto libre (DNAPL, *Dense Non Aqueous Phase Liquid*) en los lixiviados que salían a la superficie en la parcela situada al pie del vertedero y a escasos metros del río Gállego (embalse de Sabiñánigo). Desde entonces, el Gobierno de Aragón, y puntualmente el Ministerio de Medio Ambiente, vienen acometiendo trabajos de caracterización y descontaminación.

El emplazamiento de Sardas está compuesto por el propio vertedero y la parcela al pie de este. La carretera N-330 divide al emplazamiento en dos. Los focos principales de afección están constituidos por una zona con presencia de fase libre líquida densa (DNAPL) compuesta por una mezcla de hidrocarburos clorados con lindano y otros isómeros de HCH, clorobencenos, clorofenoles, benceno, etc. cuya densidad es de 1,5 t/m³, por tanto, bastante más denso que el agua, lo cual tiene muy importantes implicaciones técnicas que dificultan los trabajos tanto de caracterización como de control y descontaminación. Esta zona se encuentra situadas en el interior del vaso de vertido, en la parcela al pie y bajo la carretera N330, formando una línea continua desde la cabecera del vertedero hasta las parcelas al pie.

Los trabajos realizados hasta la fecha han consistido básicamente en la caracterización del emplazamiento y establecimiento de un modelo conceptual, así como en la contención de la pluma de afección mediante el bombeo de fase libre y lixiviados y el tratamiento con surfactantes. También se han realizado estudios y ensayos, tanto en laboratorio como *in situ* de diferentes técnicas de descontaminación, entre ellas la





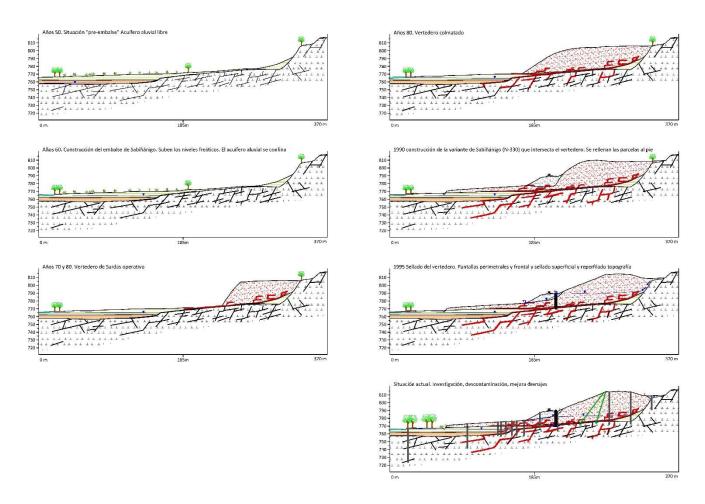


PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

desorción térmica, oxidación, reducción con nanopartículas de hierro cerovalente (nZVI), extracción de fase libre mejorada con surfactantes (SEAR) o técnicas biológicas.

Se dispone de una red con cerca de 180 piezómetros y pozos con más de 2.000 m de perforación ejecutada y se ha instalado un sistema de bombeo de lixiviados y fase libre así como un sistema de drenaje de las surgencias al pie del vertedero que vierte en las balsas de lixiviados para su depuración.

Figura 1. Perfiles de la evolución histórica del emplazamiento









#### 3. OBJETIVO Y ALCANCE DE LOS TRABAJOS

Los trabajos realizados por parte de EMGRISA consisten en el seguimiento de la red piezométrica y control de las aguas subterráneas en el vertedero de Sardas y su entorno inmediato, muestreos y analíticas de la calidad de las aguas a diferentes profundidades, bombeos de lixiviados en la zona de surgencias de HCH, control de las salidas del propio vertedero, la extracción periódica de fase libre organoclorada acumulada en los piezómetros equipados con dispositivos de bombeo. Los trabajos también comprenden la realización de ensayos, la mejora y mantenimiento de las instalaciones existentes, así como la actualización de la modelización matemática del flujo de aguas subterráneas, etc.

También la realización de obras de mejora de las instalaciones de bombeo y drenaje de lixiviados constituyen una parte importante de los trabajos. Todo ello con la finalidad de:

- Actualizar el diagnóstico de la situación y funcionamiento del vertedero de Sardas.
- Determinar cualitativamente la tasa de afluencia de producto libre a los piezómetros para valorar los diferentes horizontes de movilización.
- Descontaminación del emplazamiento. Extracción de fase libre.
- Aumento de puntos de extracción de residuo en fase libre.
- Avanzar en el estudio de técnicas de tratamiento de los suelos y aguas subterráneas afectados.
- Proponer medidas de control y mantenimiento básicas en la red piezométrica en la zona con fase libre (programación de campañas básicas de bombeo).
- Proponer medidas de mantenimiento y seguimiento adicionales de dicha red o de ejecución de nuevas infraestructuras básicas que puedan resultar necesarias para la continuación de los trabajos de bombeo en sucesivas campañas, con el fin de contener, en la medida de lo posible y, hasta que se acometan medidas de mayor contundencia, la presencia de fase libre de HCH en el emplazamiento y su posible afección a los receptores cercanos.
- Ampliación de conocimiento y en la medida de lo posible cuantificación de potenciales movimientos de fluidos y masas de contaminantes en el emplazamiento, con particular atención a la aportación de contaminantes al receptor sensible principal, es decir, el embalse de Sabiñánigo.

En los siguientes apartados se presenta un compendio de las distintas actividades realizadas durante el año 2021, tanto en el ámbito de la caracterización y mejora del modelo conceptual, como en el de mejoras y adecuación de instalaciones.







#### 4. SEGUIMIENTO HIDROGEOLÓGICO Y CONTROL DE LA PLUMA DE FASE LIBRE

El objetivo de los trabajos de seguimiento hidrogeológico tiene dos propósitos principales: por un lado, poder establecer una situación ambiental actualizada en el emplazamiento; y por otro, controlar la evolución del penacho de residuo libre organoclorado, así como de las concentraciones de compuestos organoclorados asociados en las aguas subterráneas.

A continuación, se describen detalladamente los trabajos realizados y resultados obtenidos dentro del presente apartado.

Dentro de las colaboraciones con diferentes grupos de investigación e instituciones, se realiza la toma de datos, en algunos casos, del mismo tipo que los ejecutados dentro del Seguimiento, (muestreos, niveles, bombeos etc.). La valoración y descripción de dichos trabajos se incorpora, en su totalidad en sus correspondientes apartados, incluyendo aquí aquellos que, además, aporten información al Seguimiento Hidrogeológico habitual.

# 4.1. TOPOGRAFÍA Y DISTRIBUCIÓN ZONAL DE PUNTOS DE CONTROL EN EL EMPLAZAMIENTO

A fecha de la realización del presente informe, se encuentran operativos 171 puntos de control en el emplazamiento.

Para mejorar la comprensión de los resultados obtenidos en las diferentes actividades realizadas (muestreos, niveles etc.), se ha actualizado la distribución de los mismos en 9 zonas como se muestra a continuación:

- **Zona 1. Perimetrales parte alta:** Incluye aquellos puntos que monitorizan las entradas y/o salidas al vaso de vertido en la parte superior del vertedero.
- **Zona 2. Vaso de vertido:** Incluye aquellos puntos situados dentro del recinto vallado del vertedero no incluidos dentro de la zona 1.
- Zona 3. Carretera N-330: Incluye aquellos puntos ubicados a ambos márgenes de la carretera N-330.
- **Zona 4. Rellenos parcela al pie:** Incluye aquellos puntos que monitorizan el nivel de rellenos en la parcela al pie del vertedero.
- **Zona 5. Limos parcela al pie:** Incluye aquellos puntos que monitorizan el nivel de limos en la parcela al pie del vertedero.
- **Zona 6. Aluviales parcela al pie:** Incluye aquellos puntos que monitorizan el nivel de gravas en la parcela al pie del vertedero.
- **Zona 7. Margas parcela al pie:** Incluye aquellos puntos que monitorizan el nivel de margas en la parcela al pie del vertedero.
- Zona 8. Mixtos parcela al pie: Incluye aquellos puntos que monitorizan más de una litología (por ejemplo gravas-margas) en la parcela al pie del vertedero.
- **Zona 9. Parcela Norte al pie:** Incluye aquellos puntos situados en la parcela situada al Norte del pie del vertedero.







PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

A continuación, en la Tabla 1, se muestran los puntos de control situados en cada una de las zonas definidas anteriormente:

Tabla 1. Distribución de puntos de control Sardas. Año 2021.

Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7	Zona 8	Zona 9
			Rellenos	Limos	Aluviales	Mixtos	Margas	
Perimetrales	Vaso de	Carretera N-	parcela al	Parcela				
parte alta	vertido	330	pie	pie	pie	pie	pie	Norte al pie
S2	PS4	PS22	PS5F	PS5E	Embalse	PS3	PS1	SPN1
S2B	S30	PS23	PS29C	PS7C	PS3B	PS5	PS2	SPN3
S32B	S31	PS23B		PS7E	PS5B	PS6	PS7B	SPN4
S32C	S32	S37B		PS7F	PS5C	PS7	PS13B	SPN5
S32D	S34	S40		PS9	PS5D	PS7D	PS16B	SPN6
S33	S36	S40B		PS19C	PS5G	PS8	PS17B	SPN6B
S33B	S36B	S42		PS20B	PS5H	PS13	PS21	ST2
S35	S37	S44		PS20C	PS5I	PS14	PS25	
S35B	S38	S44B		SEL1	PS8B	PS15	PS25C	
S35C	S38B	S44C		SEL2	PS14B	PS16	PS25D	
S35D	S38C	S44D		SEL3	PS14C	PS17	PS26B	
S35E	S39	S44E		SEL4	PS14D	PS19	PS26C	
S35G	S39B	S44F			PS14E	PS20	PS27	
S41	S39C	S44G			PS14F	PS24	PS28	
S41B	S39D	S44H			PS14G	PS28B	PS29	
S41C	S39E	S44I			PS14H	PS29D	PS29B	
S41D	S39F	SS44J			PS14I	PS29E		
S41E	S39G	S44K			PS14J	PS29F		
S41F	S39H	S44L			PS14K	PS29G		
	S39I	SO3			PS14L			
	S39J				PS14M			
	S39K				PS16C			
	S39L				PS16D			
	S39M				PS16E			
	S42B				PS16F			
	S43				PS16G			
	S43B				PS16H			
	SO1				PS16I			
	SO2				PS16J			
					PS16K			
					PS16L			
					PS16M			
					PS18			
					PS19B			
					PS19D			
					PS19E			
					PS21B			
					PS21C			
					PS21D			
					PS25B			
					PS26			
					ST1			
					ST1B			







PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7	Zona 8	Zona 9
Perimetrales parte alta	Vaso de vertido	Carretera N- 330	Rellenos parcela al pie	Limos parcela al pie	Aluviales parcela al pie	Mixtos parcela al pie	Margas parcela al pie	Parcela Norte al pie
					ST1C			
					ST1D			
					ST1E			
					ST1F			

Dentro de cada zona existen diferentes subgrupos que se indicarán a la hora de realizar las valoraciones de resultados correspondientes. En el plano 4.3. se muestra la distribución zonal.

Tabla 2. Coordenadas sondeos ejecutados en 2021

Punto de —	Sistema E	. Coordenadas sondeos ej TRS89	Sistema ED50		
muestreo	Coordenada X (m)	Coordenada y (m)	Cota Z suelo (m.s.n.m.)	Cota Z referencia mediadas (m.s.n.m.)	
PS29D	718223,215	4710371,698	775,904	775,904	
PS29E	718222,129	4710361,392	775,916	775,916	
PS29F	718220,951	4710352,519	775,959	775,959	
PS29G	718218,625	4710342,331	776,036	776,036	
S35G	718403,456	4710377,711	810,344	811,089	
S39J	718355,498	4710365,318	815,304	816,004	
S39K	718351,422	4710358,783	815,215	815,925	
S39L	718343,523	4710351,900	815,125	815,755	
S39M	718336,835	4710345,162	815,050	815,790	
S41E	718288,401	4710231,105	808,072	808,072	
S41F	<b>S41F</b> 718313,071 4710260,07		809,976	810,996	
<b>S44</b> 718237,013 4710293		4710293,932	789,328	789,408	
S44B	718239,004 4710303,		788,651	788,721	
S44C	718240,758	4710313,055	788,125	788,195	
S44D	<b>S44D</b> 718241,767 4710323,46		787,548	787,628	
S44E	<b>S44E</b> 718242,717 4710332,709		787,033	787,113	
S44F	718243,919	4710343,048	786,677	786,767	
S44G	718244,793	4710352,855	786,368	786,448	
S44H	718244,735	4710362,786	785,705	785,805	
S44I	718244,339	4710372,556	785,281	785,411	
S44D	718241,767	4710323,466	787,548	787,628	
S44K	<b>S44K</b> 718237,966 4710298,974		788,965	789,025	
S44L	718244,038	4710344,081	786,680	786,760	
SEL1	718193,499	4710349,941	774,404	774,764	
SEL2	718193,118	4710350,429	774,424	775,124	
SEL3	718194,007	4710350,250	774,412	775,132	
SEL4	718193,473	4710349,478	774,429	775,049	







#### 4.2. PRECIPITACIONES

El registro de las precipitaciones en el emplazamiento de Sardas se realiza mediante la estación meteorológica automática situada en la parte alta del vertedero, la cual registra estos datos en continuo desde el año 2016.

El registro de precipitaciones es un dato fundamental en el seguimiento hidrogeológico de Sardas y se emplea con diversos objetivos:

- Interpretación de la evolución de los niveles tanto de lixiviados en el vaso de vertido como en las aguas subterráneas.
- Interpretación de ciertas variaciones en la calidad de las aguas subterráneas
- Modelización matemática y balances

En los 6 años de registro completo de precipitaciones en la estación meteorológica del vertedero de Sardas, la precipitación media anual es de 739 mm. El año 2021 ha presentado unas precipitaciones sensiblemente inferiores a esta media, habiéndose registrado un total de 619,70 mm. Por otra parte, la precipitación media acumulada es inferior a la media de precipitaciones del periodo 1981-2010 en Sabiñánigo de 816 mm, de acuerdo con los datos extraídos del Instituto Aragonés de Estadística (<a href="https://www.aragon.es/-/clima-/-datos-climatologicos#anchor3">https://www.aragon.es/-/clima-/-datos-climatologicos#anchor3</a>)

En la Tabla 3., que se presenta a continuación, se recogen los datos mensuales acumulados de precipitación en el año 2021. Dichos datos han sido recopilados a través de la aplicación Web <a href="http://webtrans.geonica.com/">http://webtrans.geonica.com/</a> de la estación meteorológica situada sobre el vaso de vertido del vertedero de Sardas.

Tabla 3. Datos de precipitación mensual.

Mes	Precipitación acumulada
Enero	79,70
Febrero	54,30
Marzo	4,60
Abril	92,20
Mayo	31,10
Junio	59,40
Julio	30,50
Agosto	9,60
Septiembre	63,40
Octubre	72,00
Noviembre	49,10
Diciembre	73,80
Total	619,70

Tal y como se aprecia en la Figura 2. Precipitación mensual acumulada del año 2021, las precipitaciones se han mostrado superiores a los 30 mm mensuales salvo los meses de marzo y septiembre con registros inferiores a los 10 mm en todo el mes.

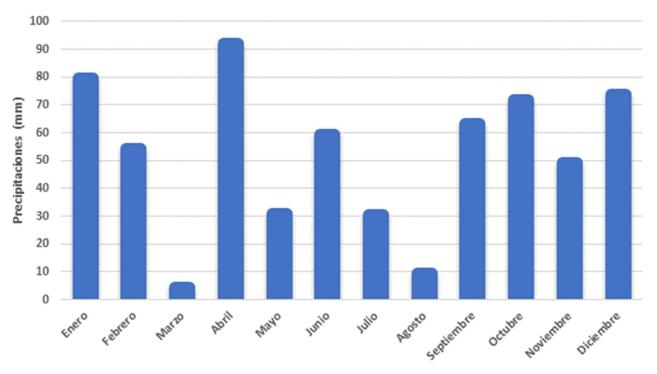






PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

Figura 2. Precipitación mensual acumulada del año 2021



En la Figura 3 se muestra la precipitación diaria en columnas agrupadas, y la precipitación acumulada a lo largo del año 2021 mostrada como línea acumulada. La precipitación diaria se obtiene de la suma de los valores diarios registrados cada 10 minutos en la estación de Sardas.

Figura 3. Evolución de la precipitación del año 2021

700

35

(au) que propositiva de la precipitación del año 2021

20 que propositiva de la precipitación del año 2021

20 que propositiva de la precipitación del año 2021

30 que propositiva de la pro

Precipitación diaria — Precipitación acumulada En la Figura 4. se recoge la precipitación acumulada durante todo el año, desde el año 2016 hasta el 2021. Se







PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

aprecia que el año 2021 ha sido el segundo año menos lluvioso desde el inicio del registro de la estación meteorológica, sólo superado por el año 2017.

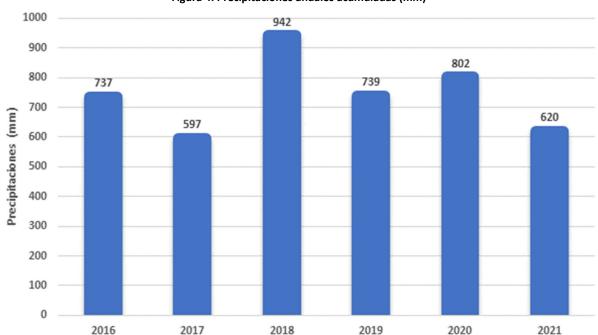


Figura 4. Precipitaciones anuales acumuladas (mm)

#### 4.3. SEGUIMIENTO PIEZOMÉTRICO Y CONTROL DE ESPESORES

La toma de datos, tanto de manera manual, como mediante sensores de registro en continuo, permite actualizar y mantener el control, tanto de la situación piezométrica en el emplazamiento, como de la variación o aparición de espesores de residuo libre en los puntos de monitorización, de cara a la toma de decisiones sobre la ejecución de nuevas actuaciones en el caso de ser necesario.

A continuación, se describen detalladamente y valoran, los resultados obtenidos de los trabajos realizados.

#### 4.3.1 Seguimiento piezométrico

Se han efectuado mediciones manuales de nivel piezométrico quincenales, en aquellos puntos de mayor interés hidrogeológico o, que no se encuentran equipados con dispositivo de lectura de nivel en continuo tipo "Diver" y, al menos mensual en la práctica totalidad de los puntos de monitorización disponibles.

Los nuevos puntos de control construidos durante el año 2021 se han ido incluyendo en las campañas de medidas correspondientes.

Adicionalmente, se ha intensificado la frecuencia de toma de datos en varios puntos en función de las necesidades de control del emplazamiento y de toma de datos para la compensación de los sensores de presión "Divers" instalados.

En la Tabla 4, se muestra un resumen de las campañas ejecutadas durante el año 2021.







PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

Tabla 4. Campañas manuales de niveles piezométricos. Año 2021.

Fecha inicio	Fecha fin	Número puntos	Observaciones
07/01/2021	07/01/2021	144	No posible toma de datos en 7 puntos por obstrucción en tubería o hielo
22/01/2021	22/01/2021	76	No posible toma de datos en 1 punto por obstrucción en tubería
02/02/2021	02/02/2021	128	Ninguna
16/02/2021	16/02/2021	78	No posible toma de datos en 1 punto por obstrucción en tubería
01/03/2021	01/03/2021	128	No posible toma de datos en 1 punto por obstrucción en tubería
15/03/2021	15/03/2021	83	No posible toma de datos en 1 punto por obstrucción en tubería
13/03/2021	13/03/2021	05	Necesario cambio de dispositivo de medida durante la campaña por fallo técnico
05/04/2021	05/04/2021	128	Ninguna
16/04/2021	16/04/2021	75	No posible toma de datos en S39C por obstrucción en tubería
04/05/2021	04/05/2021	128	Ninguna
17/05/2021	17/05/2021	68	No posible toma de datos en S39C por obstrucción en tubería
01/06/2021	01/06/2021	131	No posible toma de datos en S39C por obstrucción en tubería
	15/06/2021		No posible toma de datos en S39C por obstrucción en tubería
15/06/2021		15/06/2021	69
02/07/2021	02/07/2021	133	No posible toma de datos en S39C por obstrucción en tubería
16/07/2021	16/07/2021	68	No posible toma de datos en S39C por obstrucción en tubería
03/08/2021	03/08/2021	131	No posible toma de datos en S39C por obstrucción en tubería
18/08/2021	18/08/2021	65	Ninguna
03/09/2021	03/09/2021	134	Ninguna
23/09/2021	23/09/2021	74	Ninguna
08/10/2021	08/10/2021	133	Ninguna
22/10/2021	22/10/2021	70	Ninguna
04/11/2021	04/11/2021	149	Ninguna
17/11/2021	17/11/2021	94	Ninguna
03/12/2021	03/12/2021	137	Ninguna
23/12/2021	23/12/2021	97	Ninguna

Adicionalmente, mediante el empleo de sondas de presión electrónicas (*Divers*) se han registrado los niveles hasta en 24 pozos distintos durante el año 2021, de forma prácticamente continua en 23 de ellos.

Figura 5. Sonda de presión electrónica sobre la base de descarga de datos USB.









PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

Para la obtención de los datos de cota de agua mostrados se ha realizado un ajuste en tres fases a partir de los datos extraídos del programa *Diver-Office* que se resume a continuación:

- Un primer ajuste de datos en función de las extracciones prolongadas del sensor etc. donde, se procede a la eliminación de los datos en dichos tramos
- Un segundo ajuste en función de los pequeños desfases generados al realizar la toma de datos puntuales en los pozos que impliquen la introducción de dispositivos que puedan generar cualquier distorsión
- Un tercer y último ajuste, compensando las medidas manuales tomadas en el mismo instante que el dato facilitado del programa, por tramos separados dentro de la misma campaña si fuese necesario

Posteriormente, estos ajustes sirven para anotar incidencias en los datos de temperatura y conductividad obtenidos, los cuales serán mostrados en el apartado 4.4.2. *Seguimiento en continuo de parámetros,* y en el Anexo 7. Seguimiento piezométrico, datos extraídos de sensores de presión.

En la Tabla 5, se muestra un resumen de las diferentes campañas de toma de datos en continuo mediante sensores de presión realizadas durante el año 2021, indicando las observaciones más destacadas detectadas en cada una de las campañas tras el ajuste de los datos.

Tabla 5. Resumen Divers 2021

Fecha / hora inicio	Fecha / hora fin	Frecuencia	Observaciones
datos	datos	toma datos	OBSET VACIONES
17/12/2020 20:00	20/01/2021 3:00	2 minutos	PS28B: Posible error en dato de ajuste.
21/01/2021 16:00	23/02/2021 12:00	2 minutos	ST1C: Se elimina un tramo por falta de nivel de compensación
24/02/2021 16:00	29/03/2021 10:00	2 minutos	PS19B: Posible error en dato de ajuste en 1 tramo
24/02/2021 16:00	29/03/2021 10:00	2 minutos	PS19B: Eliminados datos hasta 12-3-2021 por incorrecto posicionamiento del sensor y posible error en dato de ajuste en 1 tramo.  PS26 sin datos.
			PS26B: Posible error en dato de ajuste en 1 tramo.
30/03/2021 15:00	29/04/2021 7:00	2 minutos	ST2 sin datos
29/04/2021 16:00	26/05/2021 6:00	2 minutos	Ninguna
30/06/2021 15:00	29/07/2021 7:00	2 minutos	Ninguna
30/07/2021 12:00	31/08/2021 6:00	2 minutos	PS19C: Eliminados datos por encontrarse el sensor por encima de columna de agua ST1C: Se elimina datos en 1 tramo por falta de nivel de compensación
01/09/2021 13:00	29/09/2021 8:00	2 minutos	PS19C: Eliminados parte de los datos por encontrarse el sensor por encima de columna de agua PS16B: Eliminación datos 1 tramo por falta de nivel compensación PS25: Eliminación datos 1 tramo por falta de nivel compensación S35B: Eliminación datos 1 tramo por falta de nivel compensación
_			S38: Se elimina datos en 1 tramo por falta de nivel de compensación ST1C: Eliminación datos 1 tramo por falta de nivel compensación
30/09/2021 15:00	02/11/2021 7:00	2 minutos	Ninguna
03/11/2021 15:00	30/11/2021 8:00	2 minutos	Ninguna
01/12/2021 13:00	27/12/2021 9:00	2 minutos	PS26: Eliminados parte de los datos por falta de nivel de compensación. Posible error en dato de ajuste en 1 tramo

A continuación en la Tabla 6, se enumeran los puntos de control equipados en alguna de las campañas del período comprendido en el presente informe.







PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

Tabla 6. Puntos equipados con sensores de control 2021		
Punto de control	Tramo de registro	
BARODIVER	Sensor de compensación barométrica	
BARODIVER 2	Sensor de compensación barométrica	
EMBALSE	Aluviales parcela al pie	
PS16B	Margas parcela al pie	
PS16C	Aluviales parcela al pie	
PS19B	Aluviales parcela al pie	
PS19D	Aluviales parcela al pie	
PS19C	Limos parcela al pie	
PS25	Margas parcela al pie	
PS25B	Aluviales parcela al pie	
PS26	Aluviales parcela al pie	
PS26B	Margas parcela al pie	
PS26C	Margas parcela al pie	
PS28B	Mixtos parcela al pie	
PS29B	Margas parcela al pie	
ST1B	Aluviales parcela al pie	
ST1C	Aluviales parcela al pie	
ST2	Parcela Norte al pie	
SPN1	Parcela Norte al pie	
S35	Perimetrales parte alta	
S35B	Perimetrales parte alta	
\$36	Vaso de vertido	
S38	Vaso de vertido	
S38C	Vaso de vertido	
S41	Perimetrales parte alta	
S41D	Perimetrales parte alta	

Las incidencias más destacadas ocurridas en la descarga de datos (pérdida de datos, fallos del sensor etc.), se comunicaron debidamente a la D.F. En todo caso, los ficheros completos de datos, donde se muestran las diferentes campañas de instalación, descripción de las incidencias etc., se encuentran a disposición del Gobierno de Aragón incluso con los datos anómalos extraídos en su caso.

En el anexo 7 "Seguimiento piezométrico, datos extraídos de sensores de presión", se muestran por zona los resultados obtenidos en el periodo de estudio.

Se procederá a una primera valoración anual, obviamente con mayor peso de esta última en aquellas zonas con dispositivos de presión instalados para, posteriormente analizar la evolución de los datos obtenidos en el periodo 2015-2021 en aquellas zonas de mayor interés. Los gráficos mostrados en el periodo anual de los datos en continuo se presentan con frecuencia de datos de 30 min y, los correspondientes a la serie histórica con frecuencia mayor, 2 horas de manera general.

#### Año 2021

#### Zona 1. Perimetrales parte alta

Los piezómetros que monitorizan las entradas al vertedero, tanto en la zona de cabecera como al este y al sur de la parte alta del vertedero, se encuentran equipados en su mayoría en la franja superior del paquete







rocoso o en el glacis suprayacente, en general, muestran cotas de agua superiores a los 800 m.s.n.m. Se diferencian dentro de esta zona los siguientes grupos:

- Puntos en cabecera: Los puntos S2's, S33's, y S35's. Los piezómetros S35 y S35B (monitorizan nivel FAD), presentan un descenso en los niveles desde finales del mes de mayo de 2021 hasta aproximadamente las últimas fechas del mes de octubre de 2021 donde se observa un cambio de tendencia hasta el final del periodo de estudio. En el resto de los puntos, los datos manuales no han sufrido variaciones importantes con respecto a años anteriores. El punto de nueva construcción S35G, que sustituye a los puntos S35F (1) y (2), monitoriza el nivel en el drenaje construido durante el año 2020 para el desvío de las aguas del barranco principal previo al vertedero
- Puntos al este del vertedero: Los puntos S32B, C y D: Equipados en roca los dos primeros y en glacis el S32D, presentan valores en consonancia con las precipitaciones, salvo el punto S32C, en marga profunda, que se encuentra en una lenta recuperación desde bombeos realizados en año precedentes.
- Puntos en zona sur entradas: Grupos S41's. Los piezómetros S41 (FAD) y S41D (glacis), presentan una tendencia similar a los puntos S35 y S35B, aunque S41 responde a las precipitaciones de manera atenuada. Dentro de esta zona para profundizar en el conocimiento de la misma, se han creado los puntos S41E y F.

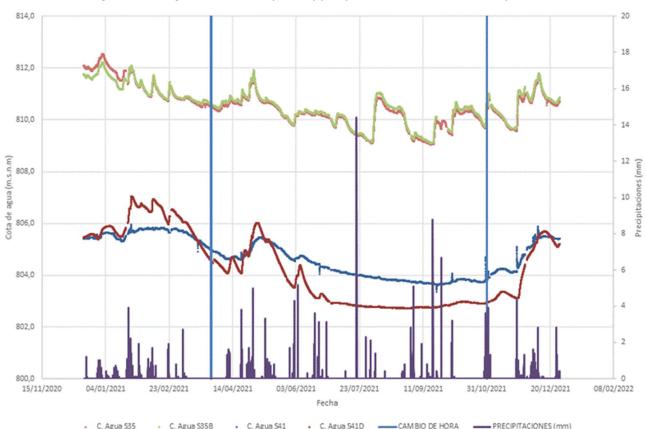


Figura 6. Cotas agua en sensores de presión y precipitaciones Zona 1. Perimetrales parta alta

#### Zona 2. Vaso de vertido

Los piezómetros situados dentro del recinto vallado del vertedero se dividen en 2 grandes grupos:







- Puntos que monitorizan el nivel de rellenos: Esto es, S34, S36, S36B, S37, S38C, grupo S39´s, S42B, S43, S43B, SO1 y SO2 (inclinados). Los puntos que registran el nivel en continuo dentro de esta zona S36 y S38C, ambos situados en el frente del vertedero, ven influenciados sus datos diarios por todos los bombeos realizados en el punto cercano S37, con objeto de mantener controlado el nivel en el vaso. En ellos, coincidiendo con la apertura del sistema de drenaje en cabecera en los primeros meses de abril de 2021, se inicia un periodo de descenso de niveles hasta los primeros días del mes de noviembre donde comienza a subir. Las cotas máximas registradas en estos puntos no han superado los 789 m.s.n.m. durante el año 2021. En el resto de los puntos, con los datos manuales obtenidos, se observa una situación similar, quedando la cota de agua absoluta más elevada o menos en función de la ubicación de los puntos dentro de las dos subcárcavas que forman el antiguo vertedero.
- Puntos que monitorizan el nivel de roca: Esto es, S30, S32, S38 y S38B. Estos puntos, parecen responder con cierto retardo a las subidas y bajadas del nivel del vaso de vertido. El punto S38, equipado con sensor, responde de manera acusada a los bombeos realizados en el punto PS23, situados fuera de la pantalla, lo que, como en múltiples ocasiones se ha indicado, refleja la clara conexión a través bien de la FAD o de la propia roca.
- Por último, existen algunos puntos PS4 (sin testificación conocida) y S31 que parece quedar con un nivel "colgado" que no presentan interés dentro de esta valoración.

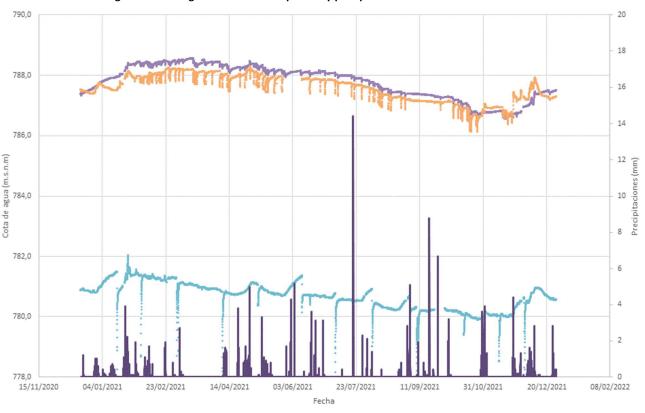


Figura 7. Cotas agua en sensores de presión y precipitaciones Zona 2. Vaso de vertido

#### Zona 3. Carretera N-330

Se incluyen los piezómetros situados en ambos márgenes de la carretera N-330, aquellos situados en el margen izquierdo (más cercanos a la parcela al pie) son de nueva ejecución, por ello, mientras se definen

C. Agua S38C

- PRECIPITACIONES (mm)

. C. Agua S38

C. Agua S36







conovienes con el etre margen que permitan una valeración conjunte de las calidas decde el vaso de va

conexiones con el otro margen que permitan una valoración conjunta de las salidas desde el vaso de vertido, la misma se realizará en dos subgrupos:

• Margen derecho (junto recinto vallado): Esto es, PS22, PS23, PS23B, S37B, S40, S40B, S42 y SO3 (inclinado). Salvo los puntos S40's que, equipados en roca se encuentran condicionados por la recarga de la misma, los cuatro puntos situados en la parte frontal junto a la carretera presentan tendencias similares con el nivel situado aproximadamente en el contacto entre los rellenos del talud (y/o vaso de vertido) y el sustrato rocoso. Quedando más bajo el punto S37B, coincidente con el desagüe original del vertedero, y el más elevado PS23B, en la esquina N.

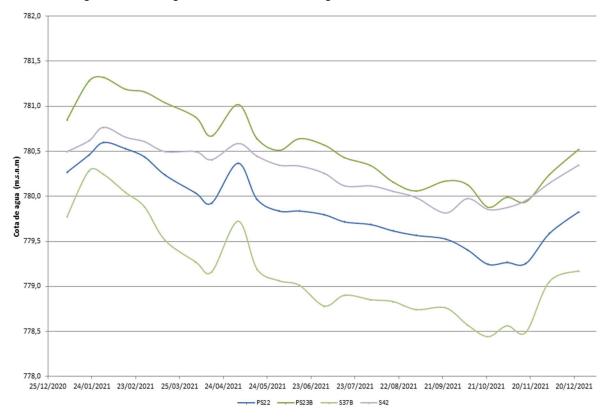


Figura 8. Cotas de agua en datos manuales en margen derecha de la carretera N-330. Año 2021

• Margen izquierdo (junto parcela al pie): Esto comprende los 12 puntos de nueva ejecución S44's realizados entre los meses de septiembre y octubre de 2021. Aún con los pocos datos disponibles, parece que, en este caso, a diferencia de los que sucede al otro margen, los niveles más bajos se sitúan coincidiendo con la esquina N del vaso de vertido (PS23B en el otro margen) y no con el desagüe original de la cárcava (S37B).

#### Zona 4. Relleno parcela al pie

Los dos puntos situados en esta zona PS29C y PS5F responde únicamente a la recarga del nivel de rellenos en la zona donde están ubicados, PS29C al pie del talud y PS5F en la zona central al pie (próxima a una zona con afección de fase libre).

#### Zona 5. Limos parcela al pie







PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

Algo similar a los rellenos ocurre en el nivel de limos de la parcela al pie, dentro de esta zona se incluyen varios pares de puntos (PS7E-F y PS20B-C) siendo los valores más altos en aquellos con el filtro más somero en el grupo PS7's y variable en el par PS20's. Existen una red de 4 puntos (SEL's) ejecutados en 2021 y destinados a la futura ejecución de ensayos de electrorremediación, cuyos niveles, por la poca cantidad de datos disponibles, no pueden aún ser valorados. Por último, los puntos restantes PS5E, PS7C y PS19C no muestran datos de interés dentro de esta valoración.

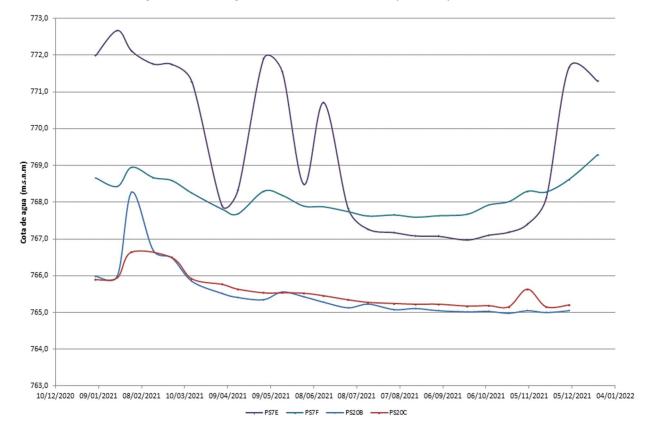


Figura 9. Cotas de agua en datos manuales en limos parcela al pie. Año 2021.

#### Zona 6. Aluviales parcela al pie

Todos los puntos de esta zona (ver listado en apartado 4.1., Tabla 1 y plano 4.3. ) se encuentran condicionados por las oscilaciones del embalse, generando subidas y bajadas de nivel en consonancia con el mismo, como se han indicado en informes anteriores, la cota de agua absoluta en esta zona se mantiene similar en estos puntos entre los 764,7 y los 765,4 m.s.n.m. de manera general. Los modelos de flujo desarrollados por AQUATERRA UDC, ver Anexo 4. Hidrogeología y modelos de balance hidrológico, modelos de flujo subterráneo y trpte. de contaminantes en los emplazamientos afectados por INQUINOSA: 3º fase, emplean estos datos reproduciendo la dinámica del acuífero, muy útil para la interpretación de los datos y el apuntalamiento del modelo conceptual del emplazamiento.







766.0 20 18 765.5 16 14 765.0 Cota de agua (m.s.n.m) 12 10 764,5 764.0 4 763,5 2 15/11/2020 04/01/2021 23/02/2021 14/04/2021 03/06/2021 23/07/2021 31/10/2021 08/02/2022 11/09/2021 Fecha C. Agua EM BALSE C. Agua PS16C · C. Agua PS19B C. Agua PS19D C. Agua PS25B

Figura 10. Cotas de agua en sensores de presión y precipitaciones en Zona 6. Aluviales al pie. 2021

#### Zona 7. Mixtos parcela al pie

C. Agua PS26

C. Agua ST1B

En este apartado se encuentran todos aquellos puntos que reciben aguas de más de una litología de las detectadas en la parcela al pie del vertedero, pudiendo diferenciar:

C. Agua ST1C

PRECIPITACIONES (mm)

- PS28B, equipado el relleno limo marga: Este punto recibe principalmente aguas del nivel de rellenos procedentes del talud de la carretera nacional, con pocas variaciones a lo largo del año, destacando que se encuentra habitualmente surgente.
- PS5, PS6, PS7, PS7D, PS29D, PS29E, PS29F y PS29G, equipados en limo ,marga, reflejan el nivel del contacto entre ambas formaciones y, sin sufrir grandes oscilaciones, destaca quizá la elevada cota de agua en el punto PS29F, enfrentado a la zona de surgencias de la cuneta al pie, mucho más elevada que los piezómetros cercanos.
- PS3, PS8, PS13, PS14, PS15, PS16, PS17, PS19, PS20 y PS24: Equipado en aluvial marga, responden de manera prácticamente idéntica a los puntos del apartado 5, y de manera general "manda" el nivel aluvial, aunque en algunos casos el hecho de tener un mayor tramo filtrante en roca (PS13, PS15 y PS24), provoca ligeras variaciones en su comportamiento.

#### Zona 8. Margas al pie

Los puntos de esta zona (ver listado en apartado 4.1., Tabla 1 y plano 4.3.) presentan dos grupos destacados







- Aquellos instalados en roca conectados al nivel del embalse, en este caso se repiten las oscilaciones observadas en el apartado 6, quedando los puntos equipados estrictamente en gravas por encima de sus pares en margas en cota absoluta, de manera general)
- Aquellos no conectados con el embalse que reflejan las subidas y bajadas de nivel en función de las precipitaciones y la zona donde estén ubicados.

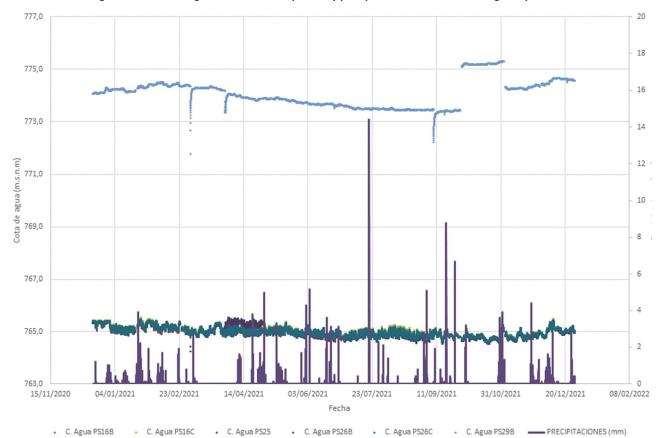


Figura 11. Cotas de agua en sensores de presión y precipitaciones en Zona 8. Margas al pie. 2021

#### Zona 9. Parcela Norte al pie

Todos los puntos de esta zona se encuentran equipados en el aluvial (salvo SPN6B, equipado en roca), con un comportamiento gemelo a los puntos conectados con el nivel del embalse comentado en apartados anteriores.

#### Serie histórica 2015-2021

#### Zona 2. Vaso de vertido

A continuación en la Tabla 12, se muestra la representación gráfica de los datos obtenidos en los sensores de presión en los puntos S36 y S38C, que monitorizan el nivel de rellenos en el vaso, entre los años 2015 y 2021 con frecuencia 2 horas.







790.0 789.0 788,0 787.0 Cota de agua (m.s.n.m) Precipitaciones (mm) 785.0 783,0 20 782,0 29/06/2016 18/08/2016 07/10/2016 06/03/2017 25/04/2017 14/06/2017 03/08/2017 26/11/2016 15/01/2017 10/04/2018 30/05/2018 07/09/2018 26/03/2019 22/09/2017 19/07/2018 16/12/2018 04/02/2019 15/05/2019 04/07/2019 17/08/2020 02 02 / 60/9 29/04/2020 18/06/2020

Figura 12. Cotas de agua en sensores de presión y precipitaciones en Zona 2. Vaso de vertido. 2021

El nivel del vaso de vertido viene regulado tanto por las precipitaciones debido a las aguas que entran al vertedero desde cabecera como por los bombeos realizados en el vaso de vertido para evitar las salidas del mismo por "desborde" en puntos bajos.

Además ciertas obras realizadas tienen influencia destacando

- Creación de dren transversal a la esquina n del vaso de vertido que conduce las aguas que puedan desbordar por ese punto hacia la cuneta de surgencias al pie del talud. Operativo desde principios de 2018. Se estima que se producen surgencias en el vaso de vertido a cota 787 m.s.n.m.
- Dren en cabecera que desvía las aguas circulantes que llegarían al vertedero desde el barranco principal en la zona de los S35´s hacia la cárcava aneja fuera del vertedero. Operativo desde abril de 2021.

A continuación, en la Figura 13, se muestra un gráfico comparando las precipitaciones registradas con los bombeos en el punto S37 anuales.







1000 5.000 942 900 4.500 802 800 4.000 739 737 Precipitaciones (mm) 700 3.500 620 597 600 3.000 500 2.500 400 2.000 300 1.500 200 1.000 100 500 2200,71 0 2016 2015 2017 2018 2019 2020 2021 Precipitación acumulada S37 anual (m3)

Figura 13. Registro anual de precipitaciones (mm) y bombeo de lixiviados en S37.

Relacionando todo lo citado anteriormente se pueden realizar las siguientes observaciones.

- De manera habitual los niveles en el vaso vienen regulados por las precipitaciones ocurridas, siendo en época de aguas altas los niveles más elevados. Fácilmente, se puede comparar, que, entre el año 2017 (Iluvias inferiores a 600 mm) y 2018 (942) y, con bombeos anuales similares, los niveles en 2018 son mucho más elevados. Dándose los máximos en los primeros meses del año y los valores mínimos alrededor de septiembre – octubre de manera general.
- La influencia del drenaje transversal realizado en la esquina N, se ha visto reflejada en que el nivel en S38C (más cercano a la esquina), no se posiciona desde el inicio de la operatividad de dicho dren por encima de S36 (zona central del frente del vertedero), lo que demuestra su eficacia, situación que se daba de manera habitual entre los años 2015 a 2017.
- Aun no siendo posible establecer, por el poco tiempo de observación, la eficiencia del drenaje realizado en cabecera, si se intuye que, con respecto a otros años, se inicia el descenso de niveles en las fechas próximas a la apertura del sistema (abril 2021), siendo en otros años, el cambio de tendencia de manera habitual en meses posteriores (mayo-junio).

#### 4.3.2 Control de espesores de residuo libre

Durante el año 2021 se han realizado, dentro del Seguimiento, hasta 7 campañas de medición de fondo de piezómetro dentro del Seguimiento, 2 de ellas en la práctica totalidad de los puntos del emplazamiento, con el objeto de determinar la cantidad de finos acumulados en el fondo de los piezómetros y a su vez, que puntos presentaban residuo libre acumulado y su espesor, para definir, junto con el histórico de datos, los puntos a bombear durante las campaña de desarrollo de piezómetros semestrales habituales del emplazamiento, realizadas en el primer y el tercer trimestre de 2021.







PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

Las campañas restantes, han tenido el objetivo monitorizar la presencia o ausencia y en su caso espesor de los puntos bombeados durante los desarrollos arriba citados, o bien conocer la evolución de espesores con mayor frecuencia a la habitual en zonas de interés así como valorar la presencia de residuo en piezómetros de nueva construcción.

Asimismo, dentro de otras actividades se ha procedido a la monitorización exhaustiva de varios puntos principalmente en la zona central en la parcela al pie del vertedero, durante la ejecución de diferentes ensayos con adición de surfactantes. Aquellos resultados que sean de interés, serán incluidos dentro de la valoración del presente apartado.

A continuación, se muestra una tabla resumen con las campañas realizadas en año 2021.

Tabla 7. Campañas manuales de fondos de piezómetro realizadas. Año 2021.

Fecha inicio	Fecha fin	Número de puntos	Incidencias y observaciones
18/01/2021	18/01/2021	16	Ninguna
04/02/2021	05/02/2021	129	Ninguna
30/03/2021	30/03/2021	46	Ninguna
23/08/2021	25/08/2021	138	No posible bajar hasta fondo de piezómetro en punto SO3
06/10/2021	07/10/2021	139	No se pudo llegar hasta el fondo del piezómetro en los puntos SO1, SO2 y SO3
03/11/2021	03/11/2021	29	Ninguna
30/11/2021	30/11/2021	29	Ninguna

Existen varios puntos en el emplazamiento que, por presencia de dispositivo de bombeo no es posible la medida del fondo del mismo y otros que, debido a la acumulación de lodos, las medidas puntuales con sonda no revelan si dicho piezómetro acumula residuo, y no es hasta la ejecución de la extracción de "finos" del fondo del piezómetro, durante las campañas de desarrollos citadas más arriba, cuando se aprecia con nitidez si el punto contiene residuo o no.

Por ello a la hora de valorar los resultados en este apartado, se integrarán, además de las medidas, todos aquellos datos, sean o no propios del Seguimiento habitual que revelen la presencia o no de DNAPL en los piezómetros, incluida la testificación del sondeo en el caso de puntos de nueva ejecución.

En el Anexo 6, *Seguimiento piezométrico, datos manuales* se muestran los resultados completos utilizados para la valoración efectuada en este apartado y en la Figura 14 se presenta la distribución de fase libre en el emplazamiento.







PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

PSID PSIZE

Figura 14. Representación de la presencia de DNAPL en el emplazamiento.

A continuación se realiza la valoración por zonas de los resultados obtenidos durante el año 2021.

#### Zona 1. Perimetrales parte alta

Durante el año 2021, no se ha detectado columna de fase libre densa ni indicios de la misma en las campañas realizadas.

#### Zona 2. Vaso de vertido

La presencia de residuo libre en esta zona queda restringida, durante el año 2021, a lo puntos situados en la parte alta del vertedero, en a subcárcava norte, zona S39´s, así como en el sondeo inclinado SO2. En todos los puntos purgados esta zona (hasta 12) se ha extraído residuo libre en alguna de las campañas, y, en aquellos en los que ha sido posible la medición de espesor, se ha observado un máximo de 8,70 m en el punto S39J, previamente a su equipado con sistema fijo de bombeo neumático.

#### Zona 3. Carretera N-330

Al igual que en la valoración realizada dentro del control de niveles de agua, se subdivide esta zona en dos grupos

- Margen derecho (junto recinto vallado): El punto PS23, equipado con dispositivo neumático fijo de bombeo presenta de manera habitual volúmenes apreciables de recuperación de residuo libre, lo que, junto con los espesores detectados en los puntos cercanos (S40 y SO3, sondeo inclinado), viene a confirmar que la esquina N del vaso de vertido es una zona de acumulación de residuo.
- Margen izquierdo (junto parcela al pie): En estos puntos de nueva construcción, se observa con nitidez presencia de residuo libre en 4 puntos enfrentados a la esquina N del vaso de vertido citada







más arriba, el espesor máximo acumulado en esta zona corresponde al punto S44L, con 2,50 m de espesor.

#### Zona 4. Relleno parcela al pie

En los dos puntos incluidos de esta zona ha sido observada fase libre durante las campañas de desarrollos semestrales realizadas en el emplazamiento, midiéndose además 11 cm de residuo libre acumulado en el punto PS29C.

#### Zona 5. Limos parcela al pie

Durante el año 2021, se ha detectado, de manera habitual, residuo libre en el punto PS5E, situado en la zona central de la parcela al pie, llegando a alcanzar un espesor máximo de 1,32 m. Adicionalmente se ha detectado presencia de residuo en 2 de los puntos de nueva construcción creados para la ejecución de ensayos de electrorremediación (SEL's), situados junto a la zona de los PS14's.

#### Zona 6. Aluviales parcela al pie

La presencia de fase libre en los puntos equipado en el nivel de gravas está claramente circunscrita a la mitad superior de la zona central de la parcela al pie, zona PS14's y PS5's, no detectándose, salvo contadas excepciones fase libre fuera de esta.

Además, esta zona ha sido monitorizada de manera exhaustiva durante la realización ensayos con adición de surfactantes que, desde su ejecución, parecen haber disminuido los espesores registrados en alguno de los puntos monitorizados. Ver Anexo 1. *Aplicación de tratamiento fisicoquímico IMPROQUIMA (UCM)* 

Aun así, los datos registrados han sido de entidad con máximos superiores a los 30 cm en varias campañas de medidas en varios de los puntos monitorizados.

#### Zona 7. Mixtos parcela al pie

Al igual, que en la zona anterior, los puntos con presencia de residuo libre, equipados en más de una litología, se restringen a aquellos situados en la zona central el pie, pudiendo acumular mayores cantidades de residuo "aparente", por su mayor cantidad de roca equipada que almacena la fase libre. Dentro de esta zona, el espesor máximo, descartando valores aparentemente anómalos, ha sido de 0,80 n en el punto PS29E, manteniéndose además, volúmenes apreciables de residuo libre en los puntos PS8 y PS15 durante las campañas de purgado habituales realizadas.

#### Zona 8. Margas al pie

En esta zona se alcanzan espesores de residuo libre acumulado superiores al metro en los puntos PS25, PS25D y PS29, observándose acumulación o presencia del mismo además en los puntos PS7B, PS21 y PS29B.

#### Zona 9. Parcela Norte al pie

Durante el año 2021, no se ha detectado columna de residuo ni indicios del mismo en las campañas realizadas.







# 4.4. CONTROL DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS

El objeto de la toma de datos de tipo fisicoquímicos es la identificación de potenciales zonas de circulación preferente de fluidos en el sistema y como apoyo para la discretización de la toma de muestras de aguas subterráneas. La conductividad eléctrica es el principal parámetro que se tienen en cuenta para este cometido, por la sencillez y fiabilidad de la toma de datos in situ.

Por otra parte, estos datos contribuyen a incrementar el conocimiento sobre el comportamiento de aguas subterráneas y lixiviados en el subsuelo del emplazamiento.

Con la incorporación del estudio de técnicas de biorremediación al Servicio de Seguimiento a la medición de conductividad eléctrica y temperatura, se ha añadido la medición in situ de oxígeno disuelto y potencial redox en perfiles en una selección de pozos (ver apartado 5.3. *Técnicas de biorremediación*).

## 4.4.1 Medidas manuales de parámetros.

Durante el año 2021, las campañas de medidas de parámetros fisicoquímicos se han ejecutado con frecuencia trimestral, previamente a la realización de los muestreos habituales de aguas subterráneas.

Se han ejecutado por tanto 4 campañas de perfiles verticales, con adquisición mediante sonda, de valores de conductividad y temperatura cada metro de profundidad dentro del Seguimiento. Estas campañas se resumen en la Tabla 8.

Tabla 8. Campañas perfiles de parámetros fisicoquímicos realizadas. Año 2021.

Fecha inicio	Fecha fin	Número de puntos	Incidencias y observaciones
10/03/2021	12/03/2021	126	Ninguna
02/06/2021	04/06/2021	129	Ninguna
09/09/2021	13/09/2021	132	Ninguna
14/12/2021	16/12/2021	148	S44 se encontraba seco en el momento de la toma de datos

En el Anexo 7. *Seguimiento piezométrico, datos manuales*, se muestran gráficamente los resultados obtenidos en el período de estudio.

### Zona 1. Perimetrales parte alta

Al igual que en apartados precedentes, se puede subdividir esta zona en los siguientes grupos:

- Puntos en cabecera: Los puntos S2´s, S33´s, y S35´s. Todos ellos, salvo S35E, equipado en roca a mayor profundidad, reciben aguas bien del tramo de gracias, bien de la franja superior de la marga, siendo, de manera general, las conductividades no superiores a los 2.000 (μS/cm), menores en aguas procedentes del glacis.
- Puntos al este del vertedero: Los puntos S32B, C y D: Equipados en roca los dos primeros y en glacis el S32D, presentan valores en consonancia con las precipitaciones, salvo el punto S32C, en marga profunda, con conductividades no superiores a los 1.000 (μS/cm) en los tramos superiores, pudiendo alcanzar los 15.000 (μS/cm) en datos profundos.
- Puntos en zona sur entradas: Grupos S41's. La mayoría de ellos equipados en FAD o glacis, con valores máximos a 2.000 (μS/cm) en los últimos metros.







### Zona 2. Vaso de vertido

Los piezómetros situados dentro del recinto vallado del vertedero se dividen en 2 grandes grupos, sin incluir aquellos puntos que carecen de interés para la valoración:

- Puntos que monitorizan el nivel de rellenos: En estos puntos, las conductividades presentan gran variabilidad en función de la presencia o no de lixiviados afectados, oscilando los datos entre los 2.000 (μS/cm) en puntos con menos carga contaminante y los 30.000 (μS/cm) en aquellos de mayor carga o cercanía de lixiviados básicos.
- Puntos que monitorizan el nivel de roca: Esto es, S30, S32, S38 y S38B. Con valores muy elevados, superiores a los 10.000 (μS/cm), siendo ligeramente superiores en los puntos con aguas más cargadas (S38´s).
- Por último existen algunos puntos PS4 (sin testificación conocida) y S31 que parece quedar con in nivel "colgado" que no presentan interés dentro de esta valoración.

### Zona 3. Carretera N-330

Se incluyen los piezómetros situados en ambos márgenes de la carretera N-330, aquellos situados en el margen izquierdo (más cercanos a la parcela al pie) son de nueva ejecución, por ello, mientras se definen conexiones con el otro margen que permitan una valoración conjunta de las salidas desde el vaso de vertido, la misma se realizará en dos subgrupos:

- Margen derecho (junto recinto vallado): Se observan valores mayores en puntos con presencia de carga contaminante o incluso fase libre (S40) en relación con los puntos con menos afección.
- Margen izquierdo (junto parcela al pie): Aquellos puntos situados frente a la esquina N del vaso de vertido (con evidencias de presencia de residuo libre), presentan conductividades superiores a los 10.000 (μS/cm) siendo menores en el resto de los puntos.

#### Zona 4. Relleno parcela al pie

Los puntos PS5F y PS29C no superan valores de conductividad, de manera general, a los  $5.000 \, (\mu S/cm)$ , estos puntos reciben aguas del nivel de recarga de los rellenos (lluvia) en contacto con la fase libre detectada en ellos.

## Zona 5. Limos parcela al pie

Salvo en los puntos con presencia de fase libre, con valores cercanos a los 10.000 ( $\mu$ S/cm) en algunos casos, las conductividades en estos puntos no superan de manera general los 1.000 ( $\mu$ S/cm).

### Zona 6. Aluviales parcela al pie

Las conductividades en los puntos equipados estrictamente en el nivel de gravas, cuando no hay presencia de afección oscilan en torno a los 1.000 ( $\mu$ S/cm). Sin embargo, como se ha indicado en epígrafes anteriores, la presencia de fase libre o disueltos con elevadas concentraciones modifican estos valores, pudiendo alcanzarse valores superiores a los 5.000 ( $\mu$ S/cm), principalmente en la mitad superior de la zona central de la parcela al pie.







## Zona 7. Mixtos parcela al pie

En estos puntos, se produce un incremento de las conductividades en el momento que se registran datos procedentes de la formación margosa, llegando a alcanzar concentraciones cercanas a los  $20.000~\mu S/cm$  en los puntos que además presentan contaminación.

## Zona 8. Margas al pie

Se observan saltos claros de los valores de conductividad en aquellos puntos de mayor longitud de tramo de roca equipada, llegando en algún caso a valores del orden de  $25.000 \, \mu S/cm$ .

### Zona 9. Parcela Norte al pie

En esta zona, de baja carga contaminante, los valores se posicionan en torno a los 1.000  $\mu$ S/cm, salvo en SPN6B, que se encuentra equipado en roca y que registra conductividades cercanas a los 25.000  $\mu$ S/cm.

Por lo general los datos de conductividad recogidos en el emplazamiento durante 2021 presentan valores similares a los del año 2020, salvo evidentemente aquellos de nueva creación.

## 4.4.2 Seguimiento en continuo de parámetros.

Todos los sensores de presión, instalados durante el año 2021, registran el dato de temperatura y de nivel de agua con la misma frecuencia.

Estos resultados se han integrado en la base de datos y sirven de apoyo para los diferentes trabajos de modelización, ensayos entre otros que se describirán en apartados posteriores.

En el anexo 10 se incluyen los datos completos de conductividad y temperatura registrados durante el año 2021 y en el Plano 4.4. *Puntos equipados con sensor de presión durante 2021*, su ubicación.

## 4.5. PERFORACIÓN DE SONDEOS

Durante el año 2021 se han ejecutado un total de 469 m de perforación en 27 sondeos. Todos ellos han quedado equipados como piezómetros.

Todos los sondeos perforados han servido tanto para la caracterización tanto litológica como química de los materiales atravesados, así como para la delimitación más precisa de la presencia de fase libre densa en el emplazamiento. Se han tomado numerosas muestras con diferentes objetivos.

Todos los nuevos puntos de control serán empleados en mayor o menor medida para la monitorización de la variación del nivel del agua en los distintos horizontes del emplazamiento, para la toma de muestras de aguas subterráneas, para el bombeo de fase libre densa o para la realización de ensayos de tratamiento.

En la Tabla 9, se resumen las características principales de los sondeos perforados y en el Plano 3.1. *Puntos de la red piezométrica y nuevos sondeos*.

se presenta su ubicación. La perforación de sondeos se ha llevado a cabo en tres campañas:







PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

#### Febrero marzo.

- Instalación de 4 nuevos puntos de control en la zona de los S39s siguiendo el antiguo eje de la cárcava en esa zona, donde se acumula la mayor parte de la fase libre existente en la parte alta del vertedero, así como disponer de mayores puntos de control para la ejecución de diferentes ensayos en dicha zona.
- Instalación de 4 nuevos puntos de control en el vial al pie del terraplén de la N-330 (S29s) para conocer con mayor detalle la salida de contaminantes sen la zona, así como definir con mayor precisión el borde este del acuífero aluvial.

## Junio-julio

- Instalación de dos piezómetros en la zona de los 41s para el control de las entradas el vaso de vertido desde la zona sur del vertedero.
- Reposición de un piezómetro de interés en zona de cabecera (35G)

## Septiembre-octubre

- Instalación de 12 piezómetros junto a la N-330 (sentido Huesca) con el objetivo de caracterizar la zona con mayor incertidumbre, esto es, la zona bajo la carretera N-330, prestando especial atención a la presencia de fase libre.
- Perforación de 4 sondeos en la zona de los 14s (en las parcelas al pie del vertedero) con el objeto
  principal de la toma de muestras de limos para la realización de ensayos de tratamiento mediante
  técnicas electrocinéticas. Estos sondeos se perforaron muy próximos entre ellos (1 m) para con el
  objeto de las muestras de limos fueran similares entre los sondeos. Quedaron equipados como
  piezómetros para eventuales ensayos te técnicas electrocinéticas y control hidrogeológico.

A continuación, se muestran las características más destacadas de las perforaciones realizadas:

Tabla 9. Características de las perforaciones realizadas en 2021.

Fecha inicio	Sondeo	Prof. (m)	tubería ciega(m)	tubería ranurada(m)	Ø piezómetro
22/02/2021	S39J	36,7	22,7	36,7	3"
04/03/2021	S39K	38,4	24,2	38,2	3"
12/03/2021	S39L	38,4	24,2	38,2	3"
19/03/2021	S39M	39,8	23,8	39,8	3"
29/03/2021	PS29D	15,2	11,0	15,0	3"
30/03/2021	PS29E	13,0	8,8	12,8	3"
30/03/2021	PS29F	10,2	7,2	10,2	3"
30/03/2021	PS29G	10,2	8,2	10,2	3"
29/06/2021	S41E	6,7	4,7	6,7	3"
30/06/2021	S41F	13,2	2,0	13,0	3"
01/07/2021	S35G	8,8	0,0-6,8	6,8-8,8	3"
21/09/2021	S44	8,3	0,0-3,0	3,0-8,0	3"
21/09/2021	S44B	13,2	0,0-4,0	4,0-13,0	3"
22/09/2021	S44C	19,3	0,0-5,0	5,0-19,0	3"
23/09/2021	S44D	20,2	0,0-6,0	6,0-20,0	3"







Fecha inicio	Sondeo	Prof. (m)	tubería ciega(m)	tubería ranurada(m)	Ø piezómetro
29/09/2021	S44E	19,3	0,0-6,0	6,0-19,0	3"
30/09/2021	S44F	13,3	0,0-4,0	4,0-13,0	3"
30/09/2021	S44G	15,0	0,0-4,0	4,0-15,0	3"
04/10/2021	S44H	15,3	0,0 - 4,0	4,0 - 15,0	3"
05/10/2021	S44I	15,3	0,0 - 4,0	4,0 - 15,0	3"
05/10/2021	S44J	15,2	0,0 - 4,0	4,0 - 15,0	3"
14/10/2021	S44K	18,4	0,0 - 6,0	6,0 - 18,0	3"
14/10/2021	S44L	19,6	0,0 - 6,6	6,6 - 19, 6	3"
06/10/2021	SEL1	11,5	0,0 - 3,0	3,0 - 10,9	3"
07/10/2021	SEL2	11,5	0,0 - 3,5	3,5- 11,5	3"
07/10/2021	SEL3	11,5	0,0 - 3,5	3,5- 11,5	3"
13/10/2021	SEL4	11,5	0,0 - 3,5	3,5- 11,5	3"

Por otro lado, en los sondeos ejecutados en la zona central al pie del vertedero, se ha muestreado en la práctica totalidad de los limos perforados en tramos aproximados de 0,5 m, para el análisis de compuestos organoclorados en laboratorio, dichos resultados revelan en general concentraciones relativamente bajas en el tramo limoso.

Por último se ha procedido a la toma de muestras en diferentes formatos (inalteradas, plastificadas según avance de perforación etc.) de limos en diferentes zonas para los ensayos de laboratorio de técnicas electrocinéticas de descontaminación.

## 4.6. PURGAS, BOMBEOS Y CONTROL DE LIXIVIADOS

Tanto en el Seguimiento habitual, como en otros trabajos destinados a ensayos y otras pruebas, se realizan actividades de bombeo de fluidos contaminantes en el emplazamiento, destinadas entre otros objetivos a:

- Extracción de fase libre. Objetivo principal de los trabajos de descontaminación del emplazamiento por su conocida toxicidad y elevadísimas concentraciones de Compuestos Organoclorados (COC)
- **Bombeos de lixiviados**. De menor carga contaminante, pero con posibilidad de sufrir salidas incontroladas, principalmente desde el vaso de vertido, hacia receptores sensibles.
- **Bombeo de aguas subterráneas**. Con diferentes finalidades como puede ser la disminución del aporte de entradas de aguas no contaminadas al vertedero, realización de ensayos etc.
- Conducción a sistemas de tratamiento de las salidas de lixiviados. En el año 2018 se ejecutó una zanja drenante al pie del talud del vertedero que conduce por gravedad las aguas surgentes del mismo directamente hasta las balsas de tratamiento, evitando así, los bombeos realizados en los años anteriores a su ejecución.

Tanto dentro del Seguimiento como en otros trabajos que será descritos en sus apartados correspondientes, se han extraído en el año 2021 mediante bombeo, un total de 1.880 m³ de fluidos de los cuales 1,53 m³ corresponden a residuo libre.

Con respecto al año anterior, se han extraído 0,3 m³ de residuo en fase libre más en comparación con el año anterior, los motivos se describen detalladamente en los apartados posteriores. En la Figura 15. Extracción







de DNAPL en el emplazamiento de Sardas 2010-2021, se presenta la evolución de los bombeos de fase libre desde el año 2010.

12,0 10.0 8,0 Volumen en litros 6,0 4,0 2,0 2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018 2019 2020 2021 ■ Residuo anual extraído
■ Acumulado

Figura 15. Extracción de DNAPL en el emplazamiento de Sardas 2010-2021

A continuación, se muestran por actividad, el desglose de estos trabajos.

## 4.6.1 Purgados

Se dispone en todo el emplazamiento de 15 puntos con posibilidad de equipado de manera simultánea con bomba neumática de carga inferior.

Una vez ejecutados los puntos S39J, S39K, S39L, S39M, que, previsiblemente presentan tasas importantes de recuperación de residuo libre, se ha procedido a la desconexión del sistema de los puntos S39C y S39D, aquellos con menores tasas de recuperación en la parte alta de los puntos equipados, desde el mes de mayo de 2021, con objeto de poder bombear de manera simultánea a máxima capacidad de la planta situada en la parte superior del emplazamiento (esto es 10 puntos). Por tanto, durante el año 2021, se han ejecutado de manera habitual de hasta 13 puntos (11 hasta el mes de mayo).

Los puntos equipados durante el año 2021 han sido:

- S39B, S39C, S39D, S39E, S39F, S39G, S39H, S39I, S39J, S39K, S39L y S39M; Equipados en rellenos en la parte alta del vertedero en la zona histórica de acumulación de residuo.
- PS23; Junto a la carretera frontal N-330 en la esquina N del vaso de vertido, zona de mayor acumulación fuera del vaso desde el inicio del Seguimiento.







• PS8 y PS15; equipados en el cuaternario aluvial y FAD, situados al pie del vertedero, en zonas donde se ha observado presencia de fase libre.

Se valorará la conexión de nuevos puntos durante el año 2022, principalmente de la zona central al pie del vertedero, una vez determinados los presentan mayor rendimiento de extracción por esta técnica, algunos de ellos ya han sido purgados desde 2018 bien de manera provisional o bien durante la ejecución de ensayos y tratamiento.

A continuación, se resumen las campañas ejecutadas en el año 2021 dentro los trabajos de Seguimiento habitual, quedando otros purgados ejecutados de manera puntual reflejados en sus apartados correspondientes.

Tabla 10. Campañas de purgado realizadas. Año 2021.

Fecha inicio	Fecha fin	Puntos bombeados	Incidencias y observaciones
15/01/2021	15/01/2021	9	Problemas en 1 punto por bajas temperaturas
02/02/2021	02/02/2021	9	Problemas en 1 punto por bajas temperaturas
04/03/2021	04/03/2021	11	Ninguna
07/04/2021	08/04/2021	11	Ninguna
			Rotura de tubería de aire durante purgado S39I
05/05/2021	25/05/2021	/05/2021 15	Varios ciclos de bombeo tras equipado con sistema en continuo de los puntos S39J, S39K, S39L y S39M, durante ellos se produce salpicadura sobre EPIS operarios.
			Problemas en 1 punto por bajas temperaturas
08/06/2021	16/06/2021	13	Necesario realizar 2 ciclos de purgado en PS23, debido a rotura de línea de aire.
06/07/2021	06/07/2021	13	Paro de generador durante purgado de 10 puntos. Se finaliza la campaña tras 95 min de purgado.
04/08/2021	04/08/2021	13	Rotura de tubería de aire durante purgado en 2 puntos, se sustituyen y se reinicia el bombeo.
07/09/2021	09/09/2021	13	Posibles datos parciales intercambiados entre puntos S39H y S39I. Se comprobará en la siguiente campaña.
14/10/2021	15/10/2021	13	Se comprueban conexiones dudosas de anteriores campañas en pozos S39H y S39II
12/11/2021	12/11/2021	13	Ninguna
01/12/2021	02/12/2021	13	Ninguna

Las incidencias acontecidas durante las campañas de purgado aparecen reflejadas en las distintas notas técnicas e informes trimestrales redactados previamente.

Una vez realizados los bombeos para la extracción de fase libre, ésta es decantada en los depósitos intermedios, posteriormente mediante una bomba neumática de trasiego de doble membrana o bien mediante apertura del depósito por gravedad, se traspasa el fluido impactado hacia el decantador evitando, en la medida de lo posible, el trasvase de residuo libre.

En la Tabla 11, se presentan los volúmenes totales de DNAPL que han podido extraerse mediante sistema de bombeo neumático conectado a las plantas disponibles de manera continua durante 2021. En la valoración de estos resultados hay que tener en cuenta que el volumen de fase libre presente en el subsuelo no es siempre removible, existiendo numerosos factores que limitan la eficacia del bombeo, por lo que los valores







PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

presentados corresponden a la fase libre densa y móvil que ha alcanzado los puntos de extracción, y no se refiere al volumen total presente en el medio local.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 11. Resultados campañas de purgado. Año 2021.

Punto de control	Volumen total (I)	Volumen residuo (I)	% Residuo / fluido extraído
	Puntos equipa	dos habitualmente	
PS8	4.230	45	1,06
PS15	4.865	105	2,16
PS23	2.465	175	7,10
S39B	2.715	15	0,55
\$39C	625	20	0,00
S39D	990	5	0,51
\$39E	2.060	15	0,73
S39F	1.845	95	5,15
\$39G	2.315	20	0,86
S39H	2.365	90	3,81
S39I	2.450	35	1,43
S39J	2.305	95	4,12
S39K	2.505	55	2,20
S39L	3.285	55	1,67
\$39M	3.260	25	0,77
Valores totales	38.280	850	
Media total puntos			2,22
Media puntos productivos			2,26

Durante el año 2021, en total se han extraído **850 litros de fase densa** de un total de **38,28 m³ de fluidos**.

Un 20 % de la fase libre extraída corresponde al punto PS23, junto a la carretera N-330, fuera del recinto del vertedero, el grupo de los puntos S39´s presenta aproximadamente el 60 %, quedando el porcentaje restante a los otros 2 puntos equipados, ya en la parcela al pie.

Las mayores tasas de recuperación en la parte alta parecen confirmar importantes acumulaciones de residuo en los 4 puntos de nueva ejecución.

En 2021 se ha extraído una cantidad similar de DNAPL en los purgados habituales, 850 l frente a los 805 l de 2020, esto parece indicar que, pese a que durante el año 2021 se han recuperado las frecuencias habituales de bombeo, se está produciendo de manera paulatina el agotamiento del rendimiento de este sistema.

Adicionalmente, durante la ejecución de diferentes ensayos en la parcela al pie del vertedero, se ha procedido al purgado de hasta 18 puntos equipados de manera provisional, en estas extracciones se han bombeado un total de 19,23 m³ de los cuales 20 l corresponden a residuo libre.

### 4.6.2 Desarrollos

Ya desde el año 2020 y debido a la ampliación de puntos de control durante estos últimos años y de acuerdo con la D.F, con el objeto de evitar tratamiento de fluidos sin afección clara en las balsas de tratamiento se ha







PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

optado por realizar los mismos en aquellos de nueva creación, así como en aquellos que muestren presencia de fase libre en la campaña de toma de datos previos, que no se encuentren equipados con dispositivo neumático de bombeo de manera fija. Realizándose la limpieza de finos del resto de piezómetros sólo en el caso de observarse un aumento considerable en los mismos, al objeto de asegurar muestreos representativos de las aguas subterráneas.

Por tanto, durante 2021 se han realizado dos campañas de desarrollo en los puntos definidos en las campañas previas de toma de datos de comprobación de presencia / ausencia y en su caso espesor de residuo libre, así como en aquellos puntos de nueva creación. Estas campañas de carácter semestral han tenido lugar entre los días 6 y 8 de marzo de 2021, y entre el 1 y 3 de septiembre de 2021 en 54 y 48 puntos respectivamente.

Adicionalmente, debido a la creación de hasta 16 nuevos puntos en los cuales se observó indicios claros de presencia de fase libre, se incluyó una campaña adicional el día 24 de noviembre de 2021 en estos 16 puntos.

Los trabajos principales han consistido en extracción de lodos de fondo del piezómetro, bien mediante extracción con camión cisterna autoaspirante con apoyo de aire comprimido, o bien mediante el uso de bombas eléctricas de 12 V, o incluso de forma manual.

Posteriormente, en función del grado de contaminación presente, se realizó la descarga de los fluidos extraídos bien directamente en las balsas de lixiviados o bien en depósitos GRG u otros depósitos, para llevar a cabo una primera etapa de decantación de la fase libre, y su posterior tratamiento y/o gestión.

Para la realización de los trabajos se ha contado con los servicios de la empresa CARLOANDRES S.L., siguiendo en todo momento los protocolos de seguridad y salud establecidos.

En la Tabla 12, Tabla 13 y Tabla 14 que figuran a continuación, se presenta un resumen de los trabajos realizados durante las campañas llevadas a cabo este año, ordenados cronológicamente.

Tabla 12. Resumen de los trabajos de desarrollo de piezómetros ejecutados. 1º trimestre 2021.

			<u> </u>		
Punto de control	Fecha(s) limpieza	Hora(s) inicio	Hora(s) fin	Punto de descarga	Observaciones e incidencias
PS20B	01/03/2021	10:32	10:37	Balsas	Ninguna
PS20C	01/03/2021	10:39	10:44	Balsas	Ninguna
PS16H	01/03/2021	10:54	11:09	Balsas	Ninguna
PS16I	01/03/2021	11:10	11:25	Balsas	Ninguna
PS16J	01/03/2021	11:27	11:42	Balsas	Ninguna
PS16K	01/03/2021	11:43	11:58	Balsas	Ninguna
PS16L	01/03/2021	12:00	12:15	Balsas	Ninguna
PS16M	01/03/2021	12:17	12:32	Balsas	Ninguna
PS19E	01/03/2021	12:58	13:13	Depósitos	Ninguna
PS7	01/03/2021	13:16	13:26	Depósitos	Ninguna
PS7B	01/03/2021	13:28	13:33	Depósitos	Ninguna
PS7C	01/03/2021	13:34	13:39	Depósitos	Ninguna
PS7D	01/03/2021	13:40	13:50	Depósitos	Ninguna
PS7E	01/03/2021	13:51	13:56	Depósitos	Ninguna
PS7F	01/03/2021	14:01	14:06	Depósitos	Ninguna
PS8B	01/03/2021	15:45	16:00	Depósitos	Ninguna
PS5	01/03/2021	16:07	16:17	Depósitos	Ninguna







Punto de control	Fecha(s) limpieza	Hora(s) inicio	Hora(s) fin	Punto de descarga	Observaciones e incidencias
PS5B	01/03/2021	16:20	16:35	Depósitos	Ninguna
PS5C	01/03/2021	16:40	16:55	Depósitos	Ninguna
PS5D	01/03/2021	16:57	17:12	Depósitos	Ninguna
PS5E	01/03/2021	17:14	17:22	Depósitos	Ninguna
PS5F	01/03/2021	17:23	17:28	Depósitos	Ninguna
PS5G	01/03/2021	17:30	17:45	Depósitos	Ninguna
PS5H	02/03/2021	10:06	10:21	Depósitos	Ninguna
PS5I	02/03/2021	10:28	10:43	Depósitos	Ninguna
PS14	02/03/2021	11:11	11:26	Depósitos	Ninguna
PS14B	02/03/2021	11:28	11:43	Depósitos	Ninguna
PS14C	02/03/2021	11:46	12:01	Depósitos	Ninguna
PS14D	02/03/2021	12:03	12:18	Depósitos	Ninguna
PS14E	02/03/2021	12:20	12:35	Depósitos	Ninguna
S-01	03/03/2021	9:04	9:19	Depósitos	Ninguna
S-02	03/03/2021	9:35	9:50	Depósitos	Ninguna
S37B	03/03/2021	10:22	10:30	Depósitos	Ninguna
PS23B	03/03/2021	10:33	10:43	Depósitos	Ninguna
S38	03/03/2021	10:47	10:55	Depósitos	Ninguna
S38-B	03/03/2021	10:59	11:07	Depósitos	Ninguna
S-03	03/03/2021	11:17	11:32	Depósitos	Ninguna
S40	03/03/2021	11:41	11:46	Depósitos	Ninguna
S40B	03/03/2021	11:51	11:54	Depósitos	Ninguna
PS25D	03/03/2021	12:20	12:32	Depósitos	Ninguna
PS21	03/03/2021	12:50	13:02	Depósitos	Ninguna
PS24	03/03/2021	13:24	13:36	Depósitos	Ninguna
PS29	03/03/2021	13:48	13:56	Depósitos	Ninguna
PS29B	03/03/2021	15:28	15:36	Depósitos	Ninguna
PS29C	03/03/2021	15:39	15:44	Depósitos	Ninguna
PS14F	03/03/2021	16:14	16:29	Depósitos	Ninguna
PS14G	03/03/2021	16:32	16:47	Depósitos	Ninguna
PS14H	03/03/2021	16:49	17:04	Depósitos	Ninguna
PS14I	03/03/2021	17:06	17:21	Depósitos	Ninguna
PS14J	03/03/2021	17:24	17:39	Depósitos	Ninguna
PS14K	03/03/2021	17:41	17:56	Depósitos	Ninguna
PS14L	03/03/2021	17:58	18:13	Depósitos	Ninguna
PS14M	03/03/2021	18:15	18:30	Depósitos	Ninguna
PS25	03/03/2021	18:50	19:02	Depósitos	Se ejecutó al finalizar la campaña, por atasco del vehículo el día anterior.

Tabla 13. Resumen de los trabajos de desarrollo de piezómetros ejecutados. 3º trimestre 2021.

Punto de control	Fecha(s) limpieza	Hora(s) inicio	Hora(s) fin	Punto de descarga	Observaciones e incidencias
PS19	06/09/2021	10:34	10:46	Depósitos	Ninguna
PS5D	06/09/2021	10:49	11:01	Depósitos	Ninguna







Punto de control	Fecha(s) limpieza	Hora(s) inicio	Hora(s) fin	Punto de descarga	Observaciones e incidencias
PS5E	06/09/2021	11:02	11:12	Depósitos	Ninguna
PS5F	06/09/2021	11:13	11:18	Depósitos	Ninguna
PS5G	06/09/2021	11:21	11:33	Depósitos	Ninguna
PS5H	06/09/2021	11:35	11:47	Depósitos	Ninguna
PS5I	06/09/2021	11:48	12:00	Depósitos	Ninguna
PS8B	06/09/2021	12:04	12:16	Depósitos	Ninguna
PS25	06/09/2021	12:32	12:47	Depósitos	Ninguna
PS25D	06/09/2021	12:58	13:13	Depósitos	Ninguna
PS5	06/09/2021	13:27	13:37	Depósitos	Ninguna
PS5B	06/09/2021	13:42	13:54	Depósitos	Ninguna
PS5C	06/09/2021	15:23	15:35	Depósitos	Ninguna
PS14	06/09/2021	15:39	15:51	Depósitos	Ninguna
PS14B	06/09/2021	15:53	16:05	Depósitos	Ninguna
PS14C	06/09/2021	16:06	16:18	Depósitos	Ninguna
PS14D	06/09/2021	16:21	16:33	Depósitos	Ninguna
PS14E	06/09/2021	16:36	16:48	Depósitos	Ninguna
PS14F	06/09/2021	16:50	17:02	Depósitos	Ninguna
PS14G	06/09/2021	17:04	17:16	Depósitos	Ninguna
PS14H	06/09/2021	17:18	17:30	Depósitos	Ninguna
PS14I	06/09/2021	17:31	17:43	Depósitos	Ninguna
PS14J	06/09/2021	17:45	17:57	Depósitos .	Ninguna
PS14K	07/09/2021	11:00	11:12	Depósitos	Ninguna
PS14L	07/09/2021	11:13	11:25	Depósitos	Ninguna
PS14M	07/09/2021	11:27	11:39	Depósitos	Ninguna
S39C	07/09/2021	12:45	13:00	Depósitos	Ninguna
S39D	07/09/2021	13:10	13:25	Depósitos	Ninguna
SO1	07/09/2021	16:13	16:28	Depósitos	Ninguna
SO2	07/09/2021	16:38	16:53	Depósitos	Ninguna
S37B	08/09/2021	9:09	9:14	Depósitos	Ninguna
PS23B	08/09/2021	9:16	9:21	Depósitos	Ninguna
S38	08/09/2021	9:24	9:34	Depósitos	Ninguna
S38B	08/09/2021	9:39	9:49	Depósitos	Ninguna
S40	08/09/2021	9:52	9:57	Depósitos	Ninguna
S40B	08/09/2021	10:00	10:03	Depósitos	Ninguna
3400	08/03/2021	10.00	10.03	Depositos	Pequeña salpicadura en el entorno del
SO3	08/09/2021	10:32	10:47	Depósitos	sondeo por salida de fluido por boca de sondeo
PS21	08/09/2021	11:49	12:04	Depósitos	Ninguna
PS24	08/09/2021	12:17	12:32	Depósitos	Ninguna
PS7B	08/09/2021	12:42	12:47	Depósitos	Ninguna
PS7C	08/09/2021	12:50	12:55	Depósitos	Ninguna
PS29	08/09/2021	13:01	13:06	Depósitos	Ninguna
PS29B	08/09/2021	15:50	15:55	Depósitos	Ninguna
PS29C	08/09/2021	13:18	13:23	Depósitos	Ninguna
PS29D	08/09/2021	15:08	15:13	Depósitos	Ninguna
PS29E	08/09/2021	15:16	15:21	 Depósitos	Ninguna
PS29F	08/09/2021	15:26	15:31	Depósitos	Ninguna
P2529F	U8/U9/2021	15:26	15:31	Depositos	ıvınguna







Punto de control	Fecha(s) limpieza	Hora(s) inicio	Hora(s) fin	Punto de descarga	Observaciones e incidencias
PS29G	08/09/2021	15:35	15:40	Depósitos	Ninguna

Tabla 14. Resumen de los trabajos de desarrollo de piezómetros ejecutados. 4º trimestre 2021

Punto de control	Fecha(s) limpieza	Hora(s) inicio	Hora(s) fin	Punto de descarga	Observaciones e incidencias
S44	24/11/2021	10:45	11:00	Depósitos	Ninguna
S44K	24/11/2021	11:04	11:24	Depósitos	Ninguna
S44B	24/11/2021	11:25	11:45	Depósitos	Ninguna
S44C	24/11/2021	11:46	12:34	Depósitos	Necesario realizar en varias fases por gran cantidad de finos acumulados.
S44D	24/11/2021	12:35	12:55	Depósitos	Ninguna
S44E	24/11/2021	12:51	13:16	Depósitos	Ninguna
S44F	24/11/2021	13:17	13:37	Depósitos	Ninguna
S44L	24/11/2021	13:37	13:57	Depósitos	Ninguna
\$44G	24/11/2021	15:25	15:40	Depósitos	Ninguna
S44H	24/11/2021	15:42	16:02	Depósitos	Ninguna
S44I	24/11/2021	16:04	16:24	Depósitos	Ninguna
SS44J	24/11/2021	16:25	16:36	Depósitos	Ninguna
SEL1	24/11/2021	16:47	16:55	Depósitos	Ninguna
SEL2	24/11/2021	16:57	17:04	Depósitos	Ninguna
SEL3	24/11/2021	17:05	17:15	Depósitos	Ninguna
SEL4	24/11/2021	17:17	17:22	Depósitos	Ninguna

Durante los trabajos de desarrollo de piezómetros realizados en año 2021, se han extraído 27,98 m³ de fluidos, de los cuales **420 litros** fueron DNAPL (frente a los 310 de 2019).

La valoración de la presencia de fase libre en los diferentes puntos de control ha sido integrada dentro del apartado 4.3.2 *Control de espesores de residuo libre*.

Los volúmenes de residuo extraídos han sufrido un ligero aumento con respecto a 2020, por la inclusión de los nuevos puntos creados en el margen izquierdo de la carretea N-330 y al pie del talud, que han revelado presencia de DNAPL.

## 4.6.3 Abatimiento de niveles el vaso de vertido

Con el objeto de que el nivel de lixiviados ascienda y evitar surgencias desde el vaso de vertido se han llevado a cabo los trabajos descritos a continuación:

Desde el día 18 de junio de 2014, se realiza la depresión del nivel de lixiviados dentro del vaso, mediante una bomba eléctrica instalada en el piezómetro S37, conectada al arranque del generador fijo ubicado en la parte alta del vertedero.

Los fluidos extraídos se envían directamente a las balsas de depuración en la parcela al pie, a través de la red de drenaje que recorre la parcela al pie del vertedero. Se anota diariamente el dato registrado en el







totalizador ubicado a la salida de la bomba y, periódicamente se toman datos de nivel de agua en el piezómetro, muestras, etc.

Desde finales de 2019, dichos fluidos pasan previamente por el nuevo decantador situado junto a la balsa vieja previo al vertido a balsas.

El ritmo de bombeo de este pozo está condicionado y limitado por la capacidad de las balsas de lixiviados y el ritmo de tratamiento de la depuradora.

En el año 2021, se han enviado desde el piezómetro S37 hacia las balsas de tratamiento de lixiviados 1.620,25 m³ de fluidos. En la Tabla 15 se muestra el resumen de los volúmenes mensuales extraídos durante el presente año.

Tabla 15. Volúmenes de lixiviados extraídos desde S37. Año 2021.

Mes	Volumen enviado (m³)
Enero	5,00
Febrero	306,85
Marzo	231,69
Abril	179,56
Mayo	274,29
Junio	71,72
Julio	72,77
Agosto	154,24
Septiembre	4,03
Octubre	213,48
Noviembre	90,47
Diciembre	16,15
Total	1.620,25

Los volúmenes extraídos desde este punto han disminuido con respecto a 2020. Este hecho puede deberse a 2 motivos.

- Menores precipitaciones registradas que no han hecho necesario intensificar los bombeos para el mantenimiento del nivel en límites de seguridad.
- La apertura desde abril de 2021 del sistema de drenaje en cabecera que, parece haber disminuido las entradas al vaso y, por tanto la necesidad de bombear lixiviados.

## 4.6.4 Drenaje cabecera

El drenaje de cabecera, cuya ubicación se muestra en la Figura 16, lleva operativo desde abril de 2021 por lo que aún no ha cumplido el primer año de funcionamiento.

El objetivo de este dren es la reducción de las entradas de agua en el vaso de vertido que se producen de forma subterránea en la zona por la que, con anterioridad a la implantación del vertedero, circulaba el arroyo que alimentaba la antigua cárcava.







PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

Figura 16. Ubicación del dren de cabecera sobre cartografía de 1956.

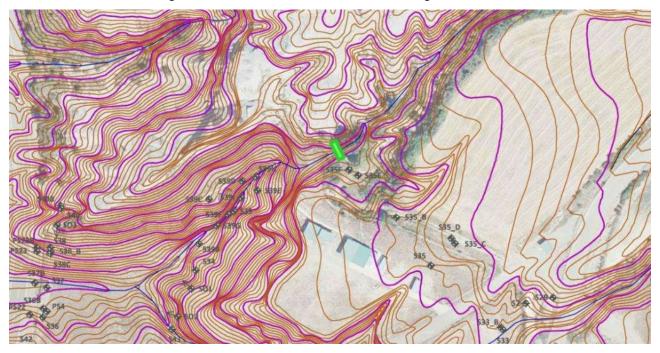


Tabla 16. Volúmenes de entradas drenados y precipitación 2021 (inicio aforo en abril)

Mes	Drenaje (m³)	Precipitación (mm)
Abril	103	75
Mayo	132	31
Junio	28	59
Julio	0	30
Agosto	0	10
Septiembre	0	63
Octubre	0	66
Noviembre	5	55
Diciembre	256	77
Acumulado	525	468

El aforo se ha realizado de forma manual en el punto de vertido del dren en la cárcava aneja con mediciones al menos semanales (en momentos secos) y cada 2-3 días en momentos de precipitaciones. Los datos en los días sin medición se han extrapolado manualmente.

En el hidrograma de la Figura 17, se puede apreciar la distribución temporal de los caudales del dren y que este ha permanecido seco unos 5 meses, desde julio a noviembre.

El volumen de entradas de aguas subterráneas y subsuperficiales al vertedero que ha sido drenado en 2021 ha sido de cerca de 500 m³, lo que equivale aproximadamente a 1 m de abatimiento del niel de lixiviados en el vaso de vertido o a unas 125 h de bombeo de lixiviados en el S37.







30.0 35 25.0 25 20.0 Precipitación mm Caudal I/min 15,0 10,0 10 5,0 14/05/2021 14/06/2021 14/07/2021 14/08/2021 14/10/2021 14/11/2021 14/12/2021 14/04/2021 14/09/2021 caudal I/min Lluvia mm

Figura 17. Hidrograma del dren de cabecera abril-diciembre 21

En los próximos meses y al cumplir el año hidrológico de funcionamiento se estará en condiciones de valorar mejor la influencia del nuevo dren en los niveles de lixiviados así como el volumen de entradas anuales que el dren evita.

## 4.6.5 Control de salidas al pie del vertedero

Desde agosto de 2013, EMGRISA realiza la gestión de los bombeos y/o trabajos necesarios en la zanja drenante de la zona de surgencias de HCH (en adelante "CUNETA 1 o CN1"), hacia el decantador al pie del vertedero de Sardas. Se dispone adicionalmente de una gran arqueta o depósito de hormigón situado junto a la entrada de la parcela (en adelante "CUNETA 2 o CN2"), para "aliviar" hacia las balsas, en momentos de intensas precipitaciones y en el caso de que las surgencias llegaran a verter hacia el arroyo de la cárcava aneja.

Una vez finalizadas las obras de la cuneta de interceptación de surgencias ejecutadas 2018, las aguas surgentes al pie del vertedero llegan directamente a las balsas de tratamiento por gravedad sin necesidad de sistema de bombeo alguno y, desde finales de 2019, dichos fluidos pasan previamente por el nuevo decantador situado frente a una de las balsas.

En noviembre de 2020 se ha puesto en funcionamiento el sistema de lectura automático de caudal del aforador Parshall instalado en la Cuneta-1, alimentado por un panel solar. Durante el año 2021, el sistema ha registrado datos, aunque ha sufrido diferentes problemas técnicos, principalmente en el sistema de alimentación, que han imposibilitado disponer de una serie de datos homogénea. Además, se observa que, una vez eliminados los datos claramente anómalos, el caudal registrado en el sistema es aparentemente superior al real, en gran parte debido además a la recogida por parte de la cuneta de los fluidos circulantes por el drenaje transversal situado en la esquina N del vaso del frente del vaso de vertido.

Por tanto, los datos aquí mostrados presentan una alta incertidumbre, siendo previsiblemente subsanado el problema en los primeros meses de 2022.







PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

Desde el día 5 de abril de 2021 hasta el 31 de diciembre, incluso eliminando datos anómalos se han registrado más de 10.000 m³ en el sensor de medida. Estos datos no son coherentes con las estimaciones realizadas de las salidas del vaso de vertido (estimadas en aproximadamente 10-20 m³/día).

En la Figura 18 se presenta un gráfico con los resultados obtenidos:

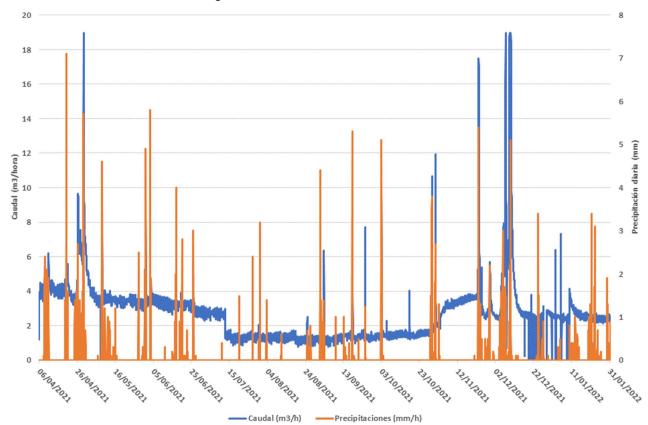


Figura 18. Caudales del aforador Parshall 2021.

## 4.7. CONTROL DE RESIDUOS

Todos los fluidos extraídos durante los trabajos realizados descritos en apartados precedentes han sido enviados directamente a las balsas de depuración al pie del vertedero o bien se almacenan temporalmente en depósitos adecuados hasta su tratamiento o gestión externa. Los principales volúmenes se obtienen desde los siguientes puntos:

- **Pozo S37**: Enviado directamente a balsas (pozo de bombeo para mantener el nivel de lixiviados en el vaso de vertido)
- **Cunetas de surgencias**: Enviado a balsas a través del nuevo decantador desde finales de 2019, donde queda retenida la fase libre hasta su gestión externa.
- Depósitos intermedios: donde se almacena temporalmente los fluidos extraídos durante los purgados y aquellos otros bombeos necesarios para su decantación, antes de su envío a balsas, previo paso por él decantador, quedando la fase libre almacenada en ellos hasta su gestión externa.
   Durante el año 2021, se han enviado a balsas desde estos depósitos un total de 292,50 m³ de fluidos.







Los trasiegos de fluidos se realizan con un control exhaustivo de los mismos y siguiendo los protocolos de seguridad establecidos.

La fase libre organoclorada acumulada, tanto en los decantadores del emplazamiento como en los depósitos de decantación de cada pozo de bombeo, quedan a la espera de la gestión como residuo peligroso que realiza el Gobierno de Aragón periódicamente.

Asimismo, los residuos sólidos generados (EPIs, tuberías usadas y testigos de sondeos principalmente), son acopiados temporalmente en el propio emplazamiento a la espera de gestión.

### 4.8. MUESTREOS DE SEGUMIENTO

El objetivo de la toma de muestras y análisis en laboratorio, ya sean suelos, aguas, lodos o residuos, es mantener un control de los diferentes compuestos presentes en el emplazamiento para:

- Tomar decisiones de cara a una descontaminación.
- Realización de ensayos.
- Gestión de residuos.
- Intensificar los trabajos de mitigación en algunos puntos.
- Mantener un seguimiento de la pluma de contaminación presente en el emplazamiento.
- Detectar fugas o vías de circulación preferente de lixiviados fuera del emplazamiento.

A continuación, se describen los diferentes muestreos realizados durante el seguimiento del año 2021., realizando una primera valoración anual para, posteriormente compararla con los resultados obtenidos desde el año 2015.

Para facilitar la comprensión de los resultados, en el presente apartado no se incluyen las muestras no incluidas en el seguimiento habitual, quedando indicadas y valorando sus resultados en sus apartados correspondientes (sondeos, ensayos etc.).

## 4.8.1 Muestreo de control de aguas superficiales y lixiviados

La distribución espacial de los puntos de control a los que se refiere este apartado está recogida en el Plano 4.1. *Puntos de muestreo y control de aguas superficiales y lixiviados* 

## Control de aguas superficiales

Durante año 2021 se ha realizado un muestreo mensual de aguas superficiales en varios puntos de control externos al emplazamiento con objeto de poder detectar hipotéticas salidas de fluidos impactados hacia receptores sensibles.

Si bien, en alguna de las campañas mensuales no se ha podido obtener una muestra representativa de las aguas superficiales al no presentar un caudal circulante suficiente u otros motivos, indicados en las correspondientes notas técnicas. En concreto, a lo largo de 2021 no se ha podido extraer una muestra en los







PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

meses de: julio, agosto y octubre en ninguno de los puntos de control. En la Tabla 17. Muestras de aguas superficiales tomadas. 2021.a continuación se indican con una "X" las muestras tomadas a lo largo de 2021.

Tabla 17. Muestras de aguas superficiales tomadas. 2021.

Punto de control	PC1	PC2	PC3	PC4	PC6	PC7	PC8	PC9
Enero	Χ	Χ	_	Χ	Χ	Χ	-	Х*
Febrero	Х	Х	Х	Х	Χ	Х	-	Х
Marzo	Х	Х	Х	Х	Χ	Х	-	Х
Abril	Х	Χ	Х	Х	Χ	Х	X**	-
Mayo	X*	Х*	Х	Χ	Χ	Х	Х*	_
Junio	Х	Х	Х	_	Χ	Х	Х	_
Julio	_	_	_	_	_	_	_	_
Agosto	_	-	_	_	_	_	_	_
Septiembre	Х	-	_	_	-	-	-	_
Octubre	-	-	_	_	-	_	_	_
Noviembre	Х	Х	Х	Х	Х	Х	Х	_
Diciembre	Х	Х	Х	Х	Χ	Х	Х	_

<sup>\*</sup> Se toman 2 muestras en el mes

Además, en la Tabla 18 se indican a continuación las características principales de cada punto de muestreo:

Tabla 18. Características de los puntos de control. 2021.

Punto de control	Cota de muestreo (m.s.n.m.)	Tramo
PC1	808,000	Aguas circulantes por el barranco anejo al vertedero en zona de cabecera
PC2	776,000	Aguas circulantes por el barranco anejo al vertedero antes de N-330
PC3	773,000	Aguas circulantes por el barranco anejo tras zona acceso parcela al pie
PC4	767,000	Aguas circulantes por el barranco anejo al vertedero justo antes de zona inundable por embalse
PC6	768,000	Aguas circulantes por la obra de desvío aguas junto aforador al pie, tras paso por vial acceso a balsas
PC7	765,000	Aguas circulantes por la obra de desvío aguas junto aforador al pie, junto a sondeo ST1C
PC8	805,000	Aguas circulantes por la obra realizada para el desvío de las entradas en la parte alta del vertedero.
PC9*	806,000	Aguas recogidas por el pozo situado junto a S35E.

<sup>\*</sup> También denominado "Cata S35E"

La variación más destacada con respecto a los muestreos realizados en 2020 es la inclusión del punto de muestro "PC8", situado a la salida de la obra de drenaje por gravedad realizada en la cabecera del vertedero, antes de su paso por el vertedero. El sistema de drenaje se encuentra activo desde el mes de abril de 2021, tras constatar que las muestras en el punto de control PC9 (punto que controla dichas aguas antes de su desvío al barranco de la cárcava aneja), no revelaban concentraciones significativas en cuanto a HCH. Aun así, durante los primeros días de apertura del sistema de desvío de agua se intensificó el muestreo para detectar con celeridad cualquier incremento de concentraciones.

<sup>\*\*</sup> Se toman más de 2 muestras en el mes







PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

Estas muestras, han sido recogidas y entregadas en el laboratorio que la DGA dispone en Sabiñánigo. A continuación, en la Tabla 19 se presentan los parámetros y análisis a solicitados al laboratorio.

Tabla 19. Analíticas aguas superficiales.										
	COVs									
1,1-Dicloroetano	1,3-Diclorobenceno									
Benceno	1,4-Diclorobenceno									
Tricloroetileno	1,2-Diclorobenceno									
Tetracloroetileno	1,3,5-Triclorobenceno									
Tolueno	1,2,4-Triclorobenceno									
Etilbenceno	1,2,3-Triclorobenceno									
m y p-Xileno	1,2,3,5+1,2,4,5-Tetraclorobencenos									
o-Xileno	Pentaclorobencenos									
Clorobenceno	Clorobenceno									
	CLOROFENOLES									
Fenol	2,4,6-Triclorofenol									
2-Clorofenol	2,3,5,6-Tetraclorofenol									
3-Clorofenol	2,3,4,6-Tetraclorofenol									
4-Clorofenol	2,3,4,5-Tetraclorofenol									
2,6-Diclorofenol	Pentaclorofenol									
2,4-Diclorofenol										
	COSVs									
Hexaclorobenceno	d-HCH									
a-HCH	e-HCH									
b-HCH	SUMA HCH									
g-HCH										

A continuación, se procede, como en otros apartados, a una valoración anual y posteriormente a una integración de los datos sobre la serie histórica desde el año 2015.

### Año 2021

Eliminando de la valoración las muestras tomadas en el punto PC9 mediante bombeo antes de abrir el sistema por gravedad en cabecera, durante el muestreo realizado en el mes de abril de 2021, se obtuvieron concentraciones cercanas a los 7  $\mu$ g/l en varios puntos de la red de control. Estas muestras motivaron la intensificación del muestreo durante los primeros días del mes de mayo donde las concentraciones no superaron 1  $\mu$ g/l. Al analizar con detalle los datos, se observó que el muestreo de abril se ejecutó tras unas precipitaciones intensas lo que pudo provocar pequeños arrastres que motivaron dichas concentraciones, ya que en el punto PC7, no conectado con el drenaje de cabecera, también se observaron concentraciones ligeramente superiores a las habituales.

Desde ese instante, no se han superado los 3 μg/l en ninguna de las muestras analizadas.

### Serie 2015-2021

Los resultados obtenidos a lo largo de la serie temporal 2015-2021, revelan las bajas concentraciones en todos los parámetros analizados, a lo largo del cauce de la cárcava aneja al norte del emplazamiento, no se producen salidas de entidad a cauce, sin embargo, debido a ciertos datos puntuales es preciso mantener el control de las aguas circulantes por dicha cárcava de cara a detectar con celeridad una posible salida importante de lixiviados y actuar en consecuencia.







PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

Algo similar ocurre en las aguas pluviales que recorren el emplazamiento pasando por el este y el sur del mismo, descargando las aguas a través del canal construido al pie del vertedero (puntos PC6 y PC7), si bien los valores obtenidos no muestran apenas concentraciones, deben seguir siendo muestreados para detectar rápidamente cualquier variación en la situación actual.

## Control de lixiviados

Se ha procedido mensualmente a la toma de muestras desde varios puntos de bombeo o de paso de lixiviados dentro del emplazamiento, con objeto de evaluar las variaciones de concentración de compuestos contaminantes en los mismos.

Si bien, en alguna de las campañas mensuales no se ha podido obtener una muestra representativa al no presentar un caudal circulante suficiente u otros motivos indicados en las correspondientes notas técnicas.

Una vez ejecutadas las obras al pie del vertedero durante el año 2019, se ha procedido a ajustar los puntos de control, modificando la ubicación y códigos de varios de los mismos, ver Plano 4.1. *Puntos de muestreo y control de aguas superficiales y lixiviados*. En la Tabla 20, se indican con una "X" las muestras tomadas a lo largo de 2021.

Tabla 20. Muestras de lixiviados tomadas. 2021.

Punto de control	CN	DR1	S37	SD
Enero	Х	Х	Χ	Х
Febrero	Х	Χ	Χ	Х
Marzo	Χ	Χ	Χ	Χ
Abril	Х	Χ	Χ	Х
Mayo	Х	Χ	Χ	Х
Junio	Χ	Χ	Χ	Χ
Julio	Χ	Χ	Χ	Χ
Agosto	Х	-	Χ	Х
Septiembre	Х	_	Χ	Χ
Octubre	Х	_	Χ	Χ
Noviembre	Χ	Χ	Χ	Χ
Diciembre	Χ	Χ	Χ	Χ

Además, se indican a continuación en la Tabla 21 las características principales de cada punto de muestreo:

Tabla 21. Características de los puntos de control. 2021.

		abid 21. Galacterioticas de 105 paritos de control 2021.
Punto de control	Cota de muestreo (m.s.n.m.)	Tramo
CN	770,000	Aguas circulantes por gravedad a su paso por el aforador al pie del vertedero
S37	779,497	Punto de bombeo vaso de vertido a 10 m. de profundidad
DR1	788,000	Salidas desde la esquina N del vaso de vertido conducidas balsas mediante dren
SD	767,000	Punto de salida a la balsa "vieja o nueva", en función de capacidad

Estas muestras, han sido recogidas y entregadas en el laboratorio que la DGA tiene instalado en el vertedero de Bailín. En la siguiente tabla se presentan los parámetros y análisis a solicitados al laboratorio.

Tabla 22. Analítica de lixiviados.







COVs									
1,1-Dicloroetano	1,3-Diclorobenceno								
Benceno	1,4-Diclorobenceno								
Tricloroetileno	1,2-Diclorobenceno								
Tetracloroetileno	1,3,5-Triclorobenceno								
Tolueno	1,2,4-Triclorobenceno								
Etilbenceno	1,2,3-Triclorobenceno								
m y p-Xileno	1,2,3,5+1,2,4,5-Tetraclorobencenos								
o-Xileno	Pentaclorobencenos								
Clorobenceno									
	CLOROFENOLES								
Fenol	2,4,6-Triclorofenol								
2-Clorofenol	2,3,5,6-Tetraclorofenol								
3-Clorofenol	2,3,4,6-Tetraclorofenol								
4-Clorofenol	2,3,4,5-Tetraclorofenol								
2,6-Diclorofenol	Pentaclorofenol								
2,4-Diclorofenol									
	COVs								
Hexaclorobenceno	d-HCH								
а-НСН	е-НСН								
b-HCH	SUMA HCH								
g-HCH									

Se procede a continuación, como en otros apartados, a una valoración anual y posteriormente a una integración de los datos sobre la serie histórica desde el año 2015.

#### Año 2021

De todas las muestras analizadas durante el año 2021 las aguas circulantes por la cuneta de surgencias se han alcanzado máximos de 387,70  $\mu$ g/l el día 25 de octubre y de 784,73  $\mu$ g/l el día 22 de diciembre de 2021, para suma de HCH y clorobenceno respectivamente. Los datos promedio aproximados de las muestras de 2020 son para suma de HCH 200  $\mu$ g/l y para clorobenceno 380  $\mu$ g/l, dicha cuneta de surgencia recibe aportes del punto drenante de las surgencias en el vaso de vertido "DR1", (ver párrafo siguiente), activado cuando el nivel del vaso supera cierto nivel.

El punto de control "DR1" recoge los fluidos que circulan a través del drenaje transversal a la pantalla lateral en la esquina N del vaso de vertido. De las muestras analizadas, se ha obtenido un máximo de 196,45  $\mu$ g/l para suma de HCH y de 7.292,68  $\mu$ g/l para clorobenceno en la muestra tomada el día 27 de julio, los promedios anuales de dichos parámetros son 82 y 1.800  $\mu$ g/l respectivamente, estos resultados revelan que la gran mayoría de los fluidos circulantes por este punto, proceden del vertedero, al presentar, además, en cierto momentos concentraciones similares al punto S37.

En cuanto a los lixiviados extraídos directamente del vaso de vertido (S37), se llega a obtener un valor de máximo de 235,78  $\mu$ g/l para la suma de HCH el día 24 de junio de 2021 y 36.965,74  $\mu$ g/l para clorobenceno el día 27 de agosto de 2021. Los promedios para ambos parámetros se sitúan en torno a 158 y 20.000  $\mu$ g/l respectivamente. Estos datos revelan unos valores similares en orden de magnitud en cuanto a clorobenceno y suma de HCH durante 2020.







Las concentraciones detectadas en el punto de salida a balsas, tras su paso por el decantador viene condicionado por vertidos realizados en el sistema de canalización, vaciados depósitos con alta carga contaminante, bombeo de S37 etc., con unos datos promedio en torno a 750  $\mu$ g/l y 668  $\mu$ g/l para suma de HCH y clorobenceno, sin haberse observado valores que superen este orden de magnitud. Se observa una disminución de las concentraciones para clorobenceno por efecto, con toda probabilidad del decantador situado al pie del vertedero.

#### Serie 2015-2021

Las aguas circulantes por la cuneta de surgencias al pie del talud (muestra CN desde finales de 2018) y CN1 antes de la construcción de la cuneta hormigonada no han sufrido variaciones en orden de magnitud con respecto a las tomadas en los años 2019 y 2020. Previamente los datos obtenidos antes de la construcción de la cuneta de surgencias eran superiores por realizar la toma de muestras en la zona histórica de surgencias de HCH, junto al antiguo decantador. Cabe decir que, todas las aguas que circulan actualmente por la nueva cuneta pasan antes de su llegada a balsas por el decantador situado junto a las mismas.

El punto de control "DR1", que recoge los fluidos que circulan a través del drenaje transversal a la pantalla lateral en la esquina N del vaso de vertido, mantiene valores similares a los datos registrados dese su construcción, no superando apenas los 200  $\mu$ g/l para suma de HCH en toda la serie histórica, siendo las concentraciones para clorobenceno oscilantes con datos puntuales por debajo del límite de detección del laboratorio en contraste con muestras por encima de los 5.000  $\mu$ g/l en algunos casos.

En cuanto a los lixiviados extraídos directamente del vaso de vertido (S37), al igual que las surgencias laterales captadas en el punto DR1, mantienen concentraciones bajas en cuanto a suma de HCH, en cambio las de clorobenceno se mantienen bastante estables y elevadas a lo largo de la serie alrededor de los 20.000 μg/l.

Las concentraciones detectadas en el punto de salida a balsas, habiendo sido tomadas en diferentes periodos (en algunos casos antes de la construcción del decantador previo a su salida a balsas), muestran concentraciones variables en función tanto de lo anteriormente citado, como por las diferentes concentraciones de los fluidos enviados a tratamiento, por lo que su valoración no puede ser realizada en profundidad.

### 4.8.2 Muestreo de seguimiento de aguas subterráneas

### Seguimiento trimestral

Con objeto de disponer de datos actualizados y de valorar la evolución de las concentraciones en varios puntos muestreados de manera habitual durante el seguimiento, se realiza el muestreo trimestral de aguas subterráneas.

En todas las campañas se toman muestra en varios puntos equipados en el nivel aluvial para evaluar variaciones en la pluma de contaminantes presentes en el agua de dicho nivel.

Con similar periodicidad se muestrean una serie de puntos en zona de cabecera y en el vaso de vertido.







PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

Durante el año 2021 se han llevado a cabo 4 campañas s de muestreo de aguas subterráneas. Por otro lado, el muestreo de diciembre que de manera ordinaria consta de unas 30 muestras, se amplió a 44, con objeto de incluir los puntos de nueva ejecución creados durante 2021 de mayor interés.

El número de muestras tomadas en cada ocasión ha sido determinado en base a los datos previos existentes, especialmente los obtenidos en los perfiles de conductividad; y siempre previo acuerdo con la Dirección Facultativa.

En la Tabla 23 se indican a continuación el número de muestras y puntos de control por campañas:

Tabla 23. Muestreas tomadas. Seguimiento trimestral 2021.

Campaña de muestreo	N.º de puntos	N.º de muestras
Marzo	60	60
Junio	29	29
Septiembre	59	59
Diciembre	44	44
Total anual		192

Finalmente, los datos relativos a estos muestreos (número de muestras por punto, profundidad, cota, incidencias, etc.) han sido convenientemente mostrados y desarrollados en los informes parciales correspondientes entregados al cliente a lo largo de 2021.

En el anexo 14, al final del presente informe, se muestran los resultados analíticos completos de las muestras de aguas subterráneas del año al completo.

En la Tabla 24,a continuación se indican con una "X" las muestras tomadas a lo largo de 2021.

Tabla 24. Muestreos de aguas subterráneas realizados. Seguimiento trimestral 2021.

Punto de		Muestreo			Punto de			Muestreo		
control	mar-21	jun-21	sep-21	dic-21	control	ene-21	mar-21	jun-21	sep-21	
Embalse	-	-	-	-	PS29D	-	-	-	Х	
PS1	Х	-	Х	Х	PS29E	-	Х	-	Х	
PS2	-	-	-	-	PS29F	-	-	-	Х	
PS3	-	-	-	-	PS29G	-	-	-	Х	
PS3B	Х	Х	Х	Х	<b>S2</b>	-	-	-	-	
PS4	-	Х	-	Х	S2B	-	-	-	-	
PS5	-	-	-	-	S30	-	-	-	-	
PS5B	-	-	-	-	S31	-	-	-	-	
PS5C	-	-	-	-	S32	-	-	-	-	
PS5D	Х	-	Х	-	S32B	Χ	-	Х	-	
PS5E	Х	-	Х	-	S32C	-	-	-	-	
PS5F	-	-	-	-	S32D	-	-	-	-	
PS5G	Х	-	Х	-	S33	Х	-	Х	Х	
PS5H	Х	-	Х	-	S33B	-	-	-	-	
PS5I	Х	-	Х	-	S34	-	-	-	-	







		. 2 0 2 0 0 0 0	ocgam		,corogres cara				
Punto de		Mue	streo		Punto de		Mue	streo	
control	mar-21	jun-21	sep-21	dic-21	control	ene-21	mar-21	jun-21	sep-21

control         mar-21         jun-21         sep-21         dic-21         control         en-21         jun-21         jun-21         sep-22           PS6         .         .         .         .         S358         X         X         X         X           PS77         .	Punto de		Mue	streo		Punto de		Mue	streo	
P56         -         -         -         S355         X         -         X         X           P576         -         -         -         S358         X         X         X         X         PS7         -	control	mar-21	jun-21	sep-21	dic-21	control	ene-21	mar-21	jun-21	sep-21
P57	PS6		_	<u> </u>	_	\$35	X	_	X	
PS78				_				Y		
PS7C										
PS7D         X         -		-	-	-	-		-			-
P57E         X         -         -         X           P57F         -         -         -         -         -         -         X         X         X         X         PS8         -	PS7C	-	-	-	-	S35D	-	-	-	-
PS7F         -         -         -         S36         X         X         X         X         PS8         -<	PS7D	Χ	-	X	-	S35E	-	-	-	-
PS8         -	PS7E	Χ	-	-	-	S35G	-	-	-	Х
PS8         -	PS7F	-	-	-	-	S36	Х	Х	Х	Х
PS8B         X         -         X         -         S37         -         -         -         X         -         X         -         X         -         X         -         X         -         X         -         X         -         X         -         X         -         X         -         X         -         X         -         X         -         X         -         X         -         X         - <td></td> <td>_</td> <td>_</td> <td>_</td> <td>_</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td>		_	_	_	_					
PS9         -         -         -         S37B         X         -         X         -         X         -         X         -         X         -         X         -         -         X         -         -         X         -         -         X         - <td></td>										
P513         X         X         X         X         S38B         X         -         X         -           P514         -         -         -         -         S38B         -         <										
PS138								-		-
P514         -         -         -         S38C         X         -         X         X           P514B         -         -         -         S39         -         -         -         -           P514C         -         -         -         -         S39B         -         -         -         -           P514D         - <td>PS13</td> <td>Х</td> <td>Х</td> <td>Х</td> <td>Х</td> <td>S38</td> <td>Х</td> <td>-</td> <td>Х</td> <td>-</td>	PS13	Х	Х	Х	Х	S38	Х	-	Х	-
P514B	PS13B	-	-	-	-	S38B	-	-	-	-
P514C         - <td>PS14</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>S38C</td> <td>Χ</td> <td>-</td> <td>Х</td> <td>Х</td>	PS14	-	-	-	-	S38C	Χ	-	Х	Х
P514C         - <td>PS14B</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>_</td> <td>-</td> <td>S39</td> <td>_</td> <td>_</td> <td>_</td> <td>_</td>	PS14B	-	-	_	-	S39	_	_	_	_
P514D         -         -         -         S39C         -<		_			_			_	_	
P514E         X         X         X         X         S39E         -<										
PS14F         -         -         -         S39E         -<										
PS14G         -         -         -         S39F         -<		Х	Х	Х	Х		-	-	-	-
PS14H         -         -         -         S39G         -<	PS14F	-	-	-	-	S39E	-	-	-	-
PS14I         -         -         -         S39H         -<	PS14G	-	-	-	-	S39F	-	-	-	-
PS14I         -         -         -         S39I         -<	PS14H	-	-	-	-	S39G	-	-	-	-
PS14I         -         -         -         S39I         -<	PS14I	-	-	-	-	S39H	-	-	-	_
P514K         - <td></td> <td>_</td> <td>_</td> <td>_</td> <td>_</td> <td></td> <td>_</td> <td>_</td> <td>_</td> <td>_</td>		_	_	_	_		_	_	_	_
PS14L         -         -         -         S39K         -<										
P514M         - <td></td>										
PS15         -         -         -         S39M         - </td <td></td>										
PS16         X         -         X         -         S400         - </td <td></td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td></td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td>		-	-	-	-		-	-	-	-
PS16B         X         -         S40B         -         -         -         -           PS16C         X         X         X         -         S41         X         X         X         -           PS16D         X         X         X         -         S41B         X         -         X         X           PS16E         X         X         X         -         S41C         -	PS15	-	-	-	-	S39M	-	-	-	-
P516C         X         X         X         -         S41         X         X         X         -         -         X         X         PS16D         X <th< td=""><td>PS16</td><td>Χ</td><td>-</td><td>X</td><td>-</td><td>S40</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></th<>	PS16	Χ	-	X	-	S40	-	-	-	-
PS16D         X         X         X         -         S41B         X         -         X         X           PS16E         X         X         X         -         S41C         -	PS16B	Χ	-	Х	-	S40B	-	-	-	-
PS16D         X         X         X         -         S41B         X         -         X         X           PS16E         X         X         X         -         S41C         -	PS16C	Х	Х	Х	-	S41	Х	Х	Х	_
PS16E         X         X         X         -         S41C         -<										X
PS16F         -         X         -         -         S41D         -<										
PS16G         X         X         X         -         S41E         -         -         X           PS16H         X         -         X         -         S41F         -         -         -         X           PS16I         X         -         X         -         S42         X         -         X         -           PS16J         X         -         X         -         S42B         X         -         X         -           PS16K         X         -         X         -         S43B         X         -         X         -           PS16L         X         -         X         -         S43B         -         -         -         -         -           PS16M         -         -         -         -         S44B         - <td< td=""><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>-</td><td><u>-</u></td><td><u>-</u></td><td></td></td<>							-	<u>-</u>	<u>-</u>	
PS16H         X         -         X         -         S41F         -         -         -         X           PS16I         X         -         X         -         S42         X         -         X         -           PS16J         X         -         X         -         S42B         X         -         X         -           PS16K         X         -         X         -         S43B         X         -         X         -           PS16L         X         -         X         -         S43B         -         -         -         -         -           PS16M         -         -         -         -         S44B         -         -         -         -         -           PS17         X         -         X         -         S44B         -         -         -         X           PS17B         X         -         -         S44C         -         -         -         X           PS19         -         -         -         -         S44E         -         -         -         X           PS19B         -         X         X<					-		-	-	-	
PS16I         X         -         X         -         S42         X         -         X         -           PS16J         X         -         X         -         S42B         X         -         X         -           PS16K         X         -         X         -         S43         X         -         X         -           PS16L         X         -         X         -         S43B         -<	PS16G	Х	Х	Х	-	S41E	-	-	-	Х
PS16J         X         -         X         -         S42B         X         -         X         -           PS16K         X         -         X         -         S43         X         -         X         -           PS16L         X         -         X         -         S43B         -         -         -         -         -           PS16M         -         -         -         -         S44B         -         -         -         -         -         -           PS17         X         -         X         -         S44B         -         -         -         X         X           PS17B         X         -         -         -         S44C         -         -         -         X         X           PS19B         -         X         X         -         S44E         -         -         -         X           PS19C         -         -         -         S44G         -         -         -         X	PS16H	Χ	-	Х	-	S41F	-	-	-	Χ
PS16K         X         -         X         -         S43         X         -         X         -           PS16L         X         -         X         -         S43B         -         -         -         -           PS16M         -	PS16I	Х		Х	=	S42	Х		Х	
PS16K         X         -         X         -         S43         X         -         X         -           PS16L         X         -         X         -         S43B         -         -         -         -           PS16M         -	PS16J	Х	-	Х	-	S42B	Х	-	Х	-
PS16L         X         -         S43B         -<			-		-			-		-
PS16M         -         -         -         -         S44         -         -         -         -         -           PS17         X         -         X         -         S44B         -         -         -         X           PS17B         X         -         -         -         S44C         -         -         -         X           PS18         -         X         -         -         S44D         -         -         -         X           PS19         -         -         -         -         S44E         -         -         -         X           PS19B         -         X         X         -         S44F         -         -         -         X           PS19C         -         -         -         -         S44G         -         -         -         X										
PS17         X         -         X         -         S44B         -         -         -         X           PS17B         X         -         -         -         S44C         -         -         -         X           PS18         -         X         -         -         S44D         -         -         -         X           PS19         -         -         -         -         S44E         -         -         -         X           PS19B         -         X         X         -         S44G         -         -         -         X           PS19C         -         -         -         -         S44G         -         -         -         X										
PS17B         X         -         -         -         S44C         -         -         -         X           PS18         -         X         -         -         S44D         -         -         -         X           PS19         -         -         -         -         S44E         -         -         -         X           PS19B         -         X         X         -         S44F         -         -         -         X           PS19C         -         -         -         -         S44G         -         -         -         X										
PS18         -         X         -         -         S44D         -         -         -         X           PS19         -         -         -         -         S44E         -         -         -         X           PS19B         -         X         X         -         S44F         -         -         -         X           PS19C         -         -         -         -         S44G         -         -         -         X	PS17	Х	-	Х	=	S44B	-	-	-	
PS19         -         -         -         -         S44E         -         -         -         X           PS19B         -         X         X         -         S44F         -         -         -         X           PS19C         -         -         -         -         S44G         -         -         -         X	PS17B	Х	-	-	-	S44C	-	-	-	Х
PS19B         -         X         X         -         S44F         -         -         -         X           PS19C         -         -         -         -         -         -         X	PS18	-	Х	-	-	S44D	-	-	-	Х
PS19B         -         X         X         -         S44F         -         -         -         X           PS19C         -         -         -         -         -         -         X	PS19	-	-	-	-	S44E	-	-	-	Х
PS19C S44G X		_	Х	Х	_		_	_	_	
PS19D S44H X										
	PS19D	-	-	-	-	544H	-	-	-	Х







Punto de		Mue	streo		Punto de		Mue	streo	
control	mar-21	jun-21	sep-21	dic-21	control	ene-21	mar-21	jun-21	sep-21
PS19E	Х	-	Χ	Х	S44I	-	-	-	Х
PS20	Х	Х	Х	Х	S44J	-	-	-	Х
PS20B	Х	-	Х	-	S44K	-	-	-	Х
PS20C	-	-	-	-	S44L	-	-	-	Х
PS21	-	-	-	-	SEL1	-	-	-	-
PS21B	Х	Х	Х	Х	SEL2	-	-	-	-
PS21C	Х	-	Х	Х	SEL3	-	-	-	-
PS21D	-	-	-	-	SEL4	-	-	-	-
PS22	-	-	-	-	SO1	-	-	-	-
PS23	-	-	-	-	SO2	-	-	-	_
PS23B	Х	=	Х	-	SO3	-	-	-	=
PS24	Х	Х	Х	Х	SPN1	Χ	-	Х	_
PS25	-	-	-	-	SPN3	-	-	-	-
PS25B	Х	Х	Х	Х	SPN4	-	-	-	-
PS25C	-	-	-	-	SPN5	-	-	-	-
PS25D	-	-	-	-	SPN6	Х	Х	Х	-
PS26	Х	Х	Х	Х	SPN6B	Х	-	Х	-
PS26B	Х	-	Х	-	ST1	Х	Х	Х	Х
PS26C	-	-	-	-	ST1B	Х	Х	Х	Х
PS27	Х	-	Х	-	ST1C	Х	Х	Х	Х
PS28	-	-	-	-	ST1D	-	-	-	-
PS28B	Х	Х	Х	Х	ST1E	Х	Х	Х	Х
PS29	-	-	-	-	ST1F	Х	Х	Х	Х
PS29B	Х	Х	Х	Х	ST2	Х	Х	Х	Х
PS29C	-	-	-	-					

El protocolo de muestro seguido ha sido el mismo que en ocasiones precedentes, quedando detallado en el documento "Protocolo de campañas de muestreo" dentro de la *"Oferta para el Servicio de Seguimiento Hidrogeológico de Sardas (Huesca) 2017-2018"*, febrero 2017.

En la Tabla 25 se recogen los parámetros solicitados al laboratorio para el análisis de las muestras recogidas durante las diferentes campañas.

Tabla 25. Analíticas seguimiento trimestral.

COVs		
1,1-Dicloroetano	1,3-Diclorobenceno	
Benceno	1,4-Diclorobenceno	
Tricloroetileno	1,2-Diclorobenceno	
Tetracloroetileno	1,3,5-Triclorobenceno	
Tolueno	1,2,4-Triclorobenceno	
Etilbenceno	1,2,3-Triclorobenceno	
m y p-Xileno	1,2,3,5+1,2,4,5-Tetraclorobencenos	
o-Xileno	Pentaclorobencenos	
Clorobenceno		
CLOROFENOLES		
Fenol	2,4,6-Triclorofenol	
2-Clorofenol	2,3,5,6-Tetraclorofenol	
3-Clorofenol	2,3,4,6-Tetraclorofenol	







4-Clorofenol	2,3,4,5-Tetraclorofenol
2,6-Diclorofenol	Pentaclorofenol
2,4-Diclorofenol	
	COVs
Hexaclorobenceno	d-HCH
a-HCH	e-HCH
b-HCH	SUMA HCH
g-HCH	
IN	IORGÁNICOS
Sulfatos	Potasio
Cloruros	Magnesio
Carbonatos	Manganeso
Bicarbonatos	Hierro (II)
Calcio	Hierro Total
Sodio	

Como en otros apartados, se procede a una primera valoración anual, por zonas, para realizar una posterior comparación con la serie histórica de resultados desde el año 2015. Cabe decir que, debido al aumento significativos de puntos de control en el emplazamiento, se han retirado del muestreo ciertos puntos muestreados de manera periódica que, bien por sus bajas concentraciones, bien por no presentar interés en la interpretación, para permitir introducir aquellos puntos de nueva ejecución en los últimos años.

### Zona 1. Perimetrales parte alta

### Año 2021

Los piezómetros que monitorizan las entradas al vertedero, tanto en la zona de cabecera como al este y al sur de la parte alta del vertedero, se encuentran equipados en su mayoría en la franja superior del paquete rocoso o en el glacis suprayacente. Se diferencian dentro de esta zona los siguientes grupos:

- Puntos en cabecera: Los puntos S2´s, S33´s, y S35´s. Aquellos muestreados durante el año 2021, no presentan concentraciones significativas de HCH, salvo S35 (superando los 50 μg/l) en el muestreo de septiembre de 2021. En cambio, los valores para clorobenceno si revelan concentraciones de entidad (mayores a 5.000 μg/l en S35 y S35B, en varias de las muestras analizadas.
- Puntos al este del vertedero: Los puntos S32B, C y D: Equipados en roca los dos primeros y en glacis el S32D. Durante el año 2021, solo ha sido muestreado el punto S32B (equipado en roca), con concentraciones inferiores a los 20 μg/l para suma de HCH, en las dos muestras analizadas durante el periodo de estudio.
- Puntos en zona sur entradas: Grupos S41's. En esta zona, al igual que los puntos situados al este, los valores no reflejan valores elevados para ninguno de los compuestos analizados durante el año 2021.

## Serie 2015-2021

- Las concentraciones obtenidas en los puntos situados en cabeceras, esto es, los grupos S2´s, S33´s y S35´s no muestran variaciones en orden de magnitud con respecto a lo observado desde el año 2015, observándose valores elevados para clorobenceno, y benceno en algunos casos en el punto S35.
- Puntos al este del vertedero: Dada las bajas concentraciones históricas detectadas y, debido al incremento de puntos, sólo se muestrea en esta zona el punto S32B, equipado en roca, manteniendo en 2021 concentraciones similares y de baja entidad a las detectadas en muestras previas.







 Puntos en zona sur entradas: Grupos S41's. Al igual que en las zonas anteriores, se mantiene una situación similar a la observada en la serie histórica en los puntos muestreados, tanto S41 y S41B, con datos previos, como aquellos de nueva construcción S41E y S41F, con concentraciones de poca entidad en los compuestos analizados.

## Zona 2. Vaso de vertido

#### Año 2021

Los piezómetros situados dentro del recinto vallado del vertedero se dividen en 2 grandes grupos:

- Puntos que monitorizan el nivel de rellenos: Esto es, S34, S36, S36B, S37, S38C, grupo S39´s, S42B, S43, S43B, SO1 y SO2 (inclinados). De los puntos muestreados, se observan concentraciones significativas para clorobenceno (superiores a los 5.000 μg/l en algunos casos), e inferiores a los 300 μg/l para suma de HCH. No han sido muestreados puntos con evidencias claras de residuo libre
- Puntos que monitorizan el nivel de en roca: Esto es, S30, S32, S38 y S38B. El punto muestreado en 2 campañas dentro de esta zona (S38), revela concentraciones muy elevadas tanto para el clorobenceno (mayores de 50.000 μg/l) y para suma de HCH (por encima de 8.000 μg/l). Este punto tiene evidencias históricas de presencia de fase libre lo que, por su ubicación cerca de la esquina N del vaso de vertido, presenta interés por ser, como se ha indicado en informes anteriores una zona de estudio al detalle.

## Serie 2015-2021

- Puntos que monitorizan el nivel de relleno en el emplazamiento: Esto es, los pozos: S34, S36, S36B, S37, S38C, grupo S39´s, S42B, S43, S43B, SO1 y SO2 (inclinados). Principalmente el muestreo se mantiene de manera periódica en los puntos de la parte frontal, destacando que, las concentraciones de clorobenceno en la esquina N del vaso de vertido (S38C), al menos en los últimos 2 muestreos, han disminuido con respecto a lo habitual observado en la serie histórica. El resto de los puntos mantienen valores similares con bajas concentraciones de HCH (S36, S42 y S43). Cabe resaltar que la zona del grupo S39´s no es muestreada de manera periódica ya que, la gran mayoría de puntos se encuentran equipados con dispositivo de bombeo neumático para la extracción de residuo en fase libre (DNAPL).
- Puntos que monitorizan el nivel de roca: Esto es, S30, S32, S38 y S38B. Los puntos situados en la parte alta del vertedero no han sido muestreados durante 2021 por perder interés de cara a la interpretación debido a las escasas variaciones observadas en la serie histórica y a sus bajas concentraciones. En la zona que se sitúa en la parte frontal del vaso de vertido, la zona norte, se muestrea de manera periódica el punto S38 que, en comparación con la serie histórica, mantiene concentraciones similares en orden de magnitud, muy elevadas tanto en la suma de HCH como de clorobenceno.

## Zona 3. Carretera N-330

## Año 2021

Se incluyen los piezómetros situados en ambos márgenes de la carretera N-330, aquellos situados en el margen izquierdo (más cercanos a la parcela al pie) son de nueva ejecución, por ello, mientras se definen







conexiones con el otro margen que permitan una valoración conjunta de las salidas desde el vaso de vertido, la misma se realizará en dos subgrupos:

- Margen derecho (junto recinto vallado): Esto es, PS22, PS23, PS23B, S37B, S40, S40B, S42 y SO3 (inclinado). Las concentraciones detectadas para suma de HCH en el punto PS23B, situado en la esquina N del vaso de vertido máximo superior a los 4.000 μg/l), son superiores a los detectados en S37B, coincidente con el desagüe original de la cárcava, sin embargo, en cuanto a clorobenceno se da la situación contraria (por encima de 70.0000 μg/l en S37B y por debajo de 400 en PS23B).
- Margen izquierdo (junto parcela al pie): En esta zona, en el muestreo realizado en diciembre de 2021, las concentraciones elevadas se dan en la franja que une el desagüe original con la esquina N, con concentraciones máximas superiores a 11.000 μg/l para suma de HCH y de 61.000 μg/l para clorobenceno.

#### Serie 2015-2021

- Margen derecho. Sin contar los puntos no muestreados con presencia habitual de fase libre (S40), se observa, al igual que en punto S38C, citado más arriba, una disminución de las concentraciones de clorobenceno. Normalmente, dicho compuesto está asociado a la cercanía de residuo libre en el emplazamiento y, junto con lo observado dentro del recinto en esa misma esquina, podría indicar una disminución de la fase libre en esta zona. La disminución del porcentaje de residuo recuperado en el punto PS23, históricamente el mayor del emplazamiento apoyaría dicha hipótesis. En el resto de los puntos muestreados (S37B), se mantienen concentraciones elevadas similares a las observadas en años anteriores.
- Margen izquierdo. No se dispone de datos históricos de esta zona por ser todos los puntos de nueva construcción.

### Zona 4. Relleno parcela al pie

No ha sido muestreado punto alguno perteneciente a esta zona durante el año 2021, por lo que no es posible su comparación, estos puntos, se encuentran relacionados ambos con presencia de residuo libre en la base de los rellenos durante la testificación de los mismos, por lo que su monitorización se realiza principalmente con la toma de datos manuales de espero de residuo.

## Zona 5. Limos parcela al pie

## Año 2021

Los valores máximos registrados en esta zona corresponden al punto PS5E, situado en la mitad superior de la parcela al pie del vertedero, zona con presencia de fase libre. En este sector, se han superado los 5.000 y 45.000 µg/l para suma de HCH y clorobenceno respectivamente en las 2 muestras tomadas en este punto en el año 2021.

### Serie 2015-2021

En los puntos muestreados dentro de esta apartado, no existen, salvo en los puntos PS7C y PS19C, que mantienen valores similares, datos para realizar una comparación adecuada con la serie histórica en los limos de la parcela al pie, por lo que su valoración se realizará una vez se disponga de más resultados para







comparar, dado el creciente interés en este horizonte en los últimos años que ha motivado la creación de hasta 8 nuevos puntos de control, entre los años 2020 y 2021.

### Zona 6. Aluviales parcela al pie

#### Año 2021

Dada la gran cantidad de puntos, se recomienda para una mayor comprensión consultar el *Plano 4.1. Puntos de muestreo y control de aguas superficiales y lixiviados* y sucesivos, situados al final del presente informe.

De los resultados obtenidos, se observa que las mayores concentraciones se detectan en la zona central de la parcela al pie extendiéndose la "pluma de afección" ligeramente hacia el sur en la zona cercana al punto ST1C. Las concentraciones máximas detectadas superan los  $5.000 \, \mu g/l$  para suma de HCH y los  $15.000 \, \mu g/l$  para clorobenceno, de manera general, en puntos donde se ha detectado residuo libre.

#### Serie 2015-2021

Retirando de la valoración aquellos puntos con presencia ocasional o habitual de residuo libre, la gran mayoría situados en el centro de la parcela, las concentraciones detectadas en 2021 en comparación con el resto de la serie no han sufrido variaciones en orden de magnitud, de manera general, con respecto a la situación previa.

### Zona 7. Mixtos parcela al pie

### Año 2021

Las mayores concentraciones en estos puntos son similares a los puntos aluviales cercanos, de ellos destacan las concentraciones en el punto PS16, PS20 y PS24.

Significativas también, en puntos que no presentan tramo filtrante en el aluvial, las concentraciones detectadas junto al talud de la N-330 en los puntos PS29D, E, F y G.

## Serie 2015-2021

En aquellos puntos que presentan suficientes muestras para realizar la valoración, no se observan apenas variaciones con respecto al histórico de datos, siendo, los situados en la zona central de la parcela al pie, equipados en el nivel gravas – marga, (PS16, PS19, PS20 y PS24), los que mayor carga contaminante presentan.

### Zona 8. Margas al pie

## Año 2021

De los puntos muestreados durante 2021 equipado en margas, cabe destacar las elevadas concentraciones para clorobenceno en el punto PS29B, superiores a 40.000 µg/l en todas las muestras tomadas.

Durante 2021, no se han muestreado aquellos puntos con evidencias de fase libre PS25 y PS25D, situados al en la zona norte de la parcela al pie.

### Serie 2015-2021







PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

Las concentraciones en los puntos situados en esta zona, de manera general, no presentan variaciones a lo largo de la serie histórica, salvo quizá el punto PS25D (no muestreado en 2021) que presenta en las últimas campañas residuo libre, al igual que PS25.

De manera general se puede indicar que las concentraciones mayores se dan en aquellos puntos situados tanto al pie del talud junto a la surgencia histórica de HCH y quizás a favor de una zona de fracturación "norteada" en la zona de los PS25's a más de 30 m. de profundidad. El resto de los puntos se mantienen en concentraciones, general más bajas que sus pares cercanos equipados en gravas.

### Zona 9. Parcela Norte al pie

#### Año 2021

No se observan concentraciones significativas en los puntos muestreados en parcela norte al pie de la carretera, no habiéndose superado los  $50 \, \mu g/l$  para suma de HCH en ninguna de las muestras analizadas

### Serie 2015-2021

Las concentraciones en el punto ST2, con datos en toda la serie desde 2015, no muestra variaciones significativas en toda la serie con concentraciones que no superan los  $50 \,\mu\text{g/l}$  para suma de HCH. Algo similar ocurre con el resto de los puntos, ejecutados en el año 2019, aunque se observa que las concentraciones en el punto SPN6B, equipado en roca, son algo superiores para clorobenceno que en el resto (cercanas a los 100  $\,\mu\text{g/l}$  en algún caso).

## Seguimiento quincenal

Tras detectar un incremento de las concentraciones en los puntos ubicados al oeste de la parcela al pie del vertedero en el seguimiento trimestral de 2015, se acordó con la Dirección Facultativa realizar un seguimiento de control con periodicidad quincenal, intensificando así los muestreos, con el objeto de detectar rápidamente cualquier posible aumento de las concentraciones en las zonas próximas al embalse de Sabiñánigo.

Posteriormente, en las primeras campañas realizadas en septiembre de 2015 se apreció una significativa reducción de las concentraciones observadas, por lo que se decidió limitar este seguimiento al punto ST1C, situado en el frente de contacto entre la masa de agua subterránea y la procedente del embalse, salvo que, por detectar un incremento de las concentraciones se amplie el muestreo a puntos cercanos o se considere necesario la toma de muestras adicionales he dicho punto.

En la Tabla 26 se presentan los resultados del muestreo quincenal llevado a cabo en este punto durante 2021.

Tabla 26. Muestras de aguas subterráneas seguimiento quincenal. 2021.

Punto de muestreo	Código de muestra	Cota de muestreo (m.s.n.m.)	Tipo de muestra	Fecha / hora de muestreo
ST1C	SAR ST1C A1 7,0 13-01-21	760,183	Aguas subterráneas	13/01/2021 11:46
ST1C	SAR ST1C A1 7,0 29-1-21	760,183	Aguas subterráneas	29/01/2021 12:16
ST1C	SAR ST1C A1 7,0 8-2-21	760,183	Aguas subterráneas	08/02/2021 12:38
ST1C	SAR ST1C A1 7,0 23-2-21	760,183	Aguas subterráneas	23/02/2021 11:30
ST1C	SAR ST1C A1 7,0 9-3-21	760,183	Aguas subterráneas	09/03/2021 13:25
ST1C*	SAR ST1C A1 7,0 18-3-21	760,183	Aguas subterráneas	18/03/2021 13:08
ST1C	SAR ST1C A1 7,0 09-04-21	760,183	Aguas subterráneas	09/04/2021 11:10







Punto de muestreo	Código de muestra	Cota de muestreo (m.s.n.m.)	Tipo de muestra	Fecha / hora de muestreo
ST1C	SAR ST1C A1 7,0 27-04-21	760,183	Aguas subterráneas	27/04/2021 13:20
ST1C	SAR ST1C A1 7,0 7-05-21	760,183	Aguas subterráneas	07/05/2021 9:15
ST1C	SAR ST1C A1 7,0 21-05-21	760,183	Aguas subterráneas	21/05/2021 13:10
ST1C	SAR ST1C A1 7,0 8-06-21	760,183	Aguas subterráneas	08/06/2021 9:00
ST1C*	SAR ST1C A1 7,0 22-06-21	760,183	Aguas subterráneas	22/06/2021 10:52
ST1C	SAR ST1C A1 7,0 09-07-21	760,183	Aguas subterráneas	09/07/2021 11:08
ST1C	SAR ST1C A1 7,0 16-07-21	760,183	Aguas subterráneas	16/07/2021 9:54
ST1C	SAR ST1C A1 7,0 27-07-21	760,183	Aguas subterráneas	27/07/2021 8:34
ST1C	SAR ST1C A1 7,0 13-08-21	760,183	Aguas subterráneas	13/08/2021 8:26
ST1C	SAR ST1C A1 7,0 27-08-21	760,183	Aguas subterráneas	27/08/2021 8:38
ST1C	SAR ST1C A1 7,0 6-09-21	760,183	Aguas subterráneas	06/09/2021 17:00
ST1C*	SAR ST1C A1 7,0 27-09-21	760,183	Aguas subterráneas	16/09/2021 11:14
ST1C	SAR ST1C A1 7,0 11-10-21	760,183	Aguas subterráneas	11/10/2021 10:50
ST1C	SAR ST1C A1 7,0 25-10-21	760,183	Aguas subterráneas	25/10/2021 10:50
ST1	SAR ST1 A1 8,0 25-11-21	758,995	Aguas subterráneas	25/11/2021 14:05
ST1	SAR ST1 A1 7,0 25-11-21	759,995	Aguas subterráneas	25/11/2021 16:00
ST1C	SAR ST1C A1 7,0 25-11-21	760,183	Aguas subterráneas	25/11/2021 16:20
ST1C	SAR ST1C A1 7,0 9-12-21	760,183	Aguas subterráneas	09/12/2021 12:10
ST1C*	SAR ST1C A1 7,0 20-12-21	760,183	Aguas subterráneas	20/12/2021 12:18

<sup>\*</sup> Coincidente con el muestreo trimestral

Estas muestras, han sido entregadas en el laboratorio situado en el "Pirenarium" de Sabiñánigo, perteneciente a la DGA. En la Tabla 27 se presentan los parámetros y análisis a solicitados al laboratorio.

Tabla 27. Analíticas	seguimiento	quincenal.
----------------------	-------------	------------

COVs		
1,1-Dicloroetano	1,3-Diclorobenceno	
Benceno	1,4-Diclorobenceno	
Tricloroetileno	1,2-Diclorobenceno	
Tetracloroetileno	1,3,5-Triclorobenceno	
Tolueno	1,2,4-Triclorobenceno	
Etilbenceno	1,2,3-Triclorobenceno	
m y p-Xileno	1,2,3,5+1,2,4,5-Tetraclorobencenos	
o-Xileno	Pentaclorobencenos	
Clorobenceno		
CLOROFENOLES		
Fenol	2,4,6-Triclorofenol	
2-Clorofenol	2,3,5,6-Tetraclorofenol	
3-Clorofenol	2,3,4,6-Tetraclorofenol	
4-Clorofenol	2,3,4,5-Tetraclorofenol	
2,6-Diclorofenol	Pentaclorofenol	
2,4-Diclorofenol		
COVs		
Hexaclorobenceno	d-HCH	
a-HCH	e-HCH	
b-HCH	SUMA HCH	
g-HCH		

Año 2021



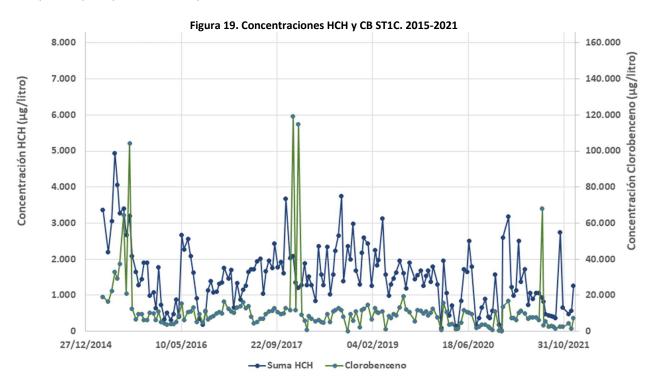




Los resultados obtenidos este año en ST1C muestran un promedio en cuanto a suma de HCH cercano a los  $1.100~\mu g/l$  y cercano a los  $8.800~\mu g/l$  para clorobenceno, alcanzándose máximos anuales de 3,173,69 el día 13~de enero de 2021 y de  $68.108,27~\mu g/l$  el 9~de julio de 2021. Este valor de clorobenceno motivó un muestreo adicional donde las concentraciones volvieron a los valores habituales, entre los  $5.000-10000~\mu g/l$  de manera habitual.

#### Serie 2015-2021

A continuación, se muestra de manera gráfica los resultados obtenidos para suma de HCH y clorobenceno en dicho punto, para proceder a su posterior valoración.



Los resultados promedio de HCH de 2021 (1.100  $\mu$ g/l), pese a ser ligeramente superiores al año anterior (2020, 900  $\mu$ g/l), se encuentran por debajo de la media de concentraciones de la serie histórica (superior a los 1.500  $\mu$ g/l).

Algo similar ocurre con las concentraciones medias de clorobenceno donde en 2021 se obtiene un valor medio de  $8.800 \, \mu g/l$ , siendo la media de la serie histórica superior a los  $11.000 \, \mu g/l$ .







# 5. TRATAMIENTOS DE DESCONTAMINACIÓN

Dada la situación del emplazamiento, con un modelo conceptual sólido y el drenaje de lixiviados y posibles aportes superficiales de afección al DPH, muy controlados y de acuerdo con lo establecido en la hoja de ruta del *Plan estratégico de lucha integral contra la contaminación de los residuos generados por la fabricación de lindano en Aragón*, se establecen las prioridades y líneas de acción generales en cuanto a la descontaminación que deben conformar un *tren* de actuaciones, que abarque desde la extracción y descontaminación de los focos secundarios de afección (DNAPL, limos y rellenos) hasta la remediación final de la fase disuelta en el acuífero del Gállego.

Este *tren* de técnicas debe incluir la actuación sobre diversos substratos muy heterogéneos, el propio vaso de vertido, el acuífero aluvial del Gállego, pasando por la formación limosa cuaternaria que fosiliza el aluvial y que presenta en algunos sectores elevadas concentraciones de contaminantes que continúan aportando masa de clorados al aluvial, así como otras zonas intermedias como el terraplén de la carreta N-330.

De acuerdo con lo anterior, la descontaminación del emplazamiento tiene los siguientes objetivos fundamentales:

Evitar o minimizar el aporte de carga contaminante desde el acuífero del río Gállego hacia el embalse de Sabiñánigo, principal receptor sensible. Se trata de un objetivo a medio plazo dada la complejidad de la situación del emplazamiento. Para alcanzarlo, se ha de avanzar en las siguientes líneas de trabajo

**Extracción de fase libre y lixiviados** (directa y mejorada con surfactantes). La presencia de DNAPL en el emplazamiento constituye en sí misma un foco activo de contaminación que aporta concentraciones de contaminantes a la fase disuelta (aguas subterráneas) de forma continua. La extracción de fase libre es necesaria para subsiguientes trabajos de descontaminación sean efectivos.

Descontaminación del acuífero aluvial. Una vez se haya extraído la fase libre organoclorada, ya sea de forma directa o de forma mejorada con surfactantes, se debe actuar sobre la fase remanente y disuelta con tratamientos fisicoquímicos de descontaminación (SEAR, ISCO y SISCO) y técnicas de tratamiento de biorremediación (laboratorio e in situ en el acuífero aluvial), estas últimas, en principio para concentraciones menores en zonas distales de la pluma o sobre la pluma ya descontaminada parcialmente.

Todo esto se complementa con la realización de ensayos de **tratamiento de contaminantes en medios de baja permeabilidad** dado que la formación limosa que fosiliza al acuífero aluvial del Gállego está fuertemente impactada y podría constituir un foco secundario de afección al acuífero que impediría la efectividad de los tratamientos aplicados a dicho acuífero.

Además, los rellenos de las parcelas al pie del vertedero así como los del terraplén de la carretera también constituyen focos secundarios sobre los que es necesario actuar, si bien es cierto que hay que profundizar en su caracterización. La presencia de la N-330 ha dificultado hasta la fecha la caracterización y actuación en esta zona.







# **5.1. TRATAMIENTOS FISICOQUÍMICOS**

El grupo de investigación IMPROQUIMA (INtensificación de PROcesos de interés QUImico y MedioAmbiental) de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Complutense de Madrid ha colaborado con EMGRISA en los siguientes trabajos relacionados con tratamientos fisicoquímicos de descontaminación. En el Anexo 1. *Aplicación de tratamiento fisicoquímico IMPROQUIMA (UCM),* de la presente Memoria, se incluyen los informes completos de su participación en el Seguimiento que incluyen las siguientes actuaciones que se resumen en apartados sucesivos.

- Extracción mejorada con surfactantes (SEAR)
- Tratamiento on site de emulsiones con surfactante y contaminantes clorados.
  - Hidrólisis alcalina de HCHs
  - Estabilidad de las emulsiones alcalinas
  - o Equilibrio líquido-vapor. Coeficientes de actividad en presencia de surfactante
- Simulación de ensayo ISCO (In situ chemical oxidation) en el aluvial.

## 5.1.1 Extracción mejorada con surfactantes (SEAR)

El objetivo de la extracción mejorada con surfactantes (*Surfactant Enhanced Aquifer Remediation* o SEAR por sus siglas en inglés) es extraer la fase densa que permanece aún en el subsuelo mediante la inyección y extracción de una solución acuosa con surfactante. Esta fase orgánica se encuentra principalmente en el contacto con la marga en el vertedero, en la zona del terraplén de la carretera nacional y en el contacto con la marga de la zona del aluvial al pie del vertedero. La presencia de surfactante aumenta la solubilidad de los compuestos orgánicos clorados (COC) en la fase acuosa y disminuye la tensión superficial de la fase orgánica en contacto con esta fase acuosa. Como resultado, el surfactante promueve la incorporación de los contaminantes a la fase acuosa bien solubilizados o bien en gotas de fase orgánica en emulsión, lo que facilita la extracción de una mayor masa de DNAPL del subsuelo respecto a la conseguida por técnicas de bombeo tradicionales. La solución extraída contiene fase orgánica, DNAPL, arrastrada en forma de gotas (que pueden separarse por decantación) y una disolución acuosa con el surfactante y los COC solubilizados. El surfactante debe ser biodegradable, preferiblemente no iónico.

PANTALLA FRONTAL
CTRA. N-330

PS21

PS14

PS14

PS14

PS14

PS15

PS29

PS29

PS29

PS29

PS29

PS37

PS37

PS37

PS37

PS38

PS29

PS39

Figura 20. Zona de actuación SEAR en perfil.







PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

Son aspectos clave para el correcto diseño del proceso SEAR describir la adsorción del surfactante en el suelo (equilibrio y cinética) y la partición de los COC y del surfactante entre las fases orgánicas y acuosas (equilibrio y cinética). La disolución acuosa extraída, contiene una elevada concentración de surfactantes y de COC, es por tanto un residuo que debe tratarse *on site* para, si es posible, recuperar el surfactante (que podría reinyectarse) y eliminar selectivamente los COC. Como tratamiento *on site* de los fluidos bombeados se realizará un tratamiento alcalino de la emulsión, que transforma los COC más pesados (HCH y heptaclorociclohexanos) en semivolátiles (triclorobencenos y tetraclorobencenos, respectivamente), que pueden ser arrastrados de la emulsión con una corriente de gas, enviada después a un lecho de carbón activo donde quedan retenidos los COC presentes en la fase gas. Este lecho puede regenerarse posteriormente en el propio emplazamiento mediante un tratamiento de oxidación (Persulfato activado por temperatura o Reactivo Fenton).

Para un diseño más eficiente de la aplicación de la Tecnología SEAR en el emplazamiento y de los tratamientos *on site* de los fluidos extraídos, se ha desarrollado un modelo que permite predecir la partición de los COC y surfactantes entre las fases acuosa y orgánica y la adsorción de surfactante en el suelo.

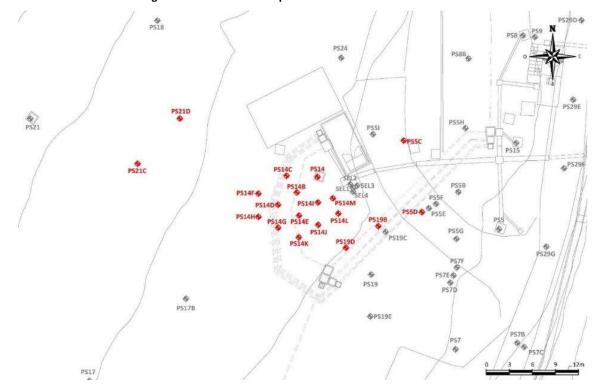


Figura 21. Ubicación de los piezómetros monitorizados en SEAR.

### 5.1.1.1 Descripción y características del tratamiento

El tratamiento SEAR llevado a cabo en el emplazamiento entre abril y octubre de 2021, ha consistido en la ejecución de 8 eventos de inyección de una solución con surfactante en el acuífero y el posterior bombeo.

Se han probado diferentes configuraciones de inyección y bombeo, variándose distintos parámetros (caudales de inyección y bombeo, concentraciones de surfactante, etc.) con el fin de mejorar el conocimiento







PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

del proceso e incrementar la eficacia del tratamiento. En la Tabla 28 se detallan las características de los eventos de inyección y en la figura siguiente se muestra la ubicación de los puntos monitorizados en el entorno de los pozos PS14

En algunos de ellos se ha añadido trazador conservativo (bromuro), para estudiar el flujo de los fluidos inyectados. En otro (ensayo 7), se ha determinado también el perfil de conductividad con la altura del aluvial para estudiar la distribución del fluido inyectado con el tiempo.

IMPROQUIMA entre otros trabajos, ha modelizado las inyecciones realizando predicciones de la progresión de las concentraciones de surfactante y en su caso trazador en los diversos eventos de inyección. Para más detalle en el Anejo 1 se presenta el informe completo de IMPROQUIMA.

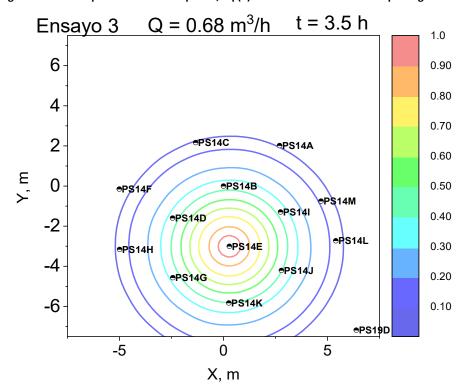


Figura 22. Perfiles predichos en UCM para F, eq (1) en el Evento 3 altura de capa de gravas 1 m







PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

Tabla 28. Eventos de invección de surfactante (trazador según casos) abr. – Oct. 21. Zona PS14s

			•	ctante (trazador segi	•			
Eventos	1	2	3	4	5	6	7	8
				INYECCIONES				
Punto (s) inyección	PS14B, PS14E, PS14I	PS5D	PS14E	PS14E	PS14I		PS14B, PS14J, PS14M	PS14D
Fecha /hora inyección	20/04/2021 8:00	11/05/2021 10:30	24/05/2021 13:30	07/06/2021 10:35	14/06/2021 11:50		20/09/2021 12:07	05/10/2021 13:30
Conc. Surfactante (g/l)	25	20	6.7	20	20		20	50
Bromuro (SI/NO)	SI (260 mg/L)	NO	NO	NO	NO		SI	NO
Q inyección (m3/h)	0,30	0,65	0,68	0,85	0,71		0,20	Aprox 0,08
Profundidad inyección	0,5 sobre 0,5 sobre 0,5 sobre 0,5 sobre contacto contacto contacto contacto		Contacto aluvial - marga	Contacto aluvial - marga				
Duración inyección (h)	8,0	4,0 3,5 3,0 3,5 5,0		5,0	2,5			
Volumen total inyectado (m3)	7,20	3,00	2,80	2,60	3,00		2,80	0,20
Observaciones							Extr. simultánea a inyección PS14I a 0,18 m3/h aprox.	Extracción en dos fases en el mismo día.
				EXTRACCIONES				
Fecha /hora extracción 1	21/04/2021 15:00	13/05/2021 9:00	27/05/2021 7:00	10/06/2021 11:30	17/06/2021 6:40	26/08/2021 7:40	22/09/2021 7:20	06/10/2021 7:00
Punto (s) extracción	PS14, PS14B, PS14C, PS14D,		PS14E	PS14E	PS14I	PS14E	PS14I	PS14D
Método de extracción	Neumático	Eléctrico	Eléctrico	Eléctrico	Eléctrico	Eléctrico	Eléctrico	Eléctrico
Profundidad aspiración	Fondo del piezómetro	0,5 m sobre contacto aluv marga	Fondo del piezómetro	Fondo del piezómetro	Fondo del piezómetro	Fondo del piezómetro	Fondo del piezómetro	Fondo del piezómetro
Q extracción (m3/h)	0,30	Escalonado a 1, 2 y 3 m3	3,00 3,00 3,00 - 4,50 Escalonado a 1, 3 4,50		4,50	4,50		
Volumen total extraído (m3)	6,52	6,00	9,00	24,00	37,00	12,63	15,26	38,38
Fecha /hora extracción 2	06/05/2021 10:45	14/05/2021 7:00					22/09/2021 12:30	







PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

Eventos	1	2	3	4	5	6	7	8
				INYECCIONES				
Punto (s) inyección	PS14B, PS14E, PS14I	PS5D	PS14E	PS14E	PS14I		PS14B, PS14J, PS14M	PS14D
Punto (s) extracción	PS14B, PS14D, PS14E, PS14I	PS5D					PS14B, PS14J, PS14M	
Método de extracción	Neumático	Eléctrico					Eléctrico	
Profundidad aspiración	Fondo del piezómetro	0,5 m sobre contacto aluv marga					Fondo del piezómetro	
Q extracción (m3/h)	0,30	Escalonado a 1, 2 y 3 m3					4,50	
Volumen total extraído (m3)	2,21	6,00					12,88	
Observaciones							Extracciones PS14B, J y M no simultáneas	Extracción en dos fases en el mismo día.







PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

#### 5.1.1.2 Resultados del tratamiento

Con los resultados de los eventos 1 a 8 de 2021 con inyección de surfactante en el entorno de los pozos PS14s se puede deducir que:

- En el evento de abril de 2021 es donde mayor concentración de COCs disueltos se obtuvo, alcanzando a las 8 h de la inyección valores de entre 600 mg/L y 1.000 mg/L de COCs en los pozos de inyección, y en PS14C valores de 1800 mg/L a las 8 h, que llegaban a los 2.400 mg/L a las 24 h (confirmando ese flujo preferente del fluido inyectado en la dirección PS14C). Estas concentraciones llegaban a ser dos órdenes de magnitud superiores a las iniciales en al agua del sondeo. La concentración de surfactante que llegó a PS14C fue de 12 g/L a las 8 h, bajando por adsorción a 7 g/L a las 24 h. La concentración de surfactante en los pozos de inyección era de 20 g/L hasta las 8 h y a 24 h se encontraron valores menores a los observados en PS14C valor (4.70 en PS14B, 2.04 en PS14E y 5.69 en PS14I).
- En el evento de 11 de Mayo de 2021 las concentraciones de COCs en PS5D (único pozo monitorizado) eran 136 mg/L a las 8 h (10 veces las iniciales), de 480 mg/L a las 24 h y de 730 mg/L al inicio de la extracción (a unas 48 h de la inyección), descendiendo notablemente esta concentración de COCs durante la extracción. La concentración de surfactante a las 24 h era de 5 g/L y a las 28 h de 7g/L. Esta concentración descendió notablemente durante la extracción, asociada a la adsorción de surfactante por el aluvial en el entorno del piezómetro.
- En el evento de 24 de mayo de 2021, donde se inyecta en PS14E, se obtuvo una concentración de COCs relativamente importante en el purgado (411 mg/L), pero muy baja durante la extracción. Hay que destacar que la extracción se realiza a las 65 h y no hay surfactante en la disolución extraída, lo que podría explicarse por una absorción/adsorción del surfactante inyectado en ese periodo entre inyección y extracción. Además, en este evento, la concentración de surfactante inyectada fue más baja que en resto de los eventos. Los fluidos extraídos se podían mandar a balsas
- En el evento de 7 de junio de 2021 se inyecta una disolución de surfactante en PS14E, a mayor caudal que en mayo, y se extrae a 71 h desde el inicio de la inyección. Ocurre algo similar a lo observado en el evento de 24 de mayo, siendo aún menores las concentraciones de COCs en el purgado y en la extracción. La concentración de surfactante en la extracción fue muy baja, lo que explica también las concentraciones tan bajas que se obtienen de COCs. Esta baja presencia de surfactante parece indicar que se ha dejado un tiempo excesivamente alto entre la inyección y extracción, con la adsorción/absorción de surfactante asociada. Los fluidos extraídos se podían mandar a balsas.
- En el evento de 14 de junio de 2021 se inyectó en PS14I, esperando 67 horas para la extracción. De nuevo, y al igual que lo que ocurría en las dos anteriores inyecciones, no hay surfactante en la disolución extraída, lo que podría explicarse los motivos indicados en el evento de 24 de mayo y 7 de junio.
- En agosto de 2021 se realizó un evento de extracción en PS14E sin adición previa de surfactante. En la fase acuosa extraída aparecían gotas de DNAPL. La concentración de esta fase en el volumen extraído era de unos 300 mg/L. La composición de esta fase incluía algo de surfactante, lo que confirmaba la absorción del surfactante inyectado en la zona por el DNAPL.
- En el evento de septiembre de 2021 la concentración de COCs era muy baja, mucho menor que la obtenida en abril del 2021 en esos pozos, a pesar de emplear la misma concentración de surfactante. Esto sugiere que la zona tiene ya menor fase residual, tanto como fase líquida como adsorbida en el aluvial.







PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

• En el evento de octubre de 2021 las concentraciones de surfactante en las muestras extraídas (16 horas tras el final de la inyección de surfactante) presentan una concentración de COCs baja, y también es baja la concentración de surfactante, confirmando de nuevo el efecto de la adsorción/absorción del surfactante en la fase densa libre o adsorbida y en el suelo del aluvial.



Figura 23. Fotografía de DNAPL decantado a 7-8 h de reposo tras bombeo en evento 4

# 5.1.1.3 Conclusiones del tratamiento

- En todos los eventos de inyección de trazador se encontró una razonable predicción de los perfiles de concentración de los fluidos inyectados con el modelo advectivo-dispersivo aplicado por INPROQUIMA, aunque hay anisotropía en la dirección del flujo y existe un flujo preferente hacia el pozo PS14C. Se confirma la alta dispersión del fluido por la alta permeabilidad del aluvial.
- En el evento de septiembre de 2021 se observa, al igual que ocurrió en noviembre de 2020, que al emplear caudales de inyección bajos se requiere un tiempo de entre 3 y 4 horas para la mezcla del fluido inyectado en la altura del aluvial. Esto sebe ser tenido en cuenta en los eventos futuros, para seleccionar el punto de inyección en la altura más conveniente o para modificar el caudal inyectado, si es necesaria una homogeneización rápida en toda la altura del aluvial.
- Existe una importante adsorción/absorción de surfactante en el suelo del aluvial y en la fase densa libre, respectivamente. Los perfiles de surfactante con el tiempo siempre son menores que los del trazador conservativo (bromuro), y esta diferencia se acentúa tras la parada de la inyección.
- La evolución de las concentraciones de COCs en la fase acuosa de los piezómetros de la zona de los pozos PS14x y de los espesores de fase en estos piezómetros parecen indicar que los eventos SEAR de 2020 (nov) y los realizados en 2021 pueden haber contribuido significativamente a la eliminación de una parte importante de la fase densa residual que quedaba en esta zona. Sin embargo, estos datos, aunque alentadores deben tomarse con precaución ya que esta zona de los PS14x se han realizado eventos de extracción muy continuados durante 2021. Deberá examinarse la evolución a lo largo de 2022 para







PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

confirmar la tendencia. De acuerdo con los datos obtenidos en 2021 se podría realizar algún evento adicional (en PS14D y PS14E) de inyección de surfactante en 2022, y sería interesante valorar la aplicación del tratamiento ISCO (In Situ Chemical Oxidation) en algunos pozos en 2022. Para esto último, se sugiere iniciar la inyección en los piezómetros PS14L, PS14M y PS14L. En un informe adicional se detalla la estrategia y simulación propuesta para la inyección en estos pozos.

# 5.1.2 Tratamiento *on site y* gestión de emulsiones con surfactante

Los caudales extraídos del acuífero en la etapa SEAR (y en la etapa S-ISCO si la extracción del fluido inyectado fuera necesaria, lo que es poco probable), no pueden enviarse a la depuradora y deben tratarse preferiblemente on site por alguna técnica que elimine los COCs y si es posible, recupere el surfactante.

Las técnicas seleccionadas, son la volatilización de COCs de la emulsión, tras alcalinización de ésta, mediante paso de una corriente de gas, retención posterior de los COCs arrastrados con la fase gas en un lecho de carbón activo y regeneración del carbón activo gastado para recuperar su capacidad de adsorción.

Una vez obtenidos en el laboratorio los datos termodinámicos y cinéticos necesarios, se ha diseñado la aplicación de estas técnicas en el emplazamiento con la colaboración de IMPROQUIMA.

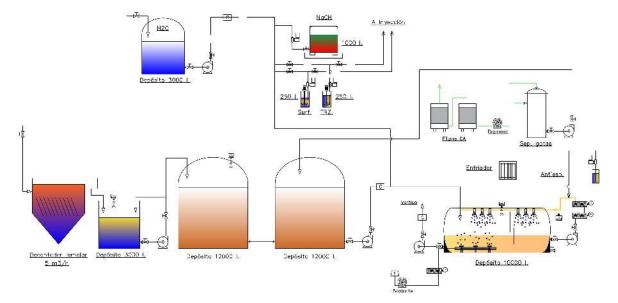


Figura 24. Esquema de la planta de tratamiento mediante hidrólisis alcalina (línea 1)

Para el tratamiento de las aguas bombeadas, se plantean dos líneas, que operan en paralelo:

## Línea 1

Trata los primeros volúmenes extraídos, con mayor concentración de COCs y surfactante. Volumen recogido máximo 6 m³. Volumen habitual 2-4 m³. Volumen mínimo 1 m³.







Para esta línea, y siguiendo las directrices marcadas por el Gobierno de Aragón, se propone un tratamiento por lotes, como el del esquema anterior¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. con los siguientes elementos:

- Decantación/acumulación del volumen extraído. Debe considerarse la recogida de lodos (arcillas, gravas) y DNAPL en forma de fase libre, por la parte inferior.
- Paso del sobrenadante a un primer tanque y de ahí a los tanques de almacenamiento.
- La emulsión almacenada en este tanque pasa al tanque de hidrólisis alcalina de HCHS y HeptaCHs a TCBs y TetraCBs, respectivamente. En este tanque se produce también la aireación. Los tiempos, condiciones y equipamiento necesario para esta etapa se describen en los siguientes puntos.
- La hidrólisis se logra añadiendo el volumen necesario de NaOH al 25% para que en el líquido en el tanque de aireación la concentración de NaOH sea de unos 3 g/L.
- La aireación se realiza mediante tres difusores de disco. La presión del compresor debe ser la suficiente
  para vencer la perdida de presión que genere el caudal de gas alimentado en cada difusor. Para evitar
  el ensuciamiento conviene realizar alguna etapa de lavado periódicamente o de inyección de gas una
  vez vaciado el depósito.
- La temperatura en el tanque de aireación se logra mediante un intercambiador de calor externo. La temperatura debe estar entre 40-60°C. A este cambiador de calor se le alimenta la disolución del tanque de aireación, que se devuelve al tanque por medio de aspersores que generan gotas para romper las espumas. Si es necesario se puede añadir un antiespumante.
- El gas húmedo que sale del tanque de aireación pasa por un enfriador y llega a un separador de gotas. El líquido recogido en la parte inferior se devuelve al tanque de almacenamiento. El gas frío se envía a dos lechos de carbón activo en serie. Para ello se emplea una bomba que debe tener una potencia adecuada para que el caudal de gas alimentado supere la pérdida de presión en el lecho de CA. Si la presión del gas que llega al separador de gotas fuera más elevada de la requerida para vencer la presión en estos lechos, se puede colocar un depresor sustituyendo a la bomba de impulsión del gas hacia los lechos de carbón activo.
- Se debe medir periódicamente los COCs a la salida del primer y segundo lecho de CA para cambiar el primer lecho cuando se observen valores que superan los máximos establecidos.
- Durante la aireación a temperatura se pueden producir sólidos en el tanque de aireación, debidos a la rotura de la emulsión y precipitación del surfactante. Periódicamente, deben recogerse los precipitados por la parte inferior.
- Tras cada lote, la fase acuosa que queda en el tanque de aireación se debe sacar para su vertido o gestión. Este líquido es fundamentalmente agua a pH 12 y puede ser reinyectado en alguna zona de la celda, para llevar a cabo la hidrólisis de HCHs y HepatCHs en el subsuelo. Si quedase surfactante, esta inyección se podría acompañar de adición de oxidante para llevar a cabo un proceso S-ISCO. Si esto no fuera posible, esta fase acuosa se enviaría a balsas.

#### Línea 2

Esta línea trataría los volúmenes de agua subterránea obtenidos tras la primera extracción (más concentrada en COCs). Este segundo volumen extraído tiene menor concentración de COCs y Surfactantes.

Para esta línea se propone:







PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

• Decantación del volumen extraído en decantador lamerar para eliminar sólidos (arcillas fundamentalmente). El sobrenadante, se puede mandar a balsas directamente si la concentración de COCs es la habitual en el el subsuelo en ausencia de surfactante. Si la concentración de COCs fueran más elevadas se podría añadir álcali (concentración final 3 g/L), esperar unas 6 h en recirculación y esta fase acuosa alcalina puede inyectarse de nuevo en el subsuelo, para mejorar la hidrólisis de HCHs y HeptaCHs o como parte del tratamiento ISCO, añadiendo oxidante (persulfato sódico).

La planta de tratamiento se ubicará en las parcelas al pie del vertedero y tendrá los siguientes elementos básicos:

## Recepción, mezcla y dosificación

- 2 depósitos de recepción de 12 m3.
- 1 tanque postdecantador de 3 m3
- 1 tanque de agua potable de 3 m3
- 1 depósito IBC de 1 m3 para dosificación de sosa con cubeto de retención
- 2 depósitos de 250 l para mezcla y dosificación de surfactantes, trazadores u oxidantes

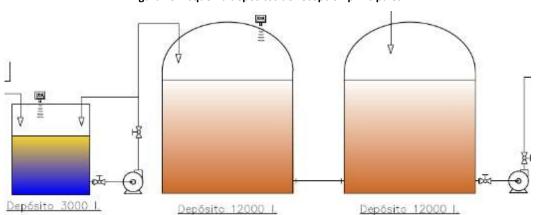
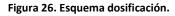
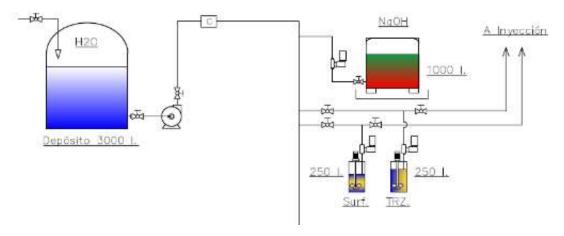


Figura 25. Esquema depósitos de recepción principales.











PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

#### Tratamiento de emulsiones (Hidrólisis alcalina y aireación)

• 1 depósito de PEAD compartimentado de 10 m³ horizontal para hidrólisis con sistemas de aireación y de rotura de espumas. La compartimentación permitirá el paso de las espumas para facilitar su rotura.

El reactor irá equipado con dos resistencias eléctricas para calentar el agua. El sistema de calefacción de agua recirculará el fluido a través del sistema de rotura de espumas.

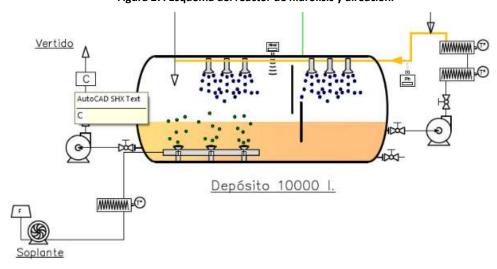


Figura 27. Esquema del reactor de hidrólisis y aireación.

# Tratamiento de gases

- 2 filtros de CA de 200 l en acero inoxidable
- 1 Separador de gotas 500 l con sondas de nivel y bomba de transferencia
- 1 Depresor de canal lateral

La instalación se realizará de tal manera que se prevea la colocación de sistemas de enfriamiento del aire para favorecer la condensación de la humedad de la línea de gases.

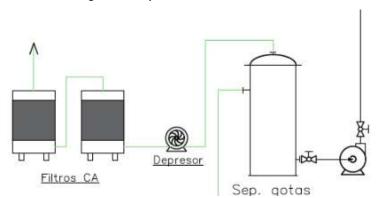


Figura 28 . Esquema filtros carbón activado.

Otros elementos de la instalación:

- 2 agitadores mezclador para depósitos dosificadores de 250 l
- 1 bomba de recirculación







- 2 bombas para suministro de reactivos
- 1 bomba dosificadora para NaOH
- 1 bomba para entrada de hidrólisis
- - 1 bomba de recirculación para hidrolisis
- - 1 soplante para aireación
- 1 depresor de canal lateral para filtros de CA
- 2 resistencias (12 kW cada una)
- - 5 sondas radar
- 4 caudalímetros electromagnéticos
- 2 sondas pH
- - Cuadro de control del sistema con pantalla

## 5.1.3 Simulación de ensayos ISCO

En el tratamiento ISCO (*In Situ Chemical Oxidation*), se inyectan un oxidante y un activador (o catalizador) en el subsuelo a una profundidad donde puede entrar en contacto con la zona contaminada. En la bibliografía se han estudiado el reactivo Fenton (F), el persulfato activado (AP) y el permanganato (PM) para la oxidación del HCH en el suelo. Usman estudió el tratamiento de suelos contaminados con isómeros de HCH con varios oxidantes en ensayos en discontinuo. El oxidante menos eficiente fue el PM y se obtuvieron resultados similares en suelos reales con F y AP (activado por hierro en este estudio). Sin embargo, el peróxido de hidrógeno mostró un alto consumo improductivo por parte del suelo, como también se observó en otros trabajos con suelos con una elevada composición en carbonatos.

Por el contrario, el persulfato de sodio (PS) presenta una alta solubilidad acuosa, una alta estabilidad en el suelo y, por tanto, una vida más larga en el subsuelo que el peróxido de hidrógeno. Es relativamente barato y genera productos finales benignos. Puede activarse con un complejo de metal de transición (generalmente Fe(II)), utilizando luz o calor, añadiendo peróxido de hidrógeno o utilizando un álcali (pH>10). Peng et al. estudiaron la remediación de un suelo contaminado con  $\gamma$ -HCH utilizando AP por hierro, calor y álcali. Encontraron que el persulfato activado por calor era eficaz para la remediación del  $\gamma$ -HCH, logrando una degradación completa en 21 días a 40°C. También los estudios de PS activado por álcali de Domínguez y col. encontraron que la activación térmica del PS era efectiva en la eliminación de HCHs. Sin embargo, la activación térmica no es factible cuando la contaminación se encuentra a gran profundidad bajo el nivel del suelo. Por otra parte, el pH neutro y el alto contenido de bicarbonato de las aguas subterráneas en el entorno del vertedero Sardas desaconsejan el uso del hierro como activador del PS.

La activación con álcali del PS produce que el  $\gamma$ -HCH sufra una rápida hidrólisis alcalina a triclorobencenos, que se oxidan después por el persulfato. Este método resultó eficaz para la reducción de HCH en aguas subterráneas reales procedentes de los vertederos de Sabiñánigo contaminados con compuestos orgánicos







clorados procedentes de residuos de lindano. Cabe destacar la rápida reacción de deshidrocloración de los HCH a triclorobencenos (TCB) a pH>12 que encontraron estos autores, compuestos que son menos tóxicos que el HCH y reaccionan más fácilmente con el radical hidroxilo.

En otro trabajo previo de INPROQUIMA se encontró que el penacho de contaminación del agua subterránea es causado por el suelo altamente contaminado en el aluvial en contacto con el agua subterránea. Se encontraron los mismos compuestos orgánicos clorados (COC) en el suelo y en las aguas subterráneas. Consistían en una mezcla de 28 COCs desde el clorobenceno hasta el heptaclorociclohexano que también se identificaron en el DNAPL del vertedero de Sardas.

En un trabajo anterior se comprobó que los COCs atrapados o adsorbidos en el suelo están en equilibrio con los COCs en la fase acuosa y se determinaron los coeficientes de partición entre fases en condiciones neutras y alcalinas. Si la contaminación del suelo permanece, el penacho de contaminación persistirá en el agua subterránea, con el riesgo para las aguas superficiales circundantes. INPROQUIMA ha estudiado la efectividad de la Oxidación Química In Situ (ISCO) con persulfato activado por álcali en la eliminación de COCs en suelo del aluvial del Gállego en las parcelas al pie del vertedero de Sardas, situado a una profundidad de 12-15 m.b.g.l.

INPROQUIMA ha determinado el modelo cinético de la velocidad de oxidación de COCs en el suelo y en las fases acuosas, incluyendo los fenómenos de transporte entre fases. Este tipo de análisis, que incluye la oxidación de los contaminantes en ambas fases, ha sido escasamente descrito en la literatura. El modelo desarrollado permite predecir los perfiles de cada compuesto clorado COC en el suelo y en el agua subterránea en equilibrio con éste, a lo largo del tiempo, en las diferentes condiciones de adición de agente oxidante (persulfato activado por álcali).

#### 5.1.3.1 Hipótesis de partida

En este caso, se consideran las siguientes hipótesis iniciales:

- Los modelos cinéticos para la oxidación de COCs en condiciones alcalinas, tanto en la fase suelo como en la fase acuosa, son los desarrollados por INPROQUIMA.
- La relación estequiométrica de moles de PS por mol de COCs eliminado es aproximadamente 12
- Las inyecciones se hacen a un caudal tal que se puede asumir una concentración homogénea de los reactivos inyectados en la altura del aluvial
- La composición de partida promedio para el suelo del aluvial en el pozo PS14x es de unos 1.25 mmol/kg (266 mg/kg a pH=7). Esta composición es razonable tras los lavados del aluvial en la zona de los pozos PS14x durante los ensayos y tratamientos SEAR de 2020 y 2021.
- Se asume que se ha inyectado un frente alcalino antes de la inyección de PS y álcali. Las transformaciones de COCs por la alcalinización del medio y la proporción de compuestos resultantes se muestran en la Figura 29.
- La composición del suelo antes y después de su alcalinización del suelo se resume en la ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..







PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

- Existe una fuerte dispersión de los fluidos inyectados, que se modela mediante un flujo advectivo dispersivo, con parámetros determinados por INPROQUIMA.
- No se considera extracción de los fluidos inyectados, considerando que la inyección se dispersa radialmente en la dirección x del aluvial. Se ha considerado como ejemplo inyección en PS14M.
- No se considera que haya fase residual en forma líquida en el entorno del piezómetro. Se considera que todo el DNAPL está adsorbido en el aluvial. En el punto de inyección se considera una concentración promedio de DNAPL adsorbido con la altura en el aluvial.

Figura 29. Hidrólisis alcalina sómero HCH y pentaciclohexenos (PentaCX) a triclorobencenos (TCBs)

PentaCX

Figura 30. Hidrólisis isómeros (HeptaCH) y hexaciclohexenos (HexaCX) a (TetraCBs)

Tabla 29. Fracciones másicas del DNAPL del suelo del aluvial de Sardas antes y después de alcalinizar.

			w	e
Compuesto j	Acrónimo	Mj	pH 8	pH > 12
Chlorobenzene	СВ	112	0.108	0.149
1,3-Dichlorobenzene	1,3 DCB	146	0.007	0.010
1,4-Dichlorobenzene	1,4 DCB	146	0.086	0.119
1,2-Dichlorobenzene	1,2 DCB	146	0.093	0.129
1,3,5 Trichlorobenzene	1,3,5 TCB	180	0.000	0.009
1,2,4 Trichlorobenzene	1,2,4 TCB	180	0.006	0.379
1,2,3 Trichlorobenzene	1,2,3 TCB	180	0.001	0.059
1,2,4,5-Tetrachlorobenzene+1,2,3,5-Tetrachlorobenzene	TetraCB (1,2,4,5+1,2,3,5)	214	0.010	0.065
1,2,3,4-Tetrachlorobenzene	TetraCB (1,2,3,4)	214	0.022	0.081
g-Pentachlorocyclohexene	g-PentaCX	252	0.014	0.000
1,2,3,4,5 Pentachlorobenzene	PentaCB	248	0.002	0.002
δ-Pentachlorocyclohexene	δ-PentaCX	252	0.015	0.000



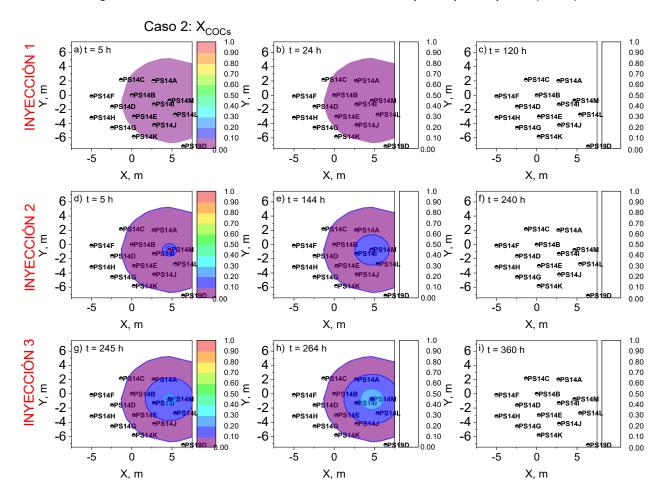




PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

			w	е
Compuesto j	Acrónimo	Mj	pH 8	pH > 12
θ-Pentachlorocyclohexene	θ-PentaCX	252	0.001	0.000
Hexachlorocyclohexene	HexaCX-a	289	0.005	0.000
β-Pentachlorocyclohexene	β-PentaCX	252	0.002	0.000
η-Pentachlorocyclohexene	η-PentaCX	252	0.001	0.000
Hexachlorocyclohexene	HexaCX-b	286	0.002	0.000
Hexachlorocyclohexene	HexaCX-c	286	0.007	0.000
a-Hexachlorocyclohexane	α-HCH	291	0.054	0.000
Hexachlorocyclohexene	HexaCX-d	286	0.000	0.000
β-hexachlorocyclohexane	β-нсн	291	0.001	0.000
g-Hexachlorocyclohexane (Lindane)	ү-НСН	291	0.303	0.000
Heptachlorocyclohexane	HeptaCH-1	322	0.088	0.000
δ-Hexachlorocyclohexane	δ-НСН	291	0.093	0.000
e-Hexachlorocyclohexane	ε-HCH	291	0.023	0.000
Heptachlorocyclohexane	HeptaCH-2	322	0.038	0.000
Heptachlorocyclohexane	HeptaCH-3	322	0.018	0.000

Figura 31. Conversión COCs suelo en caso 2 en tres eventos de inyección y dist. inyección (PS14M)









#### 5.1.3.2 Conclusiones y Recomendaciones

La remediación de muestras de suelo del aluvial de Sardas, con presencia de residuos líquidos procedentes de la producción de lindano que contenían clorobencenos, HCHs y HeptaCHs, se realizó con éxito utilizando persulfato activado por álcali en microcosmos de laboratorio. No se encontraron otros compuestos orgánicos clorados o aromáticos como subproductos de la oxidación y el persulfato fue estable en el suelo durante el intervalo de tiempo estudiado. Esto hace que el tratamiento sea adecuado para una aplicación ISCO a escala de campo.

Se ha encontrado que los contaminantes clorados en el suelo se comportan como un DNAPL que se elimina continuamente por oxidación tanto en la fase acuosa como en la del suelo. La adición del álcali (pH>12) dio lugar a la rápida deshidrocloración de HCHs y HeptaCHs a TCBs y tetraCBs, respectivamente, y estas reacciones se produjeron tanto en la fase acuosa como en la del suelo a pH>12. El modelo cinético propuesto y validado tiene en cuenta las tasas de oxidación en ambas fases y el transporte de contaminantes entre ellas.

El alto contenido en arcillas embebidas en el aluvial, y su alta superficie asociada, es la causa de que haya una importante masa de COCs adsorbidos en algunas litologías del aluvial. Hasta que no se eliminen estos COCs adsorbidos habrá repuntes de COCs en la fase acuosa, ya que existe un equilibrio entre los COCs adsorbidos y los COCs disueltos. Se ha comprobado por INPROQUIMA que estos COCs adsorbidos pueden ser directamente oxidados en la fase suelo, sin tener que ser solubilizados primero. Por ello, es posible plantear el tratamiento ISCO para eliminar los COCs adsorbidos en el aluvial. La eliminación de los COCs adsorbidos evitaría futuros repuntes en la fase acuosa. Los repuntes se producirían si todavía quedase fase residual líquida (no adsorbida) en el contacto con la marga, ya que el oxidante no puede difundirse hacia el interior de la fase densa cuando ésta está presente como un líquido orgánico.

Previo a la inyección del oxidante (PS y NaOH en una relación molar 1:1) debería inyectarse un frente alcalino con una concentración de NaOH entre 4 y 6 g/L en la zona del aluvial considerada. El tiempo para lograr la hidrólisis alcalina de los compuestos adsorbidos en el suelo se estima en unas 10 h.

Tras el frente alcalino se puede inyectar el sistema oxidante en aquellos pozos donde ya no exista DNAPL en el contacto con la marga, y preferentemente donde el flujo natural sea de ese pozo hacia abajo. Se ha seleccionado como ejemplo el pozo PS14M.

Los fluidos inyectados sufren una importante dispersión, por la alta permeabilidad del aluvial. El modelo desarrollado por INPROQUIMA integra los fenómenos de flujo advectivo, dispersivo y la reacción química, siendo un modelo de flujo de transporte reactivo en el subsuelo que permite predecir de manera aproximada el radio de influencia de la inyección y el campo de propiedades en el radio de influencia (concentración de COCs en el aluvial con el tiempo y condiciones y número de las inyecciones, así como la masa de COCS eliminada con una masa de PS). Este modelo se puede emplear para optimizar los puntos de inyección, los tiempos entre inyecciones y las concentraciones de las especies inyectadas.







# 5.2. TRATAMIENTO EN MEDIOS DE BAJA PERMEABILIDAD, TÉCNICAS ELECTROCINÉTICAS

De acuerdo con el modelo conceptual del emplazamiento y con los datos históricos disponibles, aguas abajo del vertedero de Sardas, es decir, en las parcelas al pie del vertedero, existe una formación limosa cuaternaria que fosiliza al acuífero aluvial y en algunas zonas a la propia formación margosa. El techo de estos materiales limosos constituía la superficie original del terreno previa a la existencia del vertedero y durante la explotación del mismo (ver Figura 32. Fotografía previa a la construcción de la variante de la N-330).

Figura 32. Fotografía previa a la construcción de la variante de la N-330

Durante la construcción de la variante de Sabiñánigo de la N-330, en las parcelas al pie del vertedero esta superficie original del terreno fue rellenada con unos 50.000 m³ de materiales del propio vertedero.

El desagüe natural de la antigua cárcava que fue empleada como vaso de vertido ha discurrido sobre esta formación limosa. Asimismo, la antigua balsa del pie del vertedero (ver fotografía) se situaba sobre los limos cuaternarios. Esta formación posee un espesor de unos 8-10 m en las zonas más próximas al vertedero y 3-4 m junto al embalse, y a través de ella ha percolado la fase libre densa organoclorada quedando fuertemente impactada, bien desde el mencionado desagüe natural, bien desde la antigua balsa del pie del vertedero.

En las primeras investigaciones realizadas por EMGRISA, los muestreos de suelos realizados ya señalaban esta posibilidad (ver figura adjunta) y recientemente, durante la perforación de los sondeos denominados 14x ha quedado mejor documentada la afección en los limos, si bien es cierto que es necesario acotarla con mayor precisión.

Por tanto, la formación limosa constituye un foco secundario de afección al acuífero aluvial que será necesario descontaminar, para que el este no sufra aportes de afección de los limos y eventuales tratamientos en el aluvial sean efectivos.

Hay que destacar que las técnicas de tratamiento aplicables en el acuífero aluvial con k del orden de  $10^2$  m/d), no son aplicables en la formación limosa, con k del orden de  $10^{-2}$  m/d. La profundidad y potencia de este nivel limoso impiden que tratamientos que contemplen la excavación de los limos impactados sean viables,







PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

por lo que las técnicas de electrorremediación se imponen como candidatas a ser aplicadas en el emplazamiento.

Ya en el servicio de seguimiento de 2019 se comenzó el estudio a nivel de laboratorio de la aplicación de técnicas electrocinéticas con la participación de la UCLM. Estudio que ha continuado en 2020.

El trabajo de investigación principal en el tratamiento de suelos mediante técnicas electrócinéticas llevada a cabo en este Servicio viene siendo realizado por Laboratorio de Ingeniería Electroquímica y Ambiental (Electrochemical & Environmental Engineering Lab E3L) de la Universidad de Castilla la Mancha. Su trabajo queda resumido en los apartados siguientes. En el Anexo 2. Validación y diseño de técnicas electrocinéticas para la remediación de los limos del aluvial al pie del vertedero de Sardas (TEQUIMA UCLM), al final de esta Memoria, se incluye su informe completo para más detalle.

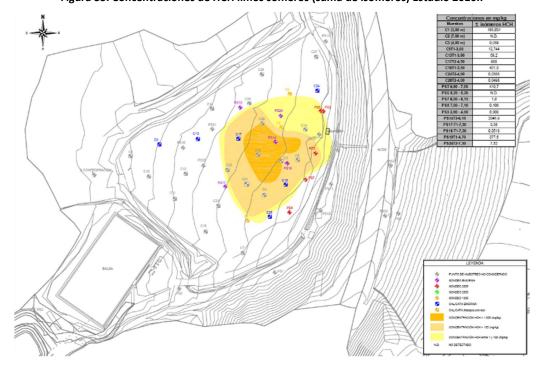


Figura 33. Concentraciones de HCH limos someros (suma de isómeros) Estudio 2010..

A la vista de esta situación, a continuación se describe de forma sucinta en qué consisten las técnicas de remediación electrocinéticas, cuáles son las líneas de investigación que se están siguiendo para la valoración de estas técnicas. Las líneas de investigación se dividen en dos vertientes:

- Ensayos de laboratorio
  - Sobre suelos reales
  - Sobre maquetas de suelos
- Diseño de ensayos in situ

En los apartados sucesivos se describen de forma general en qué consisten las técnicas electrocinéticas de remediación y se detallan los resultados de los ensayos sobre suelos reales ejecutados en colaboración con







el Laboratorio de Ingeniería Electroquímica y Ambiental (Electrochemical & Environmental Engineering Lab E3L) de la Universidad de Castilla la Mancha.

Durante el servicio de seguimiento de Sardas en 2021 se han realizado diversos ensayos de laboratorio sobre distintas matrices, suelos reales obtenidos mediante la toma de testigos inalterados de sondeos en los limos más impactados de la parcela al pie del vertedero de Sardas o suelos formados (contaminados) artificialmente.

## 5.2.1 Descripción de técnicas electrocinéticas de tratamiento de suelos

La aplicación de un campo eléctrico entre electrodos posicionados en un limo produce simultáneamente muchos procesos de diferente naturaleza, en los que el efecto final depende de la interacción entre los mismos y es difícil de predecir sin la realización de pruebas experimentales a diferentes escalas. De hecho, incluso con experimentación hay cierta incertidumbre, dado que los resultados se ven enormemente influenciados por el tamaño de las instalaciones experimentales en las que se realizan los ensayos, como consecuencia de las grandes interacciones entre los procesos inducidos y de la importancia diferenciada de las magnitudes espaciales en el desarrollo de estos procesos, al involucrar el transporte de especies en un medio no mezclado. Destacan dos de estos tipos de procesos de transporte de especies: los procesos electrocinéticos y los procesos de desorción térmica.

En cuanto a los primeros, como consecuencia del campo eléctrico generado, se facilitará el movimiento de todas las especies cargadas eléctricamente (iones y coloides cargados), así como el del agua que empapa el limo. Se trata de un proceso electrostático de atracción-repulsión entre cargas eléctricas motivado porque uno de los electrodos se carga positivamente (ánodo) y otro negativamente (cátodo). El sentido de este movimiento dependerá de la carga de los iones y del potencial z de las partículas del limo. Los iones y partículas cargados negativamente se desplazarán hacia el ánodo y el agua, normalmente, también, dado que el potencial z del limo suele ser negativo, motivando una carga positiva en la doble capa de agua que rodea a cada una de sus partículas, que favorece esta dirección de movimiento. A la suma de todos estos procesos se les conoce como procesos de movilidad inducida por campo eléctrico o electrocinéticos. Es importante tener en cuenta que este movimiento puede ser complementario al generado por el flujo hidráulico, dependiente la magnitud de este último de la permeabilidad del limo y de los gradientes de presión existentes. En este contexto, puede generar efectos complementarios que pueden afectar positiva o negativamente a la descontaminación del limo, y que por lo tanto hay que considerar seriamente a la hora de diseñar un proceso real de descontaminación

Los principales parámetros manipulables que afectan a este grupo de procesos son la magnitud del campo eléctrico aplicado entre electrodos (V/m) y la naturaleza del fluido de lavado que se utilice, es decir de la disolución que se añada para evitar que el sistema se seque en las proximidades de uno de los electrodos (normalmente el ánodo) debido al transporte de agua entre electrodos, y que puede ser utilizada para arrastrar los contaminantes. Es también importante el tipo de electrodos utilizados, dado que no son inertes. De esta forma, en la superficie de estos ocurren procesos de oxidación (ánodos) y reducción (cátodos) de diferente naturaleza y que originan.







- Frentes ácidos que se mueven en la dirección ánodo-cátodo y básicos que se mueven en la dirección cátodo-ánodo. Estos frentes ácidos afectan de modo importante a las propiedades del limo, modificando su capacidad de fijación o liberación de especies contaminantes
- Especies oxidantes tales como el cloro/hipoclorito (en el caso de que el limo contenga cantidades significativas de cloruros) o el agua oxigenada, que en caso de existir hierro puede originar procesos
   Fenton. Estas especies pueden dar lugar a una reactividad inducida en el limo cuyos efectos es preciso valorar.

Muchos HCH son apolares, pero puede ser fácilmente convertidos en micelas mediante la interacción con disoluciones de lavado que contengan surfactantes iónicos. Datos de movilidad de HCH a nivel de muestras sintéticas han sido obtenidos previamente, pero se ha constatado que la matriz es de gran importancia y que distintas matrices dan lugar a resultados diferentes cuando se aplica el mismo tipo de tratamiento (Munoz-Morales, M., Braojos, M., Saez, C., Canizares, P., Rodrigo, M.A., 2017. Remediation of soils polluted with lindane using surfactant-aided soil washing and electrochemical oxidation. Journal of Hazardous Materials 339, 232-238; Munoz-Morales, M., Saez, C., Canizares, P., Rodrigo, M.A., 2019. Enhanced electrolytic treatment for the removal of clopyralid and lindane. Chemosphere 234, 132-138; J. Vidal, M. Carvela, C. Saez, P. Cañizares, V. Navarro, R. Salazar, M.A. Rodrigo Testing Different Strategies for the Remediation of Soils Polluted with Lindane. Chemical Engineering Journal DOI: 10.1016/j.cej.2019.122674)

Los procesos de desorción térmica tienen una naturaleza completamente diferente, aunque también dependen del campo eléctrico aplicado. Cualquier proceso eléctrico da lugar a la generación de calor como consecuencia de la resistencia eléctrica del medio que tiene que atravesar la corriente eléctrica e iónica. Este calor genera un aumento de la temperatura que afecta no solo al agua contenida en el limo sino también a las especies volátiles y semivolátiles que estén contenidas, permitiendo su movilidad en fase gaseosa. Obviamente, es preciso canalizar el movimiento de este gas si se quiere evitar su dispersión en la atmósfera y la generación asociada de problemas de contaminación difusa. Las resistencias que opone un limo son tanto mayores cuanto mayor es la distancia entre electrodos, ya que estas resistencias son directamente proporcionales a esta distancia. Esto implica que los resultados predichos por experimentos realizados en pequeña escala han de ser valorados con mucha cautela, porque a gran escala este tipo de procesos se convierte en el que controla el proceso completo de descontaminación en tanto que a pequeña escala su magnitud parece despreciable. La presión de vapor de los distintos HCH varía con la temperatura de modo importante. Esto supone que su volatilización y arrastre por corriente de vapor de agua generada por calentamiento puede ser muy importante y por tanto un mecanismo que no solo no ha de ser despreciado, sino potenciado para conseguir una eficiente descontaminación del limo. El efecto del calentamiento del suelo puede ser aumentado como consecuencia del arrastre de contaminantes (deabsorción o stripping) inducido por la aplicación de presiones positivas con aire de arrastre o negativas por succión. Datos sobre tratamiento de gases han sido evaluados con anterioridad

#### 5.2.2 Ensayos de tratamiento electrocinético (UCLM)

El objetivo principal de este trabajo es determinar las condiciones en las que los tratamientos asistidos electroquímicamente son viables para la remediación de los limos del aluvial al pie del vertedero de Sardas





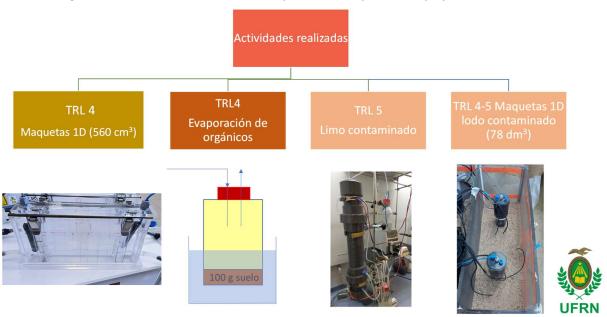


(Sabiñánigo, Huesca), que están contaminados con HCH y otros compuestos organoclorados. Para alcanzar este objetivo global, se han programa actuaciones a cuatro niveles (esquematizados en la Figura 34) y que pretenden dar respuesta a los objetivos parciales planteados:

- conocer la movilidad de contaminantes y especies de interés en los limos en condiciones perfectamente controladas, utilizando un soporte limpio
- conocer la movilidad en contaminantes y especies de interés en limo real
- establecer si hay transferencia de contaminantes desde el limo contaminado hasta la atmósfera

La cuarta actuación, que se ha realizado al amparo de una colaboración con investigadores de la Universidad Rio Grande do Norte (Brasil), no estaba comprometida en el contrato de colaboración firmado con EMGRISA, pero se ha tenido a bien incluirla en este informe dado la importancia de los resultados obtenidos para el desarrollo de esta investigación. En esta actuación no se ha utilizado limo sino lodos de la balsa.

Figura 34. Actuaciones realizadas durante el primer año de ejecución del proyecto "electro".



A continuación, se aportan más detalles sobre cada uno de estos objetivos y sobre las actuaciones desarrolladas para alcanzarlos:

**Objetivo 1.** Evaluar la movilidad de contaminantes en condiciones controladas (TRL4). Se trata de utilizar una matriz de limo "limpia" y de evaluar cómo se mueven las distintas especies de interés para determinar los valores de coeficientes de difusión y velocidades de arrastre en el seno de un campo eléctrico. Se propone la realización de ensayos de movilidad en condiciones controladas con las que poder determinar la magnitud de los flujos por electroósmosis del agua contenida en el suelo y de los fluidos de lavado adicionados durante el tratamiento, así como de los flujos de electromigración y electroforesis de las distintas especies orgánicas e inorgánicas presentes en el suelo. Como especies de interés se seleccionaron:

HCH y derivados







- Nutrientes (nitratos y fosfatos)
- Lactato
- Oxidantes (permanganato, peroxosulfato).

Los ensayos se llevan a cabo en maquetas cerradas en condiciones controladas, con el fin de determinar en unas condiciones más puras los valores los coeficientes de difusión y velocidades de arrastre. Las maquetas empleadas consisten en una caja de metacrilato completamente hermética, divididas en 3 compartimentos. Los compartimentos de los extremos corresponden con los pozos de electrolito, donde se albergan los electrodos, ánodo y cátodo, y el fluido de lavado. En la parte central de la maqueta se coloca el suelo y en el centro de esta se introduce la porción de los compuestos de interés acordados. Además, esta maqueta consta de un sistema de extracción y captación de los gases generados en el proceso de remediación electrocinética. Los gases son conducidos hacia una columna de carbón activo mediante la introducción de aire en forma de pulsos por el extremo opuesto con una frecuencia determinada.

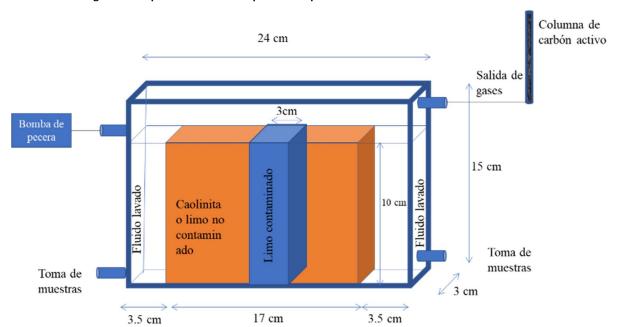


Figura 35. Esquema instalación experimental para el estudio de movilidad de contaminantes

**Objetivo 2.** Evaluar la movilidad de contaminantes en limo real (TRL 5). Se trata de conocer, con un nivel de detalle superior, cómo interaccionan los diferentes procesos que se inducen cuando se aplican campos eléctricos al limo del emplazamiento, para lo que hay parámetros que toman una mayor relevancia que cuando los procesos tratan de ser aislados y que se detallarán en el apartado de resultados correspondiente.

Estos ensayos se llevan a cabo en el sistema experimental mostrado en la Figura 36, Para ello, las muestras fueron tomadas directamente en tubos de PVC normalizados de 9 cm de diámetro y con una longitud de entre 40-50 cm. De esta forma, utilizando accesorios de PVC estándar disponibles en el mercado, se construyó un sistema tubular cerrado que garantice la estanqueidad del sistema experimental. Los electrodos con forma de cilíndrica se sitúan en los extremos del cilindro, así como la entrada y salida del fluido de lavado. Además, en la parte alta del dispositivo se dispone de salida para la evacuación de los gases generados durante el tratamiento.

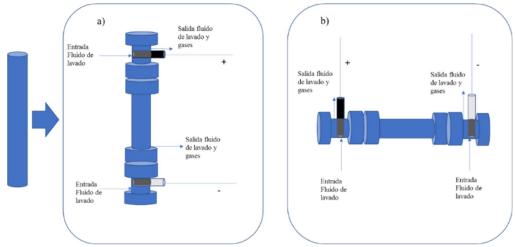






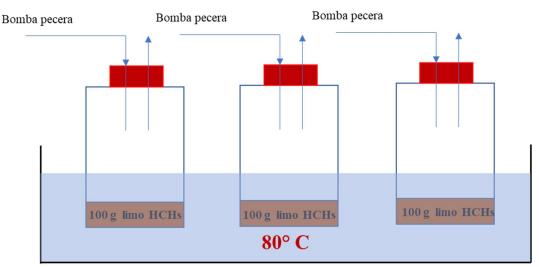
PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

Figura 36. Dispositivo experimental para ensayos electrorrem. disposición a) vertical; b) horizontal



**Objetivo 3:** evaluar la importancia que puede tener la volatilización de contaminantes cuando se opera a elevadas temperaturas, para lo que se evalúa en condiciones de temperatura controladas la velocidad de volatilización de los distintos contaminantes contenidos en el suelo real. En la Figura 37 se esquematiza la instalación empleada, consistente en un baño termostatizado, en el que se introducen recipientes cerrados que contienen el suelo. En la tapa se realiza una abertura para la entrada de un caudal de aire conocido, y una tubuladura de salida por donde salen los gases que se recogen en lecho de carbón activado (estos se recogían en hexano y acetato). Los compuestos volatilizados se miden en la fase gas antes y a la salida del lecho. Al finalizar el ensayo también se determina la cantidad de compuesto retenido en el lecho de adsorción. Para los estudios se han utilizado muestras reales de limo contaminado por lo que el TRL de esta actuación es de 5.

Figura 37. Esquema de la instalación empleada para el estudio de volatilización.



**Objetivo 4.** Validación de resultados de movilidad de contaminantes en limo a partir de muestras de lodos. Para alcanzar este objetivo, se ha comprobado la movilidad de los mismos contaminantes contenidos en una







matriz de lodo, cuando estos contaminantes interaccionan con el limo. Este estudio no estaba contratado y se ha realizado en colaboración con la Universidad Federal de Rio Grande do Norte. Dado que las conclusiones alcanzadas son relevantes para el proyecto se valoró como importante incluirlos también en el informe.

## Evaluación de la movilidad de especies oxidantes y nutrientes

Tal y como se ha detallado anteriormente se ha estudiado la movilidad de distintas especies, que se seleccionaron en base a su interés en el proceso de remediación:

- nitratos y fosfatos, por ser los nutrientes que habría que proporcionar a los microorganismos durante proceso de electrobiorremediación;
- lactato, por ser la fuente de carbono que habría que proporcionar a los microorganismos durante proceso de electrobiorremediación; y
- permanganato y peroxosulfato, como posibles agentes oxidantes a añadir al suelo para promover la degradación de las especies contaminantes.

A continuación, se detallan los principales resultados y conclusiones extraídas en estos ensayos.

En base a estos resultados se concluye que el permanganato no es un oxidante adecuado para su empleo en procesos de remediación de este tipo de suelos, ya que se reduce rápidamente y genera un compuesto poco oxidante y de muy baja movilidad.

En general, se puede concluir que el lactato se puede movilizar fácilmente dentro del seno de un campo eléctrico en suelos limosos, y que podría ser empleado como fuente de carbono en procesos de electrobiorremediación.

Como se puede observar, y tal y como se puede esperar dado su carácter aniónico, el persulfato se mueve principalmente por electromigración hacia el ánodo. Las cantidades detectadas no son elevadas y parecen depender de la temperatura de trabajo. En este punto, se debe resaltar que el persulfato es un compuesto muy oxidante y que puede reaccionar rápidamente con algunas de las especies presentes en el suelo dando lugar a la formación de sulfato como producto de reducción. De hecho, tal y como se ha mostrado anteriormente, en estos ensayos la cantidad de iones sulfato movilizados hacia el ánodo ha sido significativamente superior al de otros ensayos. el perfil de concentración está claramente desplazado hacia el ánodo, y es significativamente inferior en el ensayo realizado a temperatura ambiente.

Para la interpretación de los resultados obtenidos, los resultados del análisis de componente en el suelo al finalizar los ensayos (post-mortem) se han ajustado a un modelo fenomenológico descrito en el ANEXO 2 de esta Memoria, especialmente desarrollado para evaluar propiedades de transporte en sistemas experimentales estudiados, en los que se trata de ver la dispersión de especies a partir de su introducción en un punto central del limo. Tras el ajuste de los datos experimentales al modelo, se incluyen, en la Tabla 30. Valores de la velocidad y la difusividad efectivas de las especies evaluadas, los valores de la velocidad efectiva (u<sub>eff</sub>, m d<sup>-1</sup>), que está relacionada con el arrastre de la especie i por flujos electrocinéticos (incluyendo no sólo el flujo electroosmótico sino también la electromigración y la electroforesis) y de la difusión efectiva (D<sub>eff</sub>, m<sup>2</sup>







· d<sup>-1</sup>) de cada especie en las condiciones experimentales, que también puede estar influenciada por la aplicación de campos eléctricos.

En la Tabla 30 también se detallan los valores de los coeficientes de correlación obtenidos, cuyos valores elevados indican la buena reproducibilidad del modelo y por tanto validan las hipótesis asumidas en su formulación. Esto es importante, ya que el modelo considera varias simplificaciones importantes, tal y como se detalla en el Anexo de esta Memoria.

Tabla 30. Valores de la velocidad y la difusividad efectivas de las especies evaluadas

	Permai	nganato	Lac	tato	Persulfato		
	Tamb	T 50°C	Tamb	Т50°С	Tamb	T 50°C	
Deff/cm <sup>2</sup> d <sup>-1</sup>	0.32	0.18	1.08	1.36	0.54	0.8	
v / cm d <sup>-1</sup>	-0.04	0	0.12	0.08	-0.16	-0.41	
$\mathbf{r}^2$	0.97	0.99	0.89	0.62	0.88	0.85	

	Sul	fato	EMULSE (	(Limoneno)	EMULSE + SDS (ST)		
_	Maq Tamb   Maq 50°C		Tamb T 50°C		Tamb	T 50°C	
Deff/cm <sup>2</sup> d <sup>-1</sup>	1.35	0.97	0.11	0.3	0.39	0.58	
v / cm d <sup>-1</sup>	-0.25	-0.12	-0.05	0	0.06	0.02	
$\mathbf{r}^2$	0.86	0.89	0.87	0.81	0.95	0.9	

Según el criterio establecido en el modelo, los valores negativos de la velocidad indican que el desplazamiento se produce hacia el ánodo, mientras que los valores positivos hacia el cátodo. Como se puede observar, el lactato, persulfato y sulfato presentan las mayores velocidades efectivas, como es de esperar por su carga eléctrica, mientras que el permanganato es el compuesto con menor movilidad, lo que se justificó por su transformación en un sólido al convertirse en especie no soluble cuando interacciona con el limo. En todo caso, las velocidades de arrastre son muy pequeñas (muy inferiores a 1 cm · d<sup>-1</sup>) lo que implica que los procesos electrocinéticos de movilidad son más lentos de lo que podría ser esperado. No obstante, este estudio está hecho en condiciones muy controladas y en las siguientes secciones se evaluará esta movilidad en matrices reales (TRL 5) lo que permitirá confirmar la verdadera magnitud de los procesos electrocinéticos. En lo que respecta a la difusividad efectiva, el lactato y el sulfato son las especies que presentan mayores valores, si bien la variabilidad no es muy grande en comparación con las otras especies. De nuevo, hay que indicar que los valores son más pequeños de los esperado. Un último comentario es relativo a los valores de sulfato presentados en esta tabla, que pertenecen a las maquetas en las que el foco de estudio es la movilidad del persulfato, observándose que la D<sub>eff</sub> de este anión es 2 veces la del compuesto primario.

## Estudio de movilidad de HCHs y sus derivados







PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

Uno de los aspectos más relevantes del proceso de remediación del suelo contaminado con HCHs y derivados es conocer la movilidad de estas especies en el suelo por acción del campo eléctrico, su posible transferencia a la fase líquida, así como su transferencia a la fase gas. Estos aspectos serán claves para determinar la estrategia de remediación

. ☐ Tamb; ■ T 50°C 0.3 a) 0.25 D.efefectiva / cm<sup>2</sup> d<sup>-1</sup> 0.2 0.15 0.1 0.05 0.15 Cátodo b) 0.1 0.05  $v\ /\ cm\ d^{\text{-}1}$ 0 -0.05 Ánodo -0.1 -0.15

Figura 38. Difusividad a) y velocidad efectiva b) por familias de compuestos

Como se observa en los valores obtenidos para ambos parámetros, difusividad efectiva y velocidad de arrastre, son bajos si se comparan con valores obtenidos para compuestos iónicos como el lactato o el persulfato mostrados en la Tabla 30. Esto quiere decir, que estas especies organocloradas se mueven relativamente despacio, ya sea por difusión o por arrastre del flujo electroosmótico. Aun así, existen







PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

diferencias entre los ensayos llevados a cabo a temperatura ambiente y a 50°C, mientras que en los primeros existe más dispersión en cuanto a los valores de difusividad efectiva, en los segundos parecen todas las especies moverse con los mismos valores de dispersión. En el caso de la velocidad efectiva, considerando con signo negativo el movimiento hacia el ánodo y positivo el movimiento hacia el cátodo, se observa como en el experimento de alta temperatura todos compuestos son arrastrados hacía la zona catódica, mientras que a temperatura ambiente las moléculas más pequeñas se mueven ligeramente hacia el cátodo y las grandes hacia el ánodo. Por tanto, parece que la temperatura también tendría influencia en estos dos parámetros.





En este punto, todavía hay aspectos importantes que concretar, tales como: ¿Mejora el movimiento de HCHs la adición de surfactante? ¿Cómo se desplaza la gaussiana si el limo contaminado está cerca del ánodo? ¿y del cátodo? ¿Qué pasa si se utiliza otro tipo de electrodo? ¿se favorece la deshalogenación?

Para dar respuesta a estas y otras preguntas, se programaron y llevaron a cabo los ensayos de la secuencia 2. Actualmente, las muestras están siendo medidas en los laboratorios del Gobierno de Aragón.

#### Estudio de movilidad en lodos altamente contaminados

Se ha introducido un volumen de lodo de 10x10x10 cm en una matriz de caolinita "limpia" como se muestra en la Figura 40. (a) y (b). El volumen de suelo que ocupa la maqueta es de 78 dm³, frente a los 0.5 dm³ de las maquetas pequeñas descritas en el apartado 1.







PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

Figura 41. Vista superior de maquetas a) cabezales herméticos para pozos + agujero para lodos; b) electrodos clavados en el suelo + relleno de lodo; c) vista final con arena superficial







Se han llevado a cabo dos estrategias de ensayos, en los primeros de ellos los electrodos se instalaron dentro de un pozo de electrolito, y en los segundos los electrodos estaban directamente clavados en el suelo como se muestra en la figura 40 a) y b). En ambos casos se ha instalado un sistema cerrado en el que los gases producidos en los compartimentos electródicos eran canalizados y burbujeados en hexano. Además, se ha trabajado aplicando diferentes campos eléctricos, 0 V cm<sup>-1</sup> (exp. de blanco), 1 V cm<sup>-1</sup> (campo eléctrico típico; reversible) y 3 V cm<sup>-1</sup>.

Los datos experimentales obtenidos en el análisis post-mortem de distribución de contaminantes tras los 15 días de tratamiento se ajustaron al modelo descrito en el Anexo 2 de esta Memoria. De esta forma se ha calculado la difusividad efectiva (Figura 42) y la velocidad de arrastre (Figura 43) de cuatro de los HCHs presentes en mayor concentración en el lodo ( $\gamma$ -HCH;  $\epsilon$ -HCH;  $\alpha$ -HCH y  $\delta$ -HCH). Como se observa en la Figura 35, el ajuste de los datos experimentales para los cuatro isómeros conduce a valores muy similares de ambos parámetros, lo que da una idea de la robustez de las simplificaciones realizadas. En el caso de los ensayos en los que los electrodos se situaban en pozo de electrolito (Figura 34 a), la aplicación de un campo eléctrico parece no afectar a la difusividad efectiva de los contaminantes si se compara con el ensayo a modo de blanco, incluso disminuye cuando el voltaje aplicado es de 3V cm<sup>-1</sup>. Sin embargo, en el caso de los ensayos con electrodos clavados en el suelo (Figura 42b) la difusión efectiva aumenta casi linealmente con el campo eléctrico desde el ensayo sin aplicación de electricidad al que se inducía un campo eléctrico de 3 V · cm<sup>-1</sup>, de 0.24 a 0.75 cm<sup>2</sup> d<sup>-1</sup>, lo que significa que en el sistema se desarrollan procesos electrocinéticos que tienen un efecto muy positivo en la movilidad del HCH.

En cuanto a u<sub>eff</sub>, (velocidad efectiva) está relacionada con el arrastre de la especie i por flujos electrocinéticos (incluyendo no sólo el flujo electroosmótico sino también la electromigración y la electroforesis). La u<sub>ff</sub> presenta valores positivos en todos los ensayos realizados, lo que se traduce en que el movimiento de los





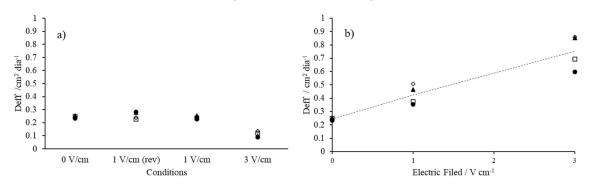


PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

contaminantes hacía la zona catódica. Esto se traduce en que la fuerza impulsora del flujo electroosmótico sería superior que el movimiento por electromigración o electroforesis en dirección anódica.

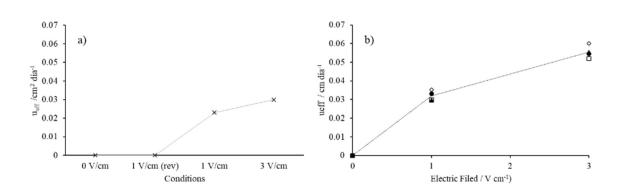
Figura 42. Difusividad efectiva a) maquetas electrodos pozo electrolito; b) electrodos clavados suelo

• γ-HCH; ♦ ε-HCH; □ α-HCH y ▲ δ-HCH.



En ambas estrategias de posicionamiento de electrodos la velocidad efectiva aumenta con el campo eléctrico aplicado. En el caso del ensayo en el que se revierte el campo eléctrico la velocidad efectiva de arrastre de los contaminantes es 0, ya que el movimiento de los compuestos se ve compensado con el cambio de polaridad (agitación del sistema). Los valores de u<sub>eff</sub> y D<sub>eff</sub> son muy bajos e indican que el transporte de los contaminantes es lento. Esto explica las bajas concentraciones de HCH contenidas en los pozos electrolíticos, al igual que ocurría con las maquetas más pequeñas.

Figura 43. Velocidad efectiva a) maquetas electrodos pozo electrolito; b) electrodos clavados suelo  $\bullet$   $\gamma$ -HCH;  $\diamondsuit$   $\epsilon$ -HCH;  $\square$   $\alpha$ -HCH  $\gamma$   $\blacktriangle$   $\delta$ -HCH.



#### Estudio de transporte de contaminantes a fase gas: volatilización de especies contaminantes del limo

Para determinar la influencia que tienen los diferentes procesos que se producen en los tratamientos de suelos vía electroquímica y en base a las observaciones previas de la influencia de la temperatura se han llevado a cabo una serie de ensayos con el fin de determinar la volatilización de las especies organocloradas presentes en el limo contaminado procedente del vertedero de Sardas. Se espera que este parámetro juegue un papel importante, pues existen indicios fehacientes de que el suelo se caliente cuando se realicen







PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

aplicaciones en campo, consecuencia de las pérdidas óhmicas que tienen lugar al aplicar un campo eléctrico. Así, el grado de calentamiento del suelo dependerá de la distancia entre electrodos y del potencial aplicado.

Para llevar a cabo estos ensayos, se tomaron porciones de suelo de 100 g procedentes de uno de los testigos de sondeo recibidos y se introdujeron en un recipiente hermético. Posteriormente, se sometieron a una temperatura de 80°C en un baño termostatizado durante una semana. Además, durante varias veces al día se hizo pasar una corriente de gas para arrastrar los gases producidos y ser borboteados en hexano o acetato de etilo.

Como se observa, las especies con menor número de cloros tienen una mayor velocidad de volatilización, mientras que a medida que aumenta el número de cloros en general disminuye dichos parámetros. Hay que tener en cuenta que no todos los compuestos están en la misma proporción en el suelo inicial, lo que explica que el CB, el 1,3-DCB y el 1,4-DCB, no se evaporen prácticamente en oposición a lo esperado, puesto estos compuestos tenían una presencia despreciable con respecto al resto de HCHs.

Además, si se representa el % de compuesto evaporado como se muestra en la Figura 44, queda de manifiesto la teoría descrita anteriormente, los compuestos con 1, 2 o 3 cloros presentan una evaporación próxima al 100%, mientras que según aumenta el número de cloros está va disminuyendo. Cabe destacar que, aunque la tasa de volatilización en los compuestos con mayor número de cloros es menor, sigue siendo importante de un 20% de media. Esto deja clara la evidencia previa que la evaporación de los compuestos juega un papel importante en los procesos de remediación electrocinética de suelos contaminados con HCHs.

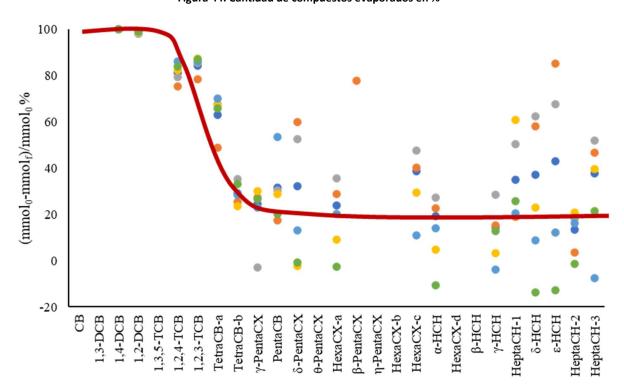


Figura 44. Cantidad de compuestos evaporados en %







PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

#### Estudio de movilidad de contaminantes en limo real (TRL 5)

Una vez evaluada la movilidad de contaminantes en condiciones controladas (TRL 4) se realiza el segundo estudio, para conocer con un nivel de detalle superior al evaluado en los estudios descritos anteriormente, cómo interaccionan los diferentes procesos que se inducen cuando se aplican campos eléctricos al limo del emplazamiento, para lo que hay parámetros que toman una mayor relevancia que cuando los procesos tratan de ser aislados:

- Disposición campo eléctrico: horizontal o vertical
- tiempo de ensayo
- adición de fluido de mejora: agua de lavado, surfactantes que favorecen el arrastre de contaminantes
- calentamiento del suelo: posible evaporación y volatilización de los contaminantes Tª 25°C a 70°C
- campo eléctrico reversible
- campo eléctrico producido (0.5-2.0 V cm-1)
- materiales electródicos: recubrimientos óxidos metálicos, grafito, carbón vitreo y hierro.

Tabla 31. Condiciones experimentales testigos secuencia 1.

Material	Disposición campo eléctrico	Duración	Fluido de lavado	Condiciones	Electrodos	Objetivo
Maqueta 1	Horizontal	35 días	agua	1V cm-1 (54V)	E1: grafito E2: ac. Inox	Comparar inducción de flujos electrocinéticos horizontales y verticales
Maqueta 2	Vertical	31 días	agua	1V cm-1 (45V)	E1: grafito E2: ac. inox	Experimento base. Conocer el comportamiento general del sistema
Maqueta 3	Vertical	30 días (7 sin campo eléctrico)	SDS/agua (10gL-1)	1V cm-1 (50 V)	E1: grafito* E2: ac. inox	Comprobar la necesidad de adicionar agentes químicos formadores de partículas
Maqueta 4	Vertical	30 días (14 sin campo eléctrico)	agua	1V cm-1 (38 V)	Ánodo: grafito Cátodo: ac. inox	Comprobar si el proceso se puede completar en periodos cortos o, al menos, determinar vel.

El primer punto que destacar se muestra en la Figura 45 en la que se observa que, durante la aplicación de un campo eléctrico entre los extremos de un suelo, la intensidad resultante tiene siempre el mismo perfil de comportamiento, con una subida inicial importante durante los dos o tres primeros días y una disminución exponencial en los siguientes días hasta valores nulos o casi nulos. Estos resultados coinciden con los resultados expuestos en el estudio a TRL 4 en el que se evaluó la movilidad de contaminantes en condiciones controladas 1D. En este estudio se concluyó que una posible causa para explicar la caída de la intensidad eléctrica (y por tanto de la velocidad de los procesos asistidos electroquímicamente) era el agotamiento de





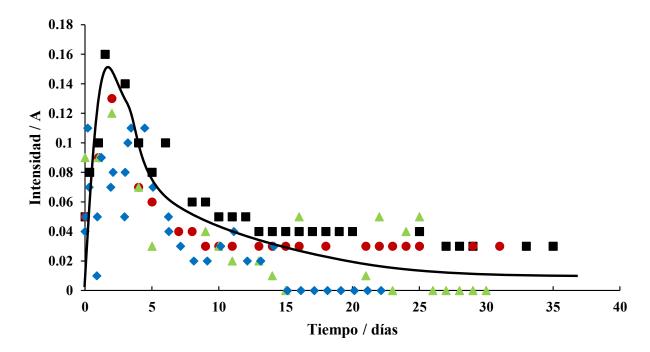


PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

los iones en el suelo, que conducía a una disminución en la conductividad iónica del sistema y por tanto a un aumento de la resistencia, lo que, a su vez, conlleva un aumento del calor generado en el sistema.

Figura 45. Variación temporal intensidad de corriente. Campo eléctrico 1.0 V/cm en cuatro maquetas

■ Maq 1; ● Maq 2; ▲ Maq 3; ◆ Maq 4.



En el Anexo 2. Validación y diseño de técnicas electrocinéticas para la remediación de los limos del aluvial al pie del vertedero de Sardas (TEQUIMA UCLM), se presenta el informe completo de la UCLM sobre técnicas electrocinéticas.







## 5.3. TÉCNICAS DE BIOREMEDIACIÓN

# 5.3.1 Introducción y estrategia

Los contaminantes halogenados tienen, en general, una baja solubilidad y son más densos que el agua, de manera que cuando alcanzan el acuífero se acumulan en forma de micela y se disuelven lentamente formando plumas de contaminación que pueden alcanzar centenares de metros. Para la biorremediación de estos compuestos en acuíferos, los microrganismos clave son las **bacterias dehalorespiradoras**. En las condiciones anaerobias en las que se encuentran estos acuíferos, los compuestos organoclorados pueden ser utilizados por algunas bacterias como aceptores de electrones en un proceso conocido como dehalorespiración. Esta reacción la pueden llevar a cabo especies que pertenecen a géneros tales como *Dehalococcoides, Dehalobacter, Desulfuromonas, Sulfurospirillum o Clostridium,* entre otros, y se han aislado de sedimentos marinos, lodos de depuradora, y suelos contaminados. Estas bacterias usan estos compuestos tóxicos para respirar, generando compuestos menos clorados que los originales, y transformando así las propiedades toxicológicas y fisicoquímicas del compuesto original. Mediante esta reacción el compuesto clorado es transformado a formas más reducidas, haciéndolo susceptible a ser oxidado por otros microorganismos aeróbicamente o bien reducido de nuevo por otros organismos dehalorespiradores en condiciones anaerobias.

Las reacciones de dehalorespiración están catalizadas por enzimas denominadas dehalogenasas reductivas y hasta la fecha se ha purificado y caracterizado un número muy escaso de ellas. Así, por ejemplo, se ha descrito que la dehalogenasa reductiva PceA declora percloroetileno (PCE) a tricloroetileno (TCE), la enzima TceA transforma TCE a cloruro de vinilo y cis-dicloroetileno, la enzima CbrA está implicada en la decloración de 1,2,4-triclorobenzenos, y la enzima BvcA en la decloración de cloruro de vinilo a etileno. Desde una perspectiva práctica, la caracterización de estos genes permite, por ejemplo, utilizar biomarcadores mediante técnicas moleculares para identificar la presencia de bacterias dehalorespiradoras o genes funciones en un medio capaces de transformar determinados organoclorados. Los subproductos de transformación de las reacciones de dehalorespiración pueden diferir y algunos de ellos presentar toxicidad ocasionando graves problemas ambientales. Un ejemplo ilustrativo es la transformación de PCE a dicloroetileno y cloruro de vinilo (compuestos tóxicos y cancerígenos) o bien su decloración completa a etileno (inocuo para el medio), ambas reacciones catalizadas por bacterias dehalorespiradoras.

Sin embargo, los estudios que abordan su biodegradabilidad son muy limitados y se desconoce la transformación anaerobia de la mayoría de ellos. Uno de los casos más estudiados es el del HCB, debido a su toxicidad y a la imposibilidad de eliminarse biológicamente en condiciones aerobias, y ha sido detectado ampliamente en sedimentos fluviales y marinos. Se ha descrito una única bacteria denominada Dehalococcoides CBDB1 capaz de utilizar HCB como aceptor de electrones transformándolo a mono y diclorobenzenos y se ha caracterizado la dehalogenasa reductiva (CbrA) que cataliza dicha reacción. En un estudio posterior, se ha asociado la eliminación de HCB de cuatro sedimentos de río procedentes de diferentes países europeos al crecimiento y actividad de bacterias de este género a partir de métodos moleculares basados en el 16S rRNA y en el gen cbrA. Cabe resaltar la importancia de las bacterias de este







PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

género (*Dehalococcoides*) en la eliminación de organoclorados ya que también se ha descrito su capacidad para declorar diversos congéneres de PCB y furanos a formas menos cloradas.

La aplicación de técnicas de descontaminación biológicas en el emplazamiento de Sardas se considera adecuada en el acuífero aluvial del río Gállego, en particular en las zonas distales del penacho de organoclorados, con concentraciones menores que en zonas más proximales y *a priori* más susceptibles de ser tratadas mediante estas técnicas.

El objetivo final consiste en evaluar la viabilidad de generar una barrera biológica en el acuífero que evite la migración de la fase disuelta hacia el receptor sensible, el embalse de Sabiñánigo. Esta barrera biorreactiva permitiría un tratamiento de las aguas subterráneas sin la necesidad de la inyección de compuestos químicos como surfactantes u oxidantes que, a medio o largo plazo, suponen una gran inversión, tanto en reactivos como en mano de obra y equipos.

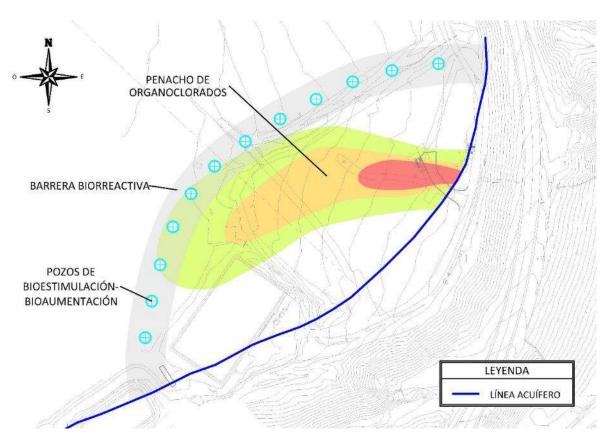


Figura 46. Esquema conceptual de barrera reactiva en planta.

De modo evidentemente preliminar y a falta de desarrollar toda la investigación sobre el potencial de la biorremediación en el emplazamiento de Sardas en la figura se presenta de forma esquemática una teórica situación de una barrera biorreactiva. Esta barrera operaría permitiendo la bioestimulación o bioaumentación en el acuífero aluvial y se ubicaría de tal forma que fuera efectiva en el sentido de evitar que el acuífero aluvial del Gállego aportara contaminantes al embalse. La línea azul corresponde con el límite del acuífero aluvial. Una configuración de este tipo permitiría aislar la zona impactada del resto del acuífero,







PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

tratando las aguas subterráneas que aportan concentraciones de organoclorados al embalse, de acuerdo con el modelo conceptual disponible del emplazamiento.

La barrera biorreactiva estaría conformada por pozos a través de los cuales se podrían generar las condiciones adecuadas en el acuífero para llevar a cabo un tratamiento biológico. Con los estudios e investigaciones planteados, se pretende alcanzar un diseño final de tratamiento biológico a través de pozos, en los cuales mediante la inyección de bioestimulantes, consorcios bacterianos o bien con la instalación de "biorreactores" en los propios pozos se generarán las condiciones adecuadas para el biotratamiento.

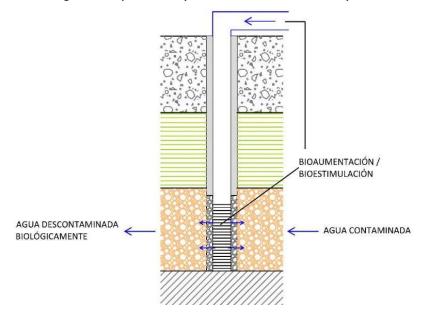


Figura 47. Esquema conceptual de barrera biorreactiva en perfil

La aplicación de una eventual barrera biorreactiva se puede plantear desde dos enfoques no excluyentes:

- Tratamiento "final" tras la eliminación de los focos tanto primarios, como secundarios de afección.
- Tratamiento "coexistente" con los tratamientos fisicoquímicos y de otros tipos. Esta opción podría ser viable dado el peculiar comportamiento de las aguas subterráneas en el emplazamiento, sujetas al "vaivén" generado por las oscilaciones del embalse debidas a la explotación hidroeléctrica y dada la complejidad de la problemática del emplazamiento y de los posibles plazos para alcanzar las condiciones de tratamiento "final" mencionadas en el apartado anterior.

Los trabajos de investigación sobre la aplicación de técnicas biológicas de descontaminación del acuífero del Gállego que realiza el Grupo de investigación BioremUAB del Departamento de Ingeniería Química, Biológica y Ambiental de la Universidad Autónoma de Barcelona, se dividen en las siguientes etapas:

- Etapa O. Revisión de información existente (Ejecutado)
- Etapa 1. Evaluación de las condiciones hidrogeológicas (Ejecutado)
- Etapa 2. Determinación de actividad biológica degradadora (Ejecutada 1ª fase. En curso 2ªfase))
- Etapa 3. Identificación de genes funcionales de actividad microbiana
- Etapa 4. Estudio de bioaumentación con bacterias dehalorespiradoras







- Etapa 5. Integración de biorremediación con técnicas electrocinéticas. (En curso)
- Etapa 6. Asistencia técnica para implementación y operación de piloto de biorremediación.

En este Informe se presentan los resultados correspondientes a las Etapas 0, 1 y 2, las etapas 0 y 1 ejecutadas a finales de 2020.

#### 5.3.2 Inventario de fuentes de inóculos

Durante 2021 se ha iniciado una nueva vía de investigación en el Servicio, en conjunto con el Servicio de Seguimiento de Bailín y el de Inquinosa consistente en la realización de un inventario de fuentes de inóculos. Se trata de realizar una caracterización básica de las fuentes de inóculos microbianos aclimatadas a la presencia de HCH en el entorno de Sabiñánigo. Esta caracterización permitirá disponer de un catálogo de posibles fuentes de inóculos para la remediación de diversas matrices contaminadas por residuos de la fabricación de HCH.

La selección o descarte de estas fuentes de inóculos no implica que no puedan ser útiles en tareas de descontaminación de sus matrices naturales con estrategias de biorremediación o bioestimulación.

La finalidad de estos trabajos es llevar a cabo un inventario y caracterización de los distintos consorcios de microorganismos presentes en el emplazamiento de Sardas, con el objetivo final de poder seleccionar aquellos más eficientes en la degradación de compuestos organoclorados, para utilizarlos en técnicas descontaminación de suelos y aguas.

Hasta la fecha, se han tomado 23 muestras de distintas matrices (6 de aguas, 8 de suelos, 5 muestras de lodos de las balsas de lixiviados de Sardas y 4 muestras de material vegetal) de un total previsto de 29.A cada muestra se le realizan los siguientes ensayos:

• Siembras en medio genérico (PCA) y en medio mínimo

La siembra y posterior recuento de microorganismos en placa se utiliza para calcular el número de unidades formadoras de colonias (UFC) que hay en una muestra. Para ello, se preparan 6 diluciones de cada muestra (de 1:10 a 1:106), se siembran e incuban durante 10 días. La placa que contenga entre 30 y 300 UFC será la que indicará la concentración bacteriana de la muestra.

Las placas de Petri de medio genérico consisten en un preparado comercial de agar y nutrientes que favorecen el crecimiento de la mayoría de los géneros de bacterias aerobias.

Las placas de medio mínimo, en cambio, se han preparado en el laboratorio de Bailín y contienen, como única fuente de carbono, una disolución de DANPL (1:10) procedente del pozo PS14E. Las colonias que se observan en este medio de cultivo corresponden a microorganismos que están muy adaptados a las condiciones de contaminación de la zona y que son capaces de usar dichos compuestos para obtener energía.

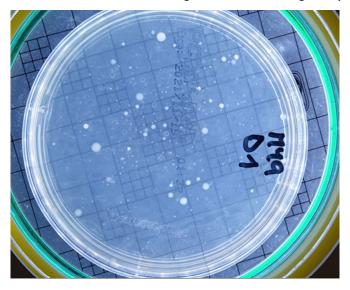






PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

Figura 48. Crecimiento de colonias en medio genérico. Muestra de agua del pozo PS5E



# Biolog Ecoplate

Las placas Biolog Ecoplate se utilizan para determinar la riqueza y diversidad funcional de las comunidades microbianas presentes en muestras ambientales (suelos, aguas, rizosfera).

Dichas placas contienen 31 fuentes de carbono distintas, más un pocillo en blanco, por triplicado; por lo tanto, están formadas por un total de 96 pocillos (Figura 49).

Figura 49. Fuentes de carbono de las placas Biolog Ecoplate

A1 Water	A2 β-Methyl-D- Glucoside	A3 D-Gelectonic Acid y-Lactone	A4 L-Arginine	A5 Water	A6 β-Methyl-D- Glucoside	A7 D-Galactonic Acid 7-Lactone	A8 L-Arginine	A9 Water	A10 p-Methyl-D- Glucoside	A11 D-Galactonic Acid T-Lactone	A12 L-Arginine
B1 Pyruvic Acid Methyl Ester	B2 D-Xylose	B3 D- Galacturonic Acid	B4 L-Asparagine	B5 Pyruvic Acid Methyl Ester	B6 D-Xylose	B7 D- Galacturonic Acid	B8 L-Asperagine	B9 Pyruvic Acid Methyl Ester	B10 D-Xylose	B11 D- Galacturonic Acid	B12 L-Asparagine
C1 Tween 40	C2 i-Erythritol	C3 2-Hydroxy Benzoic Acid	C4 L- Phenylalanine	C5 Tween 40	C6 i-Erythritol	C7 2-Hydroxy Benzoic Acid	C8 L- Phonylalanine	C9 Tween 40	C10 i-Erythritol	C11 2-Hydroxy Benzoic Acid	C12 L- Phenylalanine
D1 Tween 80	D2 D-Mannitol	D3 4-Hydroxy Benzoic Acid	D4 L-Serine	D5 Tween 80	D6 D-Mannitol	07 4-Hydroxy Benzoic Acid	D8 L-Serine	D9 Tween 80	D10 D-Mannitol	D11 4-Hydroxy Benzoic Acid	D12 L-Serine
Ei &- Cyclodextrin	E2 N-Acetyi-D- Glucosamine	E3 Y-Amino Butyric Acid	E4 L-Threonine	E5 Q- Cyclodextrin	E6 N-Acetyl-D- Glucosamine	E7 Y-Amino Butyric Acid	E8 L-Threonine	E9 <b>a-</b> Cyclodextrin	E10 N-Acetyl-D- Glucosamine	E11 7-Amino Butyric Acid	E12 L-Threonine
F1 Glycogen	F2 D- Glucosaminic Acid	F3 Itaconic Acid	F4 Glycyl-L- Glutarnic Acid	F5 Glycogen	F6 D- Glucoseminic Acid	F7 Itaconic Acid	F8 Glycyl-L- Glutamic Acid	F9 Glycogen	F10 D- Glucosaminic Acid	F11 Itaconic Acid	F12 Glycyi-L- Glutamic Acid
G1 D-Cellobiose	G2 Glucose-1- Phosphate	G3 a-Keto Butyric Acid	G4 Phenylethyl- amine	G5 D-Cellobiose	G6 Glucose-1- Phosphate	G7 a-Keto Butyric Acid	G8 Phenylethyl- amine	G9 D-Cellobiose	G10 Glucose-1- Phosphate	G11 G-Keto Butyric Acid	G12 Phenylethyl- amine
H1 α-D-Lactose	H2 D.L-a- Glycerol Phosphate	H3 D-Malic Acid	H4 Putrescine	H5 q-D-Lactose	H6 D.L-a- Glycerol Phosphate	H7 D-Malic Acid	H8 Putrescine	H9 α-D-Lactose	H10 D.L-œ- Glycerol Phosphate	H11 D-Malic Acid	H12 Putrescine







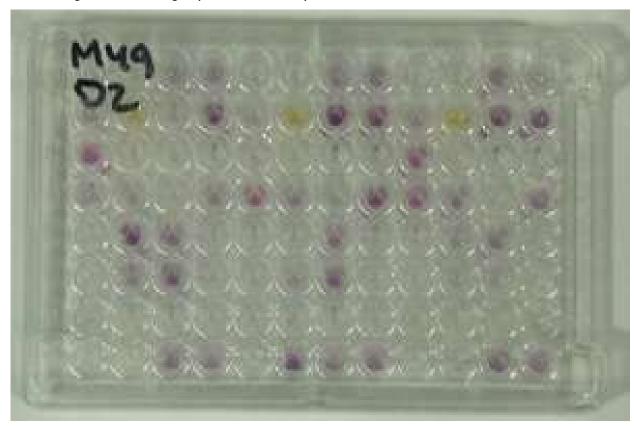
PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

Además, cada pocillo, contiene un compuesto llamado tetrazolio. Durante la incubación de las placas, los microorganismos presentes en la muestra oxidan los distintos sustratos y, de forma simultánea, provocan la reducción del tetrazolio, produciéndose un viraje de color (Figura 50) que es medido mediante un espectrofotómetro, de forma cuantitativa, en forma de absorbancia.

Las placas se incuban a lo largo de tres semanas, periodo durante el que se realizan medidas diarias de absorbancia. Posteriormente, con estos datos, se calculan distintos parámetros, que nos permiten evaluar la riqueza y diversidad de las comunidades microbianas presentes en las muestras. Los parámetros utilizados son los siguientes:

- NUS: Número de sustratos utilizados. Está relacionado con la riqueza de la muestra.
- AWCD: Average Well Colour Development. Indica el grado de actividad metabólica.
- Índice de Shannon: índice indicativo de la diversidad biológica.

Figura 50. Placa Biolog Ecoplate de muestra del pozo PSSE. El color violeta indica actividad metabólica



## Biolog MT2

Las microplacas Biolog MT2 también están compuestas por 96 pocillos que únicamente contienen tetrazolio, por lo tanto, se configuran en función del objetivo del ensayo. En nuestro caso, se desea evaluar, para cada muestra, la riqueza y diversidad de microorganismos que son capaces de vivir, crecer y reproducirse utilizando como única fuente de carbono los contaminantes organoclorados presentes en el emplazamiento, y, además, en qué concentraciones pueden asimilarlos. Para ello, se han preparado placas MT2 adicionando DANPL procedente del emplazamiento de Sardas a distintas concentraciones (Figura 51).







3 3

Réplica 1 Réplica 2 Réplica 3 Dilux 1/100 1/50 1/25 Diluy. 1/100 1/50 1/25 Dilux 1/100 1/25 1/10 1/5 1/2 1/10 1/5 1/2 1/10 1/5 1/2 1 1 1 1/100 1/50 1/100 1/100 Dillion 1/25 Dilwy. 1/50 1/25 Dilux. 1/25 1/5 1/10 1/5 1 1/10 1/2 1 1/2 1/10 1/5 1/2 1 1/25 Diluy. 1/50 Diluy. 1/100 1/50 1/25 Dilux. 1/100 1/25 1/10 1/2 1/10 1/5 1/2 1/10 1 Dilux 1/100 1/50 1/25 Dilux. 1/100 1/50 1/25 Dilux. 1/100 1/50 1/25 1/10 1/5 1/2 1 1/10 1/5 1/2 1/10 1/5 1/2 1

Figura 51. Configuración de la placa MT2.

#### **Trabajos futuros**

A lo largo de 2022 se finalizarán los muestreos de microbiología y se evaluarán los datos obtenidos utilizando los índices de riqueza y diversidad antes nombrados, para determinar qué consorcios son los más eficientes degradando los contaminantes presentes en el emplazamiento. De aquellos que se consideren más adecuados, se volverá a tomar muestras para realizar respirometrías de oxígeno y dióxido de carbono con la finalidad de valorar la actividad metabólica de los microorganismos a través del consumo de  $O_2$  o producción de  $CO_2$ . Posteriormente, se plantea su uso en reactores biológicos, primero a escala de laboratorio y más adelante su aplicación en campo.

#### 5.3.3 Etapa 0. Análisis de la información existente (2020)

En el Anexo 3. Estudio y validación de técnicas de biorremediación para el tratamiento del acuífero aluvial al pie del vertedero de Sardas. Informe técnico de la etapa 2 (Biorem UAB), se presenta el informe completo del grupo de investigación BioremUAB.

Tras el análisis de la información del emplazamiento el grupo de investigación *BioremUAB* propone una selección preliminar de pozos para realización de un monitoreo que incluya parámetros que permitan valorar la aptitud de los mismos para la realización de las siguientes etapas.

- pH, T<sup>a</sup>, conductividad, potencial redox y oxígeno disuelto
- Compuestos organoclorados
- Concentraciones de NO₃-, SO4₂-, Fe II, Fe III, cloruros, COT (carbono orgánico total)







A partir del análisis de estos resultados se confirma que los pozos situados en la zona PS16 son los más interesantes para realizar el estudio de biorremediación. Los tres pozos seleccionados contienen elevadas concentraciones de organoclorados, de manera que podrían ser usados en una futura prueba piloto si los estudios de laboratorio que realizaremos con estas aguas fueran satisfactorios. En la Tabla 32. Resultados analíticos caracterización biorremediación. Dic 2020. se presentan los parámetros más relevantes en los pozos seleccionados

# 5.3.4 Etapa 1. Caracterización química del acuífero afectado

En esta primera fase de investigación de técnicas de biorremediación los trabajos realizados en el emplazamiento son la caracterización química, desde el punto de vista biológico de las aguas subterráneas del acuífero cuaternario del Gállego en la zona de las parcelas al pie del vertedero de Sardas. Zona que se considera óptima para la aplicación de técnicas de biorremediación.

Los procesos biológicos de decloración están muy condicionados por las variables químicas de los acuíferos tales como los aceptores de electrones disponibles (nitrato, sulfato, Mn(IV), Fe(III), etc.), potencial redox, pH, oxígeno disuelto, carbono orgánico total (COT). En esta fase se han analizado estos parámetros químicos para predecir qué rutas metabólicas de organoclorados son las más factibles en condiciones de atenuación natural o bien qué estimulantes serían necesarios para proceder a un tratamiento aerobio o anaerobio/aerobio.

Tabla 32. Resultados analíticos caracterización biorremediación. Dic 2020.

Parámetro	рН	CE a 25°C	Cloruros	Sulfatos	Nitratos	тос	Hierro II	Hierro III
Uds.	U. pH	μS/cm	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	μg/L	μg/L
ST1 7,0	7.1	2032	4.4	2.8	<100	2330	87	602
ST1C 7,0	7.1	2735	270	671	<2.0	2.0	<100	<100
ST1E 7,0	7.0	4012	610	955	<2.0	2.5	<100	<100
ST1F 8,0	8.2	1076	85	228	1.1	-	-	-
PS3B 9,0	7.7	3114	298	1031	<2.0	1.7	<100	<100
PS16C 10,0	7.0	2802	244	774	<2.0	1.9	<100	199
PS16D 11,0	7.1	4175	<100	186	702	671	<2.0	4.0
PS16E 12,0	7.1	3117	373	618	4.1	3.1	<100	<100
PS16F 11,0	7.1	3236	474	600	3.4	3.2	<100	<100
PS16G 11,0	7.0	3900	551	857	<2.0	3.6	<100	<100
PS21B 12,0	7.1	2550	197	662	2.9	2.0	<100	673
PS26 7,0	7.2	1605	63	458	1.7	2.1	<100	1570

Se seleccionaron los pozos PS16D, PS16E y PS16G para llevar a cabo la Etapa 2 del proyecto: Determinación de actividad biológica degradadora, a escala microcosmos.

Se escogió el pozo PS16E para realizar el estudio a dos temperaturas (13 y 25°C). Con las muestras de los pozos D y G se realizará el estudio a la temperatura de 13°C, que es la temperatura típica. en el acuífero.







Tabla 33. Parámetros más significativos de los pozos de muestreo seleccionados.

Parámetros	Pozos de muestreo							
	PS16D	PS16E	PS16G					
Profundidad (m)	12	13	12					
Temperatura (°C)	12,67	13,23	13,03					
рН	6,84	6,76	6,91					
Potencial redox (mV)	35,7	-53,4	116,7					
DO (mg/L)	2,96	2,99	5,46					
Suma HCH (μg/L)	673,45	4113,23	3092,54					
TCB (μg/L)	13,49 - 329,74	16 - 1350	2,5 - 100,14					
DCB (μg/L)	537,48 - 2192,17	204,07 - 2026,85	41,35 - 508,23					
MCB (μg/L)	11668,27	10195,74	5122,52					
Fe II (μg/L)	<100	<100	<100					
Fe III (μg/L)	186	<100	<100					
Cloruros (mg/L)	702	373	551					
Nitratos (mg/L)	<2	4,1	<2					
Sulfatos (mg/L)	671	618	857					

# 5.3.5 Etapa 2 Determinación de actividad biológica degradadora

Los objetivos principales de la etapa 2 de esta evaluación de las técnicas biológicas de tratamiento "Determinación de actividad biológica degradadora " consisten en lo siguiente:

- Cuantificación de la degradación biológica de los compuestos organoclorados
- Influencia de la temperatura en los rendimientos de degradación
- Influencia de diferentes estrategias de biorremediación en los rendimientos de degradación.

#### Metodología experimental

A partir de las conclusiones de la etapa 1 se seleccionan 3 pozos para realizar el estudio. Los pozos seleccionados son: PS16D, PS16E y PS16G, situados en la zona intermedia de la pluma. Su ubicación se muestra en la Figura 52.

Los tres pozos son de similar construcción, con una profundidad de unos 13 m y piezómetro de PEAD de 3". El tramo ranurado en la formación aluvial, que en este sector presenta una potencia de unos 3 m.







PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

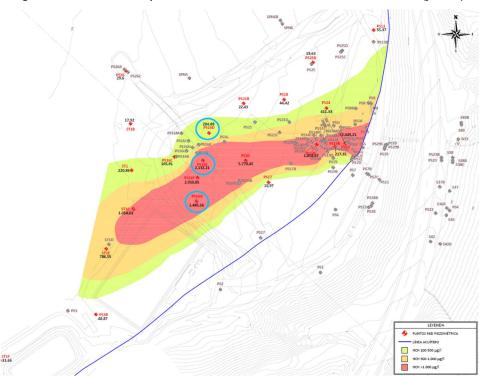


Figura 52. Ubicación de los pozos de estudio. Isoconcentraciones de suma de HCH (jun. 21).

El estudio de degradación se realiza a 13°C para los tres pozos, por ser la temperatura característica del acuífero la mayor parte del año, y para uno de ellos, el pozo PS16E también a 25°C.

El día 4/3/2021 se prepararon los microcosmos en botellas de vidrio estériles con un volumen de 100 mL de agua subterránea.



Figura 53. Microcosmos experimentales para cada tratamiento con agua subterránea de los 3 pozos







Los tratamientos sobre los que se ha experimentado son:

- Atenuación natural (ATN): agua del pozo + sobrepresión de nitrógeno.
- Bioestimulación Anaerobia (BS-An): agua del pozo + lactato 3 mM + sobrepresión de nitrógeno.
- Bioestimulación Aerobia (BS-Ox): agua del pozo + saturación de oxígeno.
- Control abiótico (control): agua del pozo a la que se añade 1 mL de HNO<sub>3</sub> 4 M obteniendo un pH final <2, para inactivar los microorganismos que pueda contener.

Se planifica tomar muestras para realizar los análisis de organoclorados a los tiempos inicial, 15 d, 30 d, 60 d y 90 d. Después de 90 d a los microcosmos bioestimulados anaeróbicamente se les añade oxígeno para estudiar un posible tratamiento en serie (Tratamiento secuencial BS-An-Ox), y se tomará muestra inicial y a los 15d, 30d y 60d. Posteriormente, en función de los resultados que se han ido obteniendo, se han modificado los tiempos de toma de muestras según se indica en las tablas 1 y 2.

Se construyen tantas réplicas de microcosmos como muestras se desean analizar para cada tiempo determinado. Para cada tiempo estipulado se sacrifica 1 réplica, se extrae 1 mL de muestra líquida para realizar los análisis en la UAB de lactato y el resto, en la misma botella, se envía al laboratorio Pirenarium para analizar los compuestos organoclorados y previamente también se le añade HNO3 para parar la actividad degradadora.

En la Tabla 34 se indica con más detalle los microcosmos que se construyen para cada pozo, los tratamientos y los tiempos reales de toma de muestras para su análisis.

Tabla 34. Esquema de microcosmos que se construyen para cada pozo y tiempos de muestreo

Pozo PS16E-13ºC									
Tratamiento	Etapa	inicial		Secue	ncial: BS-An	-Ox			
	t=0	t=15 d	t=30 d	t=55 d	t=85 d	t=0	t=11 d (96 d)	t=25 d (110 d)	t=53 d (138 d)
ATN	х	х	х	х	х				
BS-An	х	х	х	х	х	х	х	х	х
BS-Ox	х	х	х	х	х				
Control	х	х	х	х	х				
Pozo PS16E-25ºC									
	Etapa	inicial				Secue	ncial: BS-An	-Ox	
Tratamiento	t=0	t=15 d	t=30 d	t=55 d	t=85 d	t=0	t=11 d (96 d)	t=25 d (110 d)	t=53 d (138 d)
ATN	х	х	х	х	х				
BS-An	х	х	х	х	х	х	х	х	х
BS-Ox	х	х	х	х	х				
Control	х	х	х	х	х				







	Etapa	inicial		Secue	ncial: BS-An	-Ох			
Tratamiento	t=0	t=15 d	t=30 d	t=55 d	t=85 d	t=0	t=11 d (96 d)	t=25 d (110 d)	t=53 d (138 d)
ATN	х	х	х	х	х				
BS-An	х	х	х	х	х	х	х	х	х
BS-Ox	х	Х	х	х	х				
Control	х	х	х	х	х				
Pozo PS16G-13º	С								
	Etapa	inicial		Secuencial: BS-An-Ox					
Tratamiento	t=0	t=15 d	t=30 d	t=55 d	t=85 d	t=0	t=11 d (96 d)	t=25 d (110 d)	t=53 d (138 d)
ATN	х	х	х	х	х				
BS-An	х	х	х	х	х	х	х	х	х
BS-Ox	х	х	х	х	х				
Control	х	х	х	х	х				

# 5.3.6 Resultados y conclusiones

A continuación, se presentan las conclusiones más relevantes después de haber realizado todo el estudio.

- No se observan diferencias significativas entre los resultados de los microcosmos a 13°C y a 25°C realizados para las muestras del pozo PS16E, lo que indica que los microorganismos degradadores están adaptados a la temperatura de 13°C que es la temperatura media del acuífero, aunque en la bibliografía científica se indica que la temperatura óptima para los microorganismos anaerobios es de 25°C.
- Para todos los pozos y para todos los tratamientos, los resultados obtenidos al tiempo 30 d no son coherentes con la evolución de las concentraciones a lo largo del experimento. Estos resultados puntuales se consideran erróneos y se descartan.
- Con el tratamiento aerobio (BS-Ox) se obtienen mejores resultados, a tiempos más bajos, para los compuestos orgánicos menos clorados.

En la Figura 54. Resultados concentración de compuestos organoclorados microcosmos pozo PS16E a 13°C, se observa como la disminución de las concentraciones de benceno y monoclorobenceno (MCB) es mayor en el tratamiento aerobio que en el anaerobio. En los pozos con concentraciones más bajas, a los 15d ya se alcanza la eliminación total de estos compuestos.







MCB ATN MCB AN + OX MCB OX MCB Control Benceno ATN Benceno AN + OX Benceno OX - Benceno Control 10000 600 9000 500 8000 7000 400 Benzene ( 6000 MCB (µg/L) 5000 4000 200 3000 2000 100 1000 0 100 0 20 40 60 80 120 140

Figura 54. Resultados concentración de compuestos organoclorados microcosmos pozo PS16E a 13°C

La misma tendencia se observa con los isómeros del diclorobenceno (DCB). Para los isómeros del triclorobenceno (TCB), la degradación aerobia también es más rápida que la anaerobia. El isómero que se detecta a concentraciones más elevadas es el 1,2,4-TCB, lo cual es lógico porque es el intermedio más importante de la degradación de los HCH. En los microcosmos aerobios de los pozos PS16D y PS16G, en los que se encuentran concentraciones más bajas que en el pozo PS16E, su degradación es completa a los 15 días.

Tiempo (d)

Para los microcosmos del pozo PS16E llama la atención que los porcentajes de eliminación total de algunos de los compuestos menos clorados se alcanza antes a 13°C que a 25°C. Para el benceno, monoclorobenceno, y 1,2,4-triclorobenceno, su eliminación es casi total a los 55 días a 13°C y a los 85 días a 25°C. También se alcanza antes la degradación total del 1,4-triclorobenceno a 13°C que a 25°C, a los 30 y 55 días respectivamente.

Aunque el tratamiento aerobio es más rápido para los compuestos menos clorados, también se alcanza la degradación casi total de los HCH a tiempos más largos. Como puede observarse en la







Tabla 35. Porcentajes de eliminación de compuestos organoclorados tras tratamiento secuencial, para la suma-HCH del pozo PS16E-13°C en el tratamiento aerobio (BS-Ox) se degrada más del 90% a los 55 d y en los microcosmos del pozo PS16D la degradación a los 30 d también es superior al 90%.

Con el tratamiento anaerobio (BS-An) se obtienen mejores resultados, a tiempos más bajos, para los compuestos orgánicos más clorados como la familia de los HCH.

Para la suma-HCH y para gamma-HCH en todos los pozos ya se detecta una disminución muy importante de la concentración al primer tiempo de muestreo (15 d).

La degradación del isómero gamma-HCH es del 100% a los 15 días del tratamiento de bioestimulación anaerobio para los pozos PS16E y PS16D con unas concentraciones iniciales de 752,4  $\mu$ g/L y 328,4  $\mu$ g/L respectivamente. Para estos mismos pozos se alcanzan rendimientos de eliminación superiores al 90% para la suma-HCH con concentraciones iniciales de 1.968,1  $\mu$ g/L y 764  $\mu$ g/L.

Para el pozo PS16G aunque con el tratamiento de bioestimulación anaerobio ya se obtienen disminuciones de concentración elevadas a los 15 días tanto para el isómero gamma-HCH como para la suma HCH, también se sigue esta tendencia para los otros tratamientos (aerobio y atenuación natural). Esto puede ser debido a que la concentración inicial de estos contaminantes en el pozo PS16G (8 y 50  $\mu$ g/L) es mucho menor a la concentración inicial en los pozos PS16E (752,4 y 1868,1  $\mu$ g/L) y PS16D (328,4 y 764  $\mu$ g/L). En consecuencia, en el pozo PS16G al final de todos los tratamientos (t=85 d) se obtienen porcentajes de eliminación similares. Eliminación de gamma-HCH superior al 98% y de la suma HCH entre 55-69%. (99,3% y 56,3% respectivamente).

El isómero épsilon-HCH se detecta en concentraciones muy bajas y también sigue las mismas tendencias señaladas para los pozos PS16E y PS16D, en los que el tratamiento de bioestimulación anaerobio da mejores resultados de eliminación que los otros tratamientos, obteniéndose su degradación casi total (92,4%) a los 15 días en los microcosmos del pozo PS16D.

En general, con el tratamiento secuencial aerobio, aplicado a los cultivos anaerobios el día 85, se consigue incrementar la eliminación de todos los compuestos (tabla 35).







PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

Tabla 35. Porcentajes de eliminación de compuestos organoclorados tras tratamiento secuencial

	Conc inicial PS16E	inicial inicial		Eliminación en la etapa de bioestimulación anaerobia (%) t= 85 días				Eliminación total (%) del Tratamiento secuencial BS-An-Ox: 85 dias ANAEROBIO + 53 dias AEROBIO, (tiempo total 138 d)			
	μg/L	μg/L	μg/L	16E 25ºC	16E 13ºC	16D 13ºC	16G 13ºC	16E 25°C	16E 13ºC	16D 13ºC	16G 13ºC
BENCENO	216,0	140,0	4,4	0	0	0	10,1	100,0	100,0 (t 110)	99,9 (t 110)	100 (t 96)
МСВ	6620,8	8255,8	191,2	0	0	0	40,7	66,0	83,4	99,9 (t 110)	99,9 (t 96)
1,3-DCB	99,4	286,2	5,5	0	6,9	0	0	0,0	31,3	88,1 (t 110)	100 (t 96)
1,4-DCB	1028,0	1418,2	23,4	0	14,4	0	0	38,1	62,2	99,6 (t 110)	100 (t 96)
1,2-DCB	997,2	909,9	20,7	0	7,2	4,3	28,4	30,9	53,2	97,9 (t 110)	99,2 (t 96)
1,3,5-TCB	16,3	15,2	0,5	0	20,2	0	0	0,0	78,1	89,1	100 (t 96)
1,2,4-TCB	703,9	259,1	5,7	24,9	17,6	54,1	0	38,3	82,7	97,6	97,4 (t 96)
1,2,3-TCB	116,9	37,9	2,1	100	23,5	100	25,9	95,3	99,6	99,6	75,7 (t 96)
g-HCH	752,4	328,4	8,0	100	100	100	99,3	100,0	100,0	100,0	99,5
e-HCH	179,2	85,2	20,2	63,7	22,4	92,4	21,1	16,9	64,2	87,6	15,4
SUMA HCH	1968,1	764,0	50,7	93,5	93,5	99,1	56,3	92,4	96,7	98,6	65,3

Estos resultados son especialmente relevantes para los compuestos menos clorados ya que en el primer tratamiento anaerobio no se detectaba eliminación. En la

se observa que se alcanzan porcentajes de eliminación muy elevados para muchos de los compuestos, como es el caso del benceno en todos los pozos, del 1,3- y 1, 4-DCB en los pozos PS16D y PS16G, y del 1.3.5-TCB en los tres pozos a 13°C.

Hay dos compuestos, el 1,3-DCB y 1,3,5-TCB que se muestran recalcitrantes a la degradación biológica a 25°C tanto en la primera etapa anaerobia como en la segunda aerobia. En cambio, para este mismo pozo PS16E, el tratamiento secuencial a 13°C incrementa el porcentaje de eliminación y se alcanzan porcentajes superiores al 80% para los pozos PS16D y PS16G, también a 13°C.

Para el 1,2,4-TCB aunque se alcanzan porcentajes de eliminación inferiores a los alcanzados para otros compuestos, también se incrementa su eliminación con el tratamiento secuencial, llegando a porcentajes entre 38,3-97,6% en todos los pozos siendo el más bajo para el pozo PS16E a 25°C.

Para el isómero g-HCH y para la suma HCH se obtienen resultados similares, en algún caso ligeramente mejores, en el tratamiento secuencial respecto al primer tratamiento anaerobio. Esto confirma la conclusión de que estos compuestos se degradan mejor por vía anaerobia.

Para el isómero e-HCH los resultados no siguen la misma tendencia para todos los pozos y parece que el tratamiento aerobio no mejora la degradación alcanzada en la primera etapa anaerobia. Los porcentajes de degradación siguen siendo bajos excepto para el pozo PS16D.







Al final del tratamiento secuencial, día 138 de tratamiento, el isómero épsilon-HCH solo se detecta en los microcosmos del pozo PS16G (Fig. 9D) y su concentración es igual a la suma-HCH, confirmando que es el isómero más recalcitrante.

#### En resumen

- Existe actividad biológica degradadora en el acuífero
- Con el tratamiento de bioestimulación aerobio se obtienen elevados rendimientos de eliminación de los compuestos menos clorados a tiempos más bajos (15 días) pero es importante señalar que los compuestos más clorados también se eliminan a tiempos más altos (55 días).
- Mediante el tratamiento de bioestimulación anaerobia se alcanzan elevados rendimientos de eliminación de los compuestos más clorados pero la eliminación de los menos clorados es nula
- Los tratamientos de bioestimulación anaerobia seguida de bioestimulación aerobia (138 días) dan los rendimientos de eliminación más elevados para todos los compuestos organoclorados







## 5.4. FITORREMEDIACIÓN EN RELLENOS DEL PIE DEL VERTEDERO

Para la investigación en técnicas de fitorremediación se ha contado con la participación de Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario (IMIDRA), con amplia experiencia en la investigación de técnicas de fitorremediación y cuyo informe se incluye como anejo 5 *Ensayos preliminares para la aplicación de una estrategia de fitorremediación en la parcela al pie del vertedero de Sardas (IMIDRA)*, al final de esta Memoria.

## 5.4.1 Introducción y objetivos

La fitorremediación es una tecnología verde emergente que utiliza especies vegetales y sus microorganismos asociados para eliminar, degradar o contener productos químicos tóxicos en suelos, sedimentos, aguas subterráneas, aguas superficiales e incluso aire. Es posible emplear la fitorremediación como una alternativa independiente o como parte de un programa de descontaminación más amplio en combinación con otras tecnologías. Los vegetales se desarrollan han crecido naturalmente en emplazamientos contaminados debido a mecanismos de tolerancia y adaptación, y se han utilizado por valor estético o estabilización de la tierra. Pero sólo de forma relativamente reciente el uso de plantas ha llamado la atención como una tecnología de descontaminación viable. Actualmente, la fitorremediación se usa para tratar muchas clases de contaminantes, incluidos hidrocarburos de petróleo, pesticidas, explosivos, metales pesados, radionucleidos, etc.

En el caso de los contaminantes orgánicos, la fitorremediación ocurre principalmente por uno o más de los siguientes mecanismos:

- Fitoextracción: la absorción y translocación de contaminantes en fase disuelta del agua subterránea al tejido vegetal;
- Fitovolatilización: la transferencia del contaminante al aire a través de la transpiración de la planta;
- Degradación de la rizosfera: la degradación de contaminantes orgánicos en la rizosfera (suelo que rodea la raíz) a través de la acción de los microorganismos.
- Fitodegradación: la descomposición de contaminantes orgánicos dentro del tejido vegetal.
- Control hidráulico: el uso de árboles para interceptar y transpirar grandes cantidades de agua subterránea o superficial para contener o controlar la migración de contaminantes.

Durante 2021 se ha abierto una línea de investigación sobre la potencial aplicación de la fitorremediación en el emplazamiento de Sardas, en concreto sobre los materiales de relleno de las parcelas al pie del vertedero. Alrededor de 1990, en esta zona se ubicaron unos 50.000 m³ de materiales de relleno procedentes del frente del vertedero durante las obras de construcción de la variante de Sabiñánigo de la carretera N-330.

Se trata de materiales heterogéneos con concentraciones de compuestos organoclorados relativamente bajas. Estos materiales fosilizan a los limos cuaternarios del emplazamiento. En general no están saturados en agua, únicamente en momentos de precipitaciones presentan saturación en su base.

Los objetivos de este estudio preliminar sobre fitorremediación en el emplazamiento de Sardas se sintetizan en los siguientes:







- Evaluar la tolerancia de vegetación arbórea/arbustiva en un suelo contaminado por lindano y otros organoclorados procedente del vertedero de Sardas.
- Evaluar el efecto de los tratamientos de fitorremediación en la reducción de la contaminación por lindano y derivados y en la recuperación de la funcionalidad del suelo.

## 5.4.2 Preparación del ensayo

El ensayo se realiza en un umbráculo en la Finca experimental "El Encín" situada en Alcalá de Henares (Madrid).

Los suelos que ensayar proceden de la parcela situada el pie de vertedero de Sardas, en concreto de una calicata excavada a tal efecto entre los sondeos PS7B y PS7D. Para su obtención se empleó una retroexcavadora. Los suelos seleccionados se enviaron al IMIDRA en 8 bidones de 200 l con un transporte adecuado a las características de los materiales. Antes de introducir los suelos en los bidones, se extrajeron de forma manual del suelo los restos antrópicos (plásticos, maderas, escombros y grandes cantos, etc.)

Figura 55. Preparación de suelo para ensayo de fitorremediación







La detección de los compuestos clorados se ha realizado en los laboratorios del Gobierno de Aragón (Sabiñánigo). Debido a las características del emplazamiento, el suelo presenta concentraciones de compuestos clorados por encima de los límites legislativos, siendo mayoritarios los compuestos 1,2,4, triclorobenceno y los isómeros  $\alpha$  -HCH y  $\beta$ -HCH

Para la realización del ensayo se han utilizado contenedores de 10 L y 20 L para la producción de especies arbustivas y arbóreas respectivamente.







Las especies para ensayar son: Rosal (*Rosa canina*), Sauce (*Salix alba*) y Chopo (*Populus canadensis* clon I-214)

Los ensayos se realizan en bloques al azar con cuatro réplicas por tratamiento (Figura 1).

- -Control : Suelo contaminado sin tratamiento
- Micorrizas: Suelo contaminado +Inóculo micorrizas
- -Mineral: Suelo contaminado + Fertilización NPK
- Orgánico: Suelo contaminado + Fertilización orgánica (compost)
- -Mixto mineral: Suelo contaminado + Inóculo de micorrizas + NPK
- -Mixto orgánico: Suelo contaminado + Inóculo de micorrizas + compost

Tras la recepción del suelo se procedió a su secado al aire previamente al tamizado para el posterior llenado de los contenedores.

S A U U C E O O S A L L C C H O O S A L I N N T A A I N T A I

Figura 56. Diseño del ensayo de fitorremediación en el umbráculo

Previamente al llenado de los contenedores se añadió grava a los mismos para evitar la compactación del suelo. Asimismo, se instaló un sistema de riego por goteo para la dosificación correcta de la cantidad necesaria de agua para el desarrollo de las especies

Una vez preparados los contenedores con el suelo se regaron hasta el 60% de la capacidad de campo previamente a la incorporación de los tratamientos.

El compost se aplicó antes del trasplante mezclando el material con el horizonte superficial del suelo del contenedor.







PD 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

Tras el trasplante de las tres especies (Figura 57) se aplicaron los tratamientos NPK y la 1º aplicación del inóculo de micorrizas.

Figura 57. Contenedores para ensayo de fotorremediación







Rosal Sauce Chopo

#### 5.4.3 Previsión actividades fitorremediación 2022

Transcurridos 6 meses desde el trasplante se evaluarán parámetros no destructivos en las plantas, altura, contenido en clorofila (SPAD) y MDA, así como se evaluará visualmente el aspecto de las plantas.

- A los 12 meses del trasplante se tomarán muestras de planta (parte aérea y raíz), para la determinación de la biomasa, contenido en nutrientes y determinación de compuestos clorados.
- Asimismo, se determinará el efecto de los tratamientos en la funcionalidad del suelo analizando las propiedades fisicoquímicas, el nivel de contaminantes y sus propiedades biológicas a través de la caracterización de los índices de calidad biológica del suelo establecidos (Respiración inducida por sustrato, actividades enzimáticas y diversidad funcional).

Como más arriba se ha indicado, para mayor detalle se incluye como Anexo 5, el informe de IMIDRA: *Ensayos* preliminares para la aplicación de una estrategia de fitorremediación en la parcela al pie del vertedero de Sardas.







# 6. MODELIZACIÓN MATEMÁTICA

Durante el Servicio de Seguimiento hidrogeológico de Sardas en 2021 se han llevado a cabo los siguientes trabajos relacionados con la modelización matemática, en continuidad con lo realizado en 2020.

- Actualización de los modelos de flujo
- Cuantificación del flujo másico de los contaminantes que salen del vertedero y del flujo másico de salida de los contaminantes del emplazamiento de Sardas a través de las gravas del aluvial hacia el embalse
- Identificación, delimitación y cuantificación de las principales zonas de entrada de agua al vertedero de Sardas
- Modelos de los ensayos de trazadores, ensayos ISCO y ensayos con surfactantes

Estos modelos han sido desarrollados en colaboración con el grupo de investigación Gestión Sostenible de Recursos Hídricos y del Suelo (AQUATERRA) de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de A Coruña.

En apartados sucesivos se resumen los trabajos de modelización desarrollados en 2021 y en el Anexo 4 Hidrogeología y modelos de balance hidrológico, modelos de flujo subterráneo y trpte. de contaminantes en los emplazamientos afectados por INQUINOSA: 3º fase (ACUATERRA UDC) se presentan los informes completos de (ACUATERRA UDC).

### 6.1. ACTUALIZACIÓN DE LOS MODELOS DE FLUJO

#### 6.1.1 Actualización del modelo 3D de flujo del vertedero de Sardas

Dentro de la Actividad n.º 1 se ha actualizado el modelo 3D de flujo del vertedero y su entorno próximo. Dicha actualización contempla:

- 1) Extender el periodo de simulación del modelo 3D de flujo hasta 2022
- 2) Actualizar las entradas de agua por las vaguadas, en especial en la zona de los sondeos S35F1 y S35F2, teniendo en cuenta la zanja drenante construida en 2019 en la zona norte del vertedero.
- 3) Actualizar la distribución espacial de las entradas de agua al vertedero por el perímetro del vertedero, considerando la hipótesis de que las entradas puedan estar concentradas en zonas concretas,
- 4) Considerar las heterogeneidades a pequeña escala del terreno subyacente del vertedero y de los rellenos del vertedero
- 5) Considerar las posibles zonas de fractura y las fallas en las margas subyacentes
- 6) Reducir el tamaño de las celdas en las inmediaciones de la pantalla frontal y considerar flujo libre en toda la parte superior del modelo.
- 7) Actualizar la calibración del modelo 3D de flujo subterráneo de forma simultánea e integrada con el modelo hidrológico de balance.

Para complementar la información sobre los parámetros hidrodinámicos de los rellenos y obtener información sobre las entradas de agua al vertedero a través del perímetro del vertedero se ha utilizado el







modelo 3D de flujo transitorio a través del vertedero para simular e interpretar los ensayos de bombeo realizados en los pozos S34 y S36 en 2011. La interpretación de los ensayos de bombeo en los sondeos S34 y S36 ha permitido estimar los siguientes parámetros hidráulicos y condiciones de contorno:

- Las conductividades hidráulicas en la zona próxima a la pantalla (15 m/d) y en la zona del sondeo S34 (5 m/d).
- El coeficiente de almacenamiento específico, Ss. En la parte baja del relleno Ss es igual a 8.5·10-4 m-1 y 7·10-4 m-1 el resto del relleno.
- La condición de contorno de tipo mixto en la cuneta perimetral de la esquina noroeste del vertedero.

Los resultados del modelo de los ensayos de bombeo en los pozos S34 y S36 se han incorporado en el modelo 3D de flujo del vertedero de Sardas entre 2011 y 2020. Estas modificaciones han ayudado a definir las conductividades hidráulicas de los materiales del relleno, la condición de contorno a lo largo de la cuneta perimetral y mejorar el ajuste de los niveles piezométricos en la parte baja del vertedero.

Se ha actualizado y mejorado el modelo numérico de flujo 3D para simular el flujo en régimen transitorio en el vertedero de Sardas y sus inmediaciones presentado en Samper *et al.* (2020a). Se han actualizado las entradas de agua a lo largo del contorno del modelo y por el perímetro del vertedero del vertedero. Se ha modificado la condición de contorno en la esquina noroeste.

Se han actualizado las conductividades hidráulicas, las porosidades drenables y los coeficientes de almacenamiento específico de las distintas formaciones.

El ajuste de los hidrogramas de niveles es en general bueno. Existen discrepancias entre los niveles medidos y los calculados en varios sondeos. En algunos casos se trata de diferencias en los niveles medios y en otros casos las diferencias se centran en la variabilidad temporal de los niveles.

Se ha mejorado notablemente el ajuste de los niveles respecto al ajuste del modelo de la fase anterior en los sondeos situados en la parte baja del vertedero, en el relleno justo aguas arriba de la pantalla de bentonita (S34, S36, S37, S38C, S42B y S43).

El balance hidrológico durante el periodo de simulación indica que la mayor parte del flujo de entrada al vertedero se produce en la cuneta perimetral en la esquina NW del vertedero situada cerca de los sondeos de la serie S38. El caudal de entrada es igual a 31.1 m³/d. La recarga por infiltración es igual a 2.7 m³/d. Las entradas por otras partes del vertedero como la zona de la vaguada son iguales a 18.4 m³/d.

Los caudales medios de salida incluyen: 1) El caudal de bombeo en el pozo S37 en el periodo de simulación que es igual a 4.06 m³/d; 2) El flujo subterráneo por debajo de la pantalla frontal que es igual a 44.3 m³/d; 3) El caudal del flujo subterráneo hacia el norte de la pantalla frontal que es igual a 1.9 m³/d; 4) El caudal que recoge el dren situado al norte de los sondeos de la serie S38 que es igual a 3.16 m³/d; 5) El flujo de salida por la zanja drenante situada cerca de los sondeos S35E y S35F que es igual a 0.06 m³/d. Se destaca que los caudales del dren situado al norte de los sondeos S38 y la zanja drenante situada en la cabecera del vertedero se han calculado en los 3538 días de cálculo del modelo, aunque no funcionaban como drenes hasta enero de 2018 y abril de 2021, respectivamente. El caudal medio calculado desde su implementación en el modelo que descarga al dren situado al norte de los sondeos S38 es igual a 8.91 m³/d en 1254 días. La descarga media







calculada desde la fecha de apertura de la zanja drenante situada cerca de los sondeos S35E y S35F es igual a 3.23 m³/d en 62 días.

Está previsto continuar con la calibración del modelo 3D. Para ello, se revisarán las condiciones de contorno y los parámetros de las zonas de materiales de las zonas en las que se observan mayores residuos de niveles piezométricos.

#### 6.1.2 Actualización del modelo de flujo 2D en planta a través del aluvial del río Gállego

Se han realizado las siguientes actualizaciones en el modelo de flujo en régimen transitorio a través de las gravas y arenas del aluvial del río Gállego:

- 1) El mapa del fondo del aluvial
- 2) Las variaciones de las superficies de zonas inundables por el embalse teniendo en cuenta la variación del nivel del embalse.

Los niveles medidos y calculados en todos los sondeos del aluvial del río Gállego son prácticamente iguales entre sí. El nivel del embalse determina en buena medida la evolución temporal del nivel en las gravas y las arenas. Se observa un ligero desfase de aproximadamente 15 cm entre el nivel medio calculado y el nivel medio medido.

Las velocidades reales calculadas para porosidades comprendidas entre 0.08 y 0.13 varían entre 0.2 y 1.5 m/d y dependen en gran medida de la variación del nivel del embalse. Los resultados indican que la velocidad del agua tiene, en la mayor parte del periodo de cálculo, una dirección este – oeste. Sin embargo, cuando sube el nivel del embalse, la dirección del flujo cambia ligeramente.

Los flujos de salida del acuífero (y de entrada) por el embalse y el río Gállego en cada intervalo de tiempo también dependen en gran medida de la variación del nivel del embalse. Cuando el nivel del embalse aumenta, existe un flujo de entrada al acuífero desde el embalse.

# 6.1.3 Modelo 3D de transporte de solutos del vertedero

El modelo 3D de flujo subterráneo en régimen transitorio plurianual en el vertedero de Sardas es un gran desafío. El emplazamiento del vertedero es extremadamente heterogéneo desde el punto de vista hidrogeológico y, pese a la gran cantidad de información obtenida desde el inicio de los trabajos, sigue siendo un reto incorporar en el modelo las heterogeneidades a pequeña escala del terreno subyacente del vertedero y calibrar los niveles medidos en los sondeos que dependen en buena medida de las entradas por debajo de las pantallas laterales de cierre del perímetro del vertedero.

Se ha comenzado a definir el modelo de transporte de solutos en el dominio del modelo de flujo. El programa MODFLOW 6 (Langevin *et al.*, 2020) permite la simulación del transporte tridimensional de un soluto utilizando el método de diferencias finitas con mallas no estructuradas.







Está previsto utilizar este código para simular el transporte de un soluto utilizando la malla de cálculo del modelo de flujo en el vertedero. Se va a considerar la conductividad eléctrica de la cual hay múltiples datos en muchos sondeos. Posteriormente, se simulará otra especie reactiva como el HCH disuelto total.

## 6.2. CUANTIFICACIÓN DEL FLUJO MÁSICO DE LOS CONTAMINANTES

El objetivo de este trabajo es la cuantificación del flujo másico de los contaminantes que salen del vertedero y del flujo másico de salida de los contaminantes del emplazamiento de Sardas a través de las gravas del aluvial hacia el embalse, para ello, se contemplan las siguientes actividades:

- 1) Considerar la totalidad de los COC disueltos además del HCH disuelto total. Se tendrán en cuenta los datos disponibles.
- 2) Realizar un análisis estadístico de los datos de evolución temporal de la concentración total de HCH y COC disueltos.
- 3) Actualizar el modelo de transporte de solutos en las gravas del aluvial.
- 4) Actualizar los cálculos de los flujos másicos de COC de salida del emplazamiento de Sardas a través de las gravas del aluvial.

Dentro de esta actividad se han realizado pasadas de sensibilidad del modelo de transporte de HCH disuelto total considerando diferentes valores del coeficiente de distribución, Kd. Se han considerado los siguientes valores: 0, 55, 170 y 390 L/kg.

# 6.3. IDENTIFICACIÓN, DELIMITACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE ENTRADAS

La Actividad n.º 3 está encaminada a la identificación de las principales zonas de entrada de agua al vertedero de Sardas y la cuantificación de las entradas con el objetivo último de proponer soluciones e infraestructuras para su reducción y eliminación. La identificación de las principales zonas de entrada de agua al vertedero de Sardas y la cuantificación de las entradas se ha realizado mediante la integración de los resultados del modelo hidrológico de balance y del modelo 3D de flujo subterráneo del vertedero.

Para dar respuesta a los objetivos planteados se han realizado las siguientes actividades: 1) Revisión de las principales zonas de entrada de agua al vertedero de Sardas mediante el análisis detallado de los hidrogramas de los sondeos; 2) Análisis de las posibles entradas de agua. Estas entradas incluyen: 1) Las entradas a lo largo del perímetro del vertedero en las proximidades de las cunetas perimetrales; 2) Las entradas procedentes de la vaguada situada al norte de los sondeos S35E y S35F; 3) Las entradas de flujos subterráneos procedentes de las formaciones circundantes (glacis, limos y margas); y 4) La recarga por infiltración a través de la cubierta multicapa del vertedero. La variabilidad temporal de las entradas se ha cuantificado utilizando modelos hidrológicos de balance de agua realizados con el programa VISUAL-BALAN mientras que la magnitud de las entradas se ha calibrado con el modelo 3D de flujo del vertedero. Ambos modelos se han extendido hasta diciembre de 2020.







A 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

ENTRADAS DE ESCORRENTÍA SUPERFICIAL

ENTRADAS DE ESCORRENTÍA SUPERFICIAL

ENTRADAS DE ESCORRENTÍA SUPERFICIAL

FLUJO HIPODÉRMICO GENERADOS POR LA LLUVIA SOBRE EL VERTEDERO

RECARGA DEL AGUA DE LLUVIA

SALIDAS DE AGUA

SALIDAS DE AGUA

SALIDAS DE AGUA

ENTRADAS DE ESCORRENTÍA SUPERFICIAL

ENTRADAS DE ESCORR

Figura 58 Esquema conceptual del vertedero con principales entradas y salidas

Entre otros análisis y comprobaciones sobre el terreno (ver fotografías siguientes) se ha comprobado mediante una prueba de flujo realizada por EMGRISA que confirma que el flujo subsuperficial procedente de la precipitación en este sector del vertedero fluye por debajo de las cunetas perimetrales y por tanto no es evacuado por las cunetas.



Figura 59. Cuneta perimetral en escalera sobre viga zona S35E y S35F. Prueba de flujo subsuperficial

Los resultados obtenidos a partir de la combinación de los modelos hidrológicos de balance de agua y el modelo 3D de flujo del vertedero proporcionan unos caudales medios de entradas de agua al vertedero que se indican en la Tabla 36.

El balance hidrológico en el vertedero de Sardas es muy similar al balance calculado para todo el dominio del modelo 3D. La recarga por infiltración sobre las margas alteradas situadas al norte del vertedero (0.62 m³/d), la recarga por infiltración sobre la carretera N-330 (0.03 m³/d) y la infiltración del flujo subsuperficial que pasa por encima de la pantalla frontal de bentonita (1.20 m³/d) son las únicas entradas en el dominio del modelo que no fluyen hacia el vertedero. La mayor parte de las entradas de agua al vertedero se producen a lo largo del perímetro, especialmente en las dos zonas más bajas, la próxima el barranco del sondeo S35E y la esquina NW (cerca del sondeo S38C). El caudal de entrada perimetral es igual a 36.20 m³/d. También, se







A 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

produce una entrada de flujo subterráneo igual a 10.1 m³/d por debajo de la pantalla perimetral procedente del medio subterráneo circundante. La entrada de agua a través de la cobertera multicapa se estima que es igual a 1.79 m³/d.

Tabla 36.Caudales medios de entrada de agua al vertedero (m3/d)					
Caudales de entrada al vertedero	Caudal (m³/d)				
Entradas perimetrales vertedero	36.20				
Flujo subterráneo del medio circundante	10.01				
Recarga por infiltración del agua de lluvia por la cobertera	1.79				
TOTAL	48.00				

Está previsto contrastar las entradas de agua al sistema calculadas con el modelo de balance hídrico y el modelo de flujo 3D con datos medidos de la evolución temporal de la conductividad eléctrica y de otros parámetros químicos disponibles en los sondeos.

# 6.4. MODELOS DE ENSAYOS DE TRAZADORES, SURFACTANTES E ISCO

En la Actividad n.º 4 se han realizado modelos a escala pequeña (MEP) para los ensayos de trazadores, ISCO y surfactantes.

Dentro de esta actividad y para ayudar en la planificación de los ensayos de trazadores, se han calculado con el modelo 2D en planta de flujo en las gravas del aluvial las velocidades en el entorno de los sondeos de la serie PS16 para valores de la porosidad de las gravas iguales a 0.08 y 0.13. Se comprueba que el flujo tiene, en la mayor parte del periodo de cálculo, dirección este — oeste. Sin embargo, cuando el nivel del embalse aumenta, la dirección del flujo cambia. El módulo de la velocidad real oscila entre 0.2 y 1.2 m/d Figura 60.

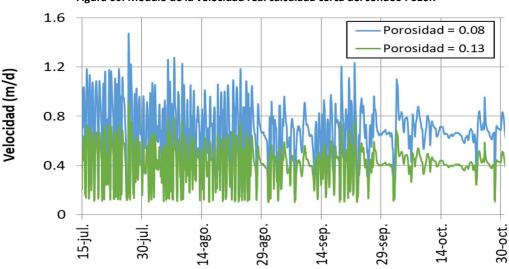


Figura 60. Módulo de la velocidad real calculada cerca del sondeo PS16K







A 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

# 7. ADECUACIÓN Y MEJORA DE LAS INSTALACIONES

En los siguientes apartados se enumeran y describen las principales actuaciones relacionadas con la mejora de las instalaciones del emplazamiento y su mantenimiento. Destacan la construcción de un nuevo vial de acceso al emplazamiento, la instalación de las oficinas y vestuarios blanco y negro, así como la colocación de un depósito de agua potable y la reubicación del blanco y negro de la parte alta del vertedero, además de otras muchas intervenciones de menor entidad.

# 7.1. INSTALACIÓN DE DEPÓSITO DE AGUA DE RED DE 10 m<sup>3</sup>

#### 7.1.1 Ubicación

El depósito de agua e instalaciones accesorias se ubica en la parte alta del emplazamiento, sobre el propio vaso de vertido, junto a las instalaciones de bombeo y los almacenes, como se indica a continuación en la Figura 61.



Figura 61. Ubicación del depósito de agua de 10 m3

# 7.1.2 Solución adoptada y Justificación

Tras una modificación por parte del Ayuntamiento de Sabiñánigo en la red de suministro de la que se toma agua en el vertedero de Sardas, el suministro es esporádico y tiene lugar únicamente algunas noches. Dada esta situación, se ha optado por la instalación de un depósito de agua en la parte alta del emplazamiento.

Mediante este depósito se suministra agua a la parte baja del (parcelas al pie y depuradora) por gravedad y a la parte alta mediante un grupo de presión. Se dispone de un sistema de cloración de apoyo puesto que es







A 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

previsible que el agua del depósito, aunque clorada, quede estancada en él durante días y pierda al menos parcialmente el cloro.

La capacidad de almacenamiento del depósito por la que se ha optado es de 10 m³, cantidad suficiente para dar servicio a los módulos de blanco y negro en su uso habitual e incluso para la realización de trabajos de perforación de sondeos o ensayos de inyección.

El depósito, así como el grupo de bombeo, se sitúa sobre una solera de hormigón armado que se ha ubicado entre los módulos-almacén del emplazamiento. La dimensión de esta solera es de 9 m x 19 m y tiene un espesor de 15 cm.

Para el suministro de agua de la parte alta del vertedero así como para el sistema de cloración se ha instalado un grupo de presión en una caseta de 2,5 x 2,5 m de fábrica construida al efecto. El suministro de agua a las parcelas al pie del vertedero y a la depuradora será por gravedad directamente desde el depósito de 10 m³, ya que la diferencia de cota es de unos 40 m.

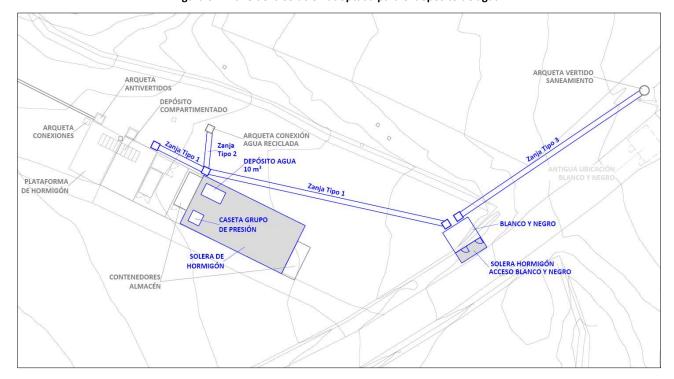


Figura 62. Plano de la solución adoptada para el depósito de agua

Al final del documento se incluye el plano para más detalle.







A 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

# 7.1.3 Descripción de las instalaciones y obra

#### Obra civil

## Solera de hormigón

Solera de hormigón armado con al menos 15 cm de espesor y mallazo de 6 mm a 20x10. La solera tiene unas dimensiones de 9x19 m y ocupa el espacio entre los dos contenedores de navío que se emplean como almacenes. Sobre la solera se sitúa el depósito de agua de 10 m³.

### Acometida agua y electricidad

La conexión con la red de agua potable existente se realiza en una arqueta situada junto a la planta de bombeo. Desde este punto se deriva la conducción hasta el depósito de 10 m³ desde donde se distribuye el agua, tanto a la parta alta del emplazamiento mediante el grupo de bombeo, como a la parte baja por gravedad.

Los trabajos incluyen la instalación de las conducciones enterradas por la que discurre la alimentación eléctrica y los nuevos circuitos interiores necesarios en las casetas reubicadas

Las conducciones han sido enterradas en zanjas de acuerdo con la Figura 63.



Figura 63. Fotografía de detalle de zanjas y conducciones junta a depósito







A 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

#### Depósito y sistema de cloración

#### Depósito de 10 m3 de capacidad y calidad alimentaria

El depósito es apto para instalación en superficie y tiene las siguientes características:

- Capacidad: 10 m³ (2120 mm de diámetro y 3620 mm de longitud
- Material: Poliéster Reforzado de Fibra de Vidrio (PRFV) con protección UV
- Boca de acceso: diam. 410 mm
- Entrada/aireación: rosca 2" superior y salida inferior DN50.
- Otros: Con flotador 2" con boya plana.



Figura 64. Fotografía del depósito de PRFV 10 m³.

## Grupo de presión

El grupo de presión suministra agua a las instalaciones de la parte alta del vertedero de Sardas. El suministro de agua a las parcelas al pie, así como a la depuradora se realiza directamente por gravedad desde el depósito de 10 m³.

El grupo de presión consta de los siguientes componentes:

Grupo de presión simple con calderín, para alimentar 2 casetas de obra con duchas, lavabos, y WC.
 Bomba vertical Roma 9.5 T 2cv III 230/400 V, válvula de retención, válvula de bola, cuadro y acumulador membrana 200 l 10 kg/cm².

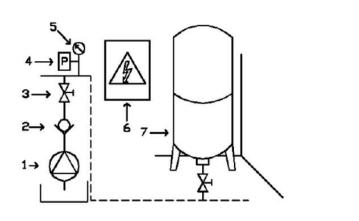






A 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

Figura 65. Esquema y características grupo automático de presión G-S ROMA 5.5.





Posición	Unidades	Descripción
	1	BANCADA SIMPLE 300 X 270 MM.
	1	CODO 90 GRADOS LATON 1' M-H
	1	EMBALAJE PALET EUR + CAJA CARTON
	1	GRIFO AFORO PRESOSTATO
	1	KIT ACCESORIOS COLECTOR IMPULSION TIPO GSV 1'
	1	SOPORTE CUADRO ELECTRICO GRUPOS SIMPLE / DOBLE
01	1	BOMBA VERTICAL ROMA 5.5 T 1,3 CV III 230/400 V.
02	1	VALVULA DE RETENCION 1'
03	1	VALVULA DE BOLA 1'
04	1	PRESOSTATO FAC-2 (3-12 KG/CM2)
05	11	MANOMETRO 0-6 KG/CM2 53 MM RADIAL ROSCA 1/4"
06	1	CUADRO GP 1 BOMBA HASTA 5,5 CV III 400 V 'ECO'
07	1	ACUMULADOR MEMBRANA HASABOX 100 LTS 10 KG/CM2

#### Sistema de cloración

El sistema de cloración se emplea para una cloración complementaria del agua de Sardas ante la previsión de que quede estancada en el depósito y pierda cloro.

Dispone de los siguientes elementos instalados en la caseta de bombeo:

Depósito de PE alta densidad, tapa no hermética, calidad alimentaria, Capacidad: 100 l (D 480 mm, alt: 658 mm) para almacenamiento de cloro.

Contador volumétrico DN50 para tubería de diámetro 63, con *reed* emisor de impulsos colocado en tubería existente.

Bomba dosificadora con microprocesador, y tecnología multifunción. Funciones operativas:

- Manual con regulación digital (0-100%) Volumétrica-contador: 1xN 1xN con memoria (M) 1/N
- ppm (mg/l), mA, Programador digital, alarmas, salida relé, Predisposición para sensor de flujo, Predisposición para sonda de nivel, Otras funciones: Reloj, *Buzzer*, Certificado CSA







A 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

Figura 66. Bomba dosificadora y contador de impulsos para cloración





# 7.2. VIAL ACCESO Y APARCAMIENTO, OFICINAS Y VESTUARIOS BLANCO Y NEGRO

# 7.2.1 solución adoptada y Justificación

La solución que se ha adoptado para la ejecución de la partida del "Módulo Blanco y Negro en pie de vertedero" es su instalación la parcela del antiguo campo de cultivo que recientemente ha sido expropiada por el Gobierno de Aragón y al pie del nuevo acceso construido, tal y como se aprecia en la siguiente fotografía.

Figura 67. Fotografía de perspectiva general nuevo de acceso, aparcamiento y oficinas y B/N









Se ha contemplado la inclusión de unas nuevas oficinas y vestuarios para la Contrata del Seguimiento.

De este modo, el conjunto está compuesto por 10 módulos prefabricados:

- Blanco y negro Contrata Seguimiento. 3 módulos.
- Blanco y negro subcontratistas. 3 módulos.
- Blanco y negro femenino. 2 módulos.
- Oficinas Contrata, 2 módulos.

Además se ha dotado a los módulos de los servicios de agua y electricidad desde las parcelas al pie del vertedero y acceso mediante la construcción de un vial. Esta vial dispone de espacio anejo suficiente para 10 plazas de aparcamiento.

Se ha optado por esta solución por los siguientes motivos:

- Para la ubicación se ha elegido un punto alejado de la parcela al pie del vertedero por evidentes motivos preventivos.
- La inminente llegada de electricidad al pie del vertedero permite la ubicación definitiva de las oficinas e instalaciones básicas en Sardas.
- La ubicación de las oficinas y Blanco y Negro de la Contrata en el pie del vertedero es óptima para el desarrollo del Servicio, evitando continuos desplazamientos entre Bailín y Sardas del personal que interviene.
- La construcción del nuevo acceso al emplazamiento facilita el empleo seguro de las nuevas instalaciones

# 7.2.2 Descripción de las instalaciones y obra

### **Módulos prefabricados**

Los módulos se han colocado sobre soportes de hormigón elevados 50 cm sobre el terreno. El terreno lo conformará una plataforma de zahorra horizontal

**Módulo de blanco y negro**: "Módulo Blanco y negro para operarios, contratas, investigadores y visitas en el pie del vertedero de Sardas. Está compuesto por seis casetas prefabricadas con dos módulos de blanco (hombres y mujeres), dos de negro, 2 servicios-duchas y un almacén de EPIs, equipados con taquillas y el mobiliario necesario. dispone de un sistema anejo de tratamiento de aguas negras". Esos dos blanco y negro serán utilizados por la Contrata del Seguimiento y por subcontratistas y visitas

Como ya se ha mencionado, a la construcción de estas instalaciones, se le añaden las siguientes adicionales así como la obra necesaria para dar acceso y servicios al conjunto.

# Blanco y Negro femenino

Módulo doble con dos duchas, dos WC, 2 lavabos y taquillas. Este módulo se trasladará desde Bailín, se trata del actual blanco y negro de la contrata del servicio de seguimiento.

## Oficinas Contrata del Seguimiento.







A 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

Módulo doble diáfano con aire acondicionado con "split". Este módulo se convertirá en las oficinas del Contratista del Servicio de Seguimiento Hidrogeológico de Sardas. Constará de 2 ó 3 puestos de trabajo y una mesa de reuniones, además de estanterías y otro mobiliario.

#### Obra civil

## Acceso a la zona de blanco y negro y oficinas.

Vial de acceso de 70 m de longitud y 6 m de achura. El vial comienza con una rampa en curva con un relleno con el correspondiente terraplenado. Este terraplén se ha compactado en tongadas de 30 cm de espesor máximo y sobre él se ha extendido una base de pavimento realizada mediante relleno con zahorra natural / todo uno, y compactación en tongadas sucesivas de 30 cm de espesor máximo terminado con 900 M2.- Capa de 5 cm de espesor de mezcla bituminosa en caliente tipo AC16 SURF 50/70 D, en capa de rodadura fabricada, con betún y riego asfáltico.

En este terraplén se construirá un caño de cruce de 600 mm de diámetro de hormigón armado prefabricado con sus correspondientes boquillas con aletas en hormigón armado in situ.

Barrera metálica simple de acero galvanizado de 40 metros de longitud hincada con poste CPN cada 4 metros con un abatimiento de 4 metros y otro de 12 metros con separadores, capta-faros y elementos auxiliares.

## Zona de aparcamiento y vallados

La explanación y plataforma del vial de acceso se ensanchará en el último tramo para albergar 10 plazas de aparcamiento en batería para el personal del Servicio y visitas. Hay dos plazas adicionales interiores al vallado que rodea el conjunto.



Figura 68. Obra de construcción de acceso al emplazamiento de Sardas

#### Acometida agua y electricidad

Los trabajos han incluido la instalación de una línea subterránea de alimentación eléctrica, un cuadro de distribución, y los nuevos circuitos interiores necesarios en las nuevas casetas (oficinas y vestuarios), incluyendo







- Protección magnetotérmica en el inicio de la línea.
- Línea de alimentación con cable multipolar de 10 mm² de sección, capaz para más de 30 kW, con una caída de tensión aceptable.
- Cuadro de distribución con dispositivos de protección para circuitos de A.C.S. y aire acondicionado.
- Circuitos para A.C.S. y aire acondicionado, así como de alimentación a circuitos de alumbrado y tomas de corriente.

La instalación se ejecutará desde el futuro cuadro eléctrico junto a la actual puerta del emplazamiento hasta la zona de los módulos blanco y negro y oficinas a unos 120 m de distancia. Provisionalmente se emplea un grupo electrógeno.

En cuanto a la acometida de agua, ésta se lleva enterrada desde la zona de bombeo de Sardas hasta la nueva zona de blanco y negro, en total más de 150 m de conducción enterrada. Se ha excavado una zanja con dos tubos corrugados de 110 mm. La tubería tiene un diámetro de 315 mm.

#### 7.3. OTRAS ACTUACIONES

#### Enero

- Creación de pista de acceso para los sondeos previstos en la parte alta del vertedero, (zona S39's).
- Montajes accesorios en los recintos destinados a purgados.
- Chequeo diario de todos los sistemas de bombeo de lixiviados y comprobación de ausencia de surgencias en la esquina norte del vaso de vertido.
- Adecuación de residuos generados.

### Febrero.

- Instalación de pantalán flotante en la balsa "antigua", para facilitar trabajos de muestreo de lodos, etc.
- Montajes accesorios en los recintos destinados a purgados.
- Reconexión de los puntos PS8 y PS15 al sistema de purgados y, junto con PS23, conexión a los depósitos compartimentados de decantación de fase libre previa.
- Chequeo diario de todos los sistemas de bombeo de lixiviados y comprobación de ausencia de surgencias en la esquina norte del vaso de vertido.
- Adecuación de residuos generados.







A 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021



Figura 69. Pantalán flotante instalado en la vieja balsa de lixiviados

#### Marzo.

- Limpieza de cuneta hormigonada al pie del vertedero mediante agua a presión y extracción de los lodos y restos vegetales acumulados para evitar el "taponamiento" del sistema.
- Extracción y limpieza del depósito compartimentado situado al pie del vertedero.
- Chequeo diario de todos los sistemas de bombeo de lixiviados y comprobación de ausencia de surgencias en la esquina norte del vaso de vertido.
- Adecuación de residuos generados.

## Abril

 Instalación de conexiones de purgado y soportes de la red de purgado de DNAPL en la parcela al pie del vertedero.

# Mayo

- Creación de arquetas y conexiones canalizadas en 4 puntos en la parte alta del vertedero, para su conexión a la red habitual de recuperación de DNAPL.
- Trabajos de instalación de depósito de agua de red de 10 m3 a situar en la parte de arriba de Sardas, para evitar los problemas de suministro.
- Trabajos previos para traslado de la caseta B/N dañada en la parte alta hacia dentro del recinto vallado.
- Montajes y conexiones finales zona planta superior de bombeo.

#### Junio

 Trabajos de instalación de depósito de agua de red de 10 m3 a situar en la parte de arriba de Sardas, para evitar los problemas de suministro.







A 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

- Trabajos previos para traslado de oficinas y vestuarios de EMGRISA a la parcela Norte el pie del vertedero, entre los que destacan la pista de acceso, conducciones asociadas a la instalación etc.
- Trabajos previos para traslado de la caseta B/N dañada en la parte alta hacia dentro del recinto vallado.

#### Julio

- Instalación de módulos e instalaciones necesarias en la nueva zona de oficinas y vestuarios situada en la parcela norte al pie del vertedero, incluye las conexiones necesarias de luz, agua etc.
- Instalación de nuevas conducciones en la red de "canaletas" al pie del vertedero.
- Instalación de grupo de presión para dar servicio a las líneas de agua situadas en la parte alta del vertedero tras la instalación del nuevo depósito.

#### Agosto

• Subsanación de pequeñas deficiencias detectadas en el nuevo depósito de suministro de agua de red situado en la parte alta del vertedero.

# Septiembre

o Asfaltado del vial de acceso a la nueva zona de vestuarios y oficinas.

#### Octubre

- Instalación de bionda de protección en la zona de acceso a las nuevas oficinas y vestuarios situados al pie del vertedero.
- Desbroce de las parcelas situadas al pie del vertedero.

### **Noviembre**

- Instalación de generador fijo para suministro de luz a la nueva zona de vestuarios y oficinas mientras no se disponga de electricidad en el emplazamiento.
- Limpieza de las líneas enterradas en la parcela al pie para la conducción de lixiviados.
- Limpieza de cuneta hormigonada al pie del talud mediante aspiración con apoyo de agua a presión.
- Trabajos de desbroce con maquinaria y manual en varias zonas del emplazamiento.

#### Diciembre

Finalización de pequeñas obras de mejora (arquetas, nuevas conexiones etc.).

De manera habitual, además, se realizan las siguientes actividades:

- Chequeo diario de todos los sistemas de bombeo de lixiviados y comprobación de ausencia de surgencias en la esquina norte del vaso de vertido.
- Adecuación de residuos generados.







A 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

## 7.4. INCIDENCIAS OCURRIDAS

El día 19 de mayo de 2021, durante los trabajos de purgado intensivo de los nuevos puntos incluidos dentro de la red de recuperación de DNAPL, se produjo la salpicadura de 2 operarios, por liberación repentina de la presión de una de las bombas neumáticas durante las tareas de mantenimiento de las mismas.

Los equipos de protección individual realizaron su función protegiendo correctamente a los trabajadores, siendo desechados tras el episodio. Este incidente motivó la parada de los trabajos.

El día 8 de diciembre de 2021, durante la campaña de desarrollos realizada de manera habitual en el emplazamiento, se produjo, durante la aspiración del punto SO3 una pequeña salpicadura de fluido impactado sobre el terreno, se detuvo el bombeo y se procedió a la limpieza exhaustiva de la zona afectada.







# 8. CONCLUSIONES Y PROPUESTAS DE MEJORA

#### 8.1. CONCLUSIONES

Dados los grandes avances que se han producido en el emplazamiento en los últimos años en cuanto a su caracterización y mejora de las instalaciones, en particular las de drenaje de escorrentías superficiales y subsuperficiales, así como las propias de bombeo y tratamiento y que han permitido mejorar la seguridad ambiental; durante 2021 y con el inicio del nuevo contrato de Seguimiento de Sardas 2020-2022, se ha producido un cambio cualitativo en el Servicio, dándose prioridad a la descontaminación y a la investigación de técnicas de tratamiento de suelos y aguas subterráneas.

Este cambio ha supuesto el fortalecimiento de la colaboración de los grupos de investigación que ya participaban en el Seguimiento (UCM tratamientos fisicoquímicos, UDC modelos matemáticos, UPM prospección geofísica, UCLM técnicas electrocinéticas y UAB técnicas de biorremediación) y la inclusión de IMIDRA con el inicio de investigación de técnicas de fitorremediación.

## Seguimiento Hidrogeológico y mejora de la seguridad ambiental

El control y seguimiento de la situación ambiental del vertedero de Sardas se llevado a cabo mediante la toma y análisis de cientos de muestras de aguas subterráneas, aguas superficiales, lixiviados, residuo libre y suelos. Se han analizado diversos parámetros, además las habituales concentraciones de compuestos organoclorados, también iones y metales, para control biológico, parámetros geotécnicos, etc. Asimismo, se han recogido miles de datos *in situ*, tanto manualmente como de forma automática.

Como en anteriores servicios y por evidentes motivos de seguridad y fiabilidad, la prioridad en cuanto al drenaje de aguas, lixiviados, fluidos de limpiezas, etc., es favorecer el movimiento por gravedad de los fluidos frente al bombeo.

Del seguimiento realizado se desprende que la situación ambiental del emplazamiento es estable respecto de años anteriores.

#### Descontaminación

La descontaminación del emplazamiento, en función de la naturaleza de la matriz (gravas, rellenos, etc.) y su grado de afección, se plantea como un tren de actuaciones que abarcan desde técnicas ya probadas y operativas, como el **bombeo de fase libre organoclorada** a través de los más de 15 pozos de bombeo que se viene realizando en el emplazamiento desde 2010; o su **extracción mejorada con surfactante** (SEAR por sus siglas en inglés), desarrollada en los últimos 5 años del Servicio; hasta otras técnicas en desarrollo o investigación como la oxidación química, la biorremediación o técnicas electrocinéticas.

Durante 2021 se ha extraído del subsuelo mediante bombeo, un total de 1.880 m³ de fluidos, la mayor parte correspondientes a lixiviados bombeados para el abatimiento del nivel en el vaso de vertido con el fin de evitar surgencias. Mediante bombeo se han extraído 38 m³ de fluidos desde los pozos mediante bombeos y 28 m³ mediante desarrollos con camión autoaspirante). 1,53 m³ corresponden a residuo libre organoclorado. El volumen acumulado de fase libre extraída es de unos 12 m³.







Se han tratado las aguas subterráneas mediante SEAR, *Surfactant Enhanced Aquifer Remediation*, por sus siglas en inglés. El tratamiento realizado entre abril y octubre de 2021, ha consistido en la ejecución de 8 eventos de inyección de una solución con surfactante en el acuífero y el posterior bombeo y tratamiento.

## Investigación de técnicas de tratamiento

Las líneas generales de acción anteriormente descritas para la descontaminación, así como la complejidad técnica en general del emplazamiento confieren un claro carácter multidisciplinar al Servicio de Seguimiento hidrogeológico de Sardas que EMGRISA ha potenciado con la incorporación a su equipo de varios grupos de investigación de ámbito universitario especialistas en sus respectivos campos:

- Grupo de investigación IMPROQUIMA (INtensificación de PROcesos de interés QUImico y MedioAmbiental) de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Complutense de Madrid con la coordinación de Aurora Santos.
- Laboratorio de Ingeniería Electroquímica y Ambiental (Electrochemical & Environmental Engineering
   Lab E3L) de la Universidad de Castilla la Mancha con Manuel Rodrigo
- Grupo de Investigación Consolidado de Degradación de Contaminantes Industriales y Valorización de Residuos del Departamento de Ingeniería Química, Biológica y Ambiental de la Universidad Autónoma de Barcelona (DIQBA) coordinado por Teresa Vicent.
- Instituto Madrileño de Investigación y Desarrollo Rural, Agrario y Alimentario (IMIDRA), con Carmen Lobo.

En relación con la investigación de técnicas de tratamiento se han tomado y analizado cientos de muestras de aguas subterráneas, lixiviados, fase libre y suelos para aportar datos a los grupos de investigación; se han llevado a cabo ensayos en laboratorio de técnicas electrocinéticas con suelo real y con maquetas de suelo.

Se ha llevado a la práctica la extracción mejorada con surfactantes (SEAR) con la validación de la aplicabilidad de la técnica en el aluvial del Gállego y la mejora en el ajuste de dosificaciones, caudales y tiempos. En cuanto a técnicas electrocinéticas se ha continuado con la realización de ensayos con suelos reales y en maquetas con la obtención de parámetros para el diseño y la validación de la metodología de los ensayos.

#### Mejora del modelo conceptual

La mejora continua del modelo conceptual del vertedero y su entorno inmediato con el trabajo de caracterización e interpretación continuo y el empleo de modelos matemáticos es fundamental para confirmar el correcto análisis de la situación y optimizar la gestión ambiental del emplazamiento.

Para ello se ha ampliado la red de control con la perforación de 27 nuevos sondeos con un total de 469 m de perforación que ha permitido la mejora de la caracterización, la reducción de incertidumbres, así como la inclusión de nuevos puntos significativos en el control analítico rutinario.

Destaca la mejora de la caracterizado los suelos bajo la carretera N330, que intersecta el emplazamiento, mediante la perforación de 11 sondeos sobre el terraplén de la carretera en su margen descendente (oeste).







A 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

En la mejora del modelo conceptual del vertedero de Sardas, han intervenido el grupo de investigación AQUATERRA (Gestión Sostenible de Recursos Hídricos y del Suelo) de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de A Coruña, dirigido por **Javier Samper**, para el desarrollo de modelos matemáticos de flujo de aguas subterráneas en continuidad con lo realizado en 2020.

- Actualización de los modelos de flujo
- Cuantificación del flujo másico de los contaminantes que salen del vertedero y del flujo másico de salida de los contaminantes del emplazamiento de Sardas a través de las gravas del aluvial hacia el embalse
- Identificación, delimitación y cuantificación de las principales zonas de entrada de agua al vertedero de Sardas
- Modelos de los ensayos de trazadores, ensayos ISCO y ensayos con surfactantes

#### Mantenimiento y mejora de las instalaciones

Entre las principales actuaciones relacionadas con la mejora de las instalaciones del emplazamiento y su mantenimiento destacan la construcción de un nuevo vial de acceso al emplazamiento, la instalación de las oficinas y vestuarios blanco y negro en Sardas, así como la colocación de un depósito de agua potable y la reubicación del blanco y negro de la parte alta del vertedero.

Además se ha realizado una limpieza general de las cunetas perimetrales del vertedero incluyendo el desbroce de la vegetación más próxima para facilitar el correcto drenaje de las aguas superficiales.

#### Resultados del Seguimiento

Los resultados y conclusiones más destacados del seguimiento Hidrogeológico de Sardas en 2021 son los siguientes:

- La situación ambiental del emplazamiento es estable respecto de años anteriores
- Se mantienen valores similares en orden de magnitud de concentraciones de compuestos organoclorados en aguas en el aluvial en la zona cercana al embalse de Sabiñánigo.
- No se han detectado valores elevados en las concentraciones de las aguas superficiales en la cárcava aneja al emplazamiento durante el período de referencia.
- Durante 2021 se han extraído en el año 2021 mediante bombeo, un total de 1.880 m³ de fluidos de los cuales 1,53 m³ corresponden a residuo libre
- El volumen extraído acumulado de fase libre extraída es de unos 12 m<sup>3</sup>
- Se ha avanzado notablemente en la investigación de técnicas de tratamiento y su aplicabilidad al emplazamiento particularmente en las siguientes:
  - o Biorremediación. Se han obtenido resultados prometedores en la valoración de las posibilidades de tratamiento biológico de las aguas subterráneas del aluvial del Gállego.
  - Extracción mejorada con surfactantes (SEAR) con la validación de la aplicabilidad de la técnica en el aluvial del Gállego y el ajuste de dosificaciones, caudales y tiempos
  - Técnicas electrocinéticas con la realización de ensayos con suelos reales, la obtención de los primeros parámetros para el diseño y la validación de la metodología de los ensayos.







- La investigación en técnicas de fitorremediación de los rellenos del emplazamiento se ha iniciado durante este año.
- La construcción del drenaje de cabecera ha permitido reducir las entradas de aguas en el vaso de vertido en más de 500 m<sup>3</sup>.
- Se ha fortalecido el modelo conceptual del emplazamiento reduciendo incertidumbres en cuanto a la presencia de fase libre que ha sido mejor acotada en la parcela al pie del vertedero y bajo la carretera N-330, con la perforación de nuevos sondeos.

# 8.2. PRÓXIMAS ACTUACIONES Y PROPUESTAS DE MEJORA.

A continuación, se detallan los trabajos y mejoras adicionales que están en fase de estudio o en desarrollo, y que se ejecutarán próximamente:

#### Extracción y delimitación de DNAPL

- Mejora de la caracterización del emplazamiento en cuanto a la presencia de fase libre con la perforación de sondeos en la zona del frente del vertedero y la carretera N-330.
- Priorizar y mejorar la extracción de fase libre con la inclusión de nuevos puntos de bombeo.
- Continuar favoreciendo el **movimiento de los fluidos** en el emplazamiento **por gravedad**, evitando en la medida de lo posible el empleo de bombeo, lo que redunda en una mayor seguridad ambiental además del consiguiente ahorro energético.

#### Drenajes de aguas subsuperficiales

- Evaluar la efectividad del nuevo drenaje de aguas subsuperficiales en zona de entradas (zona de los pozos S35) con el seguimiento de año hidrológico completo.
- Mejorar el drenaje de las aguas subsuperficiales en el frente del vertedero (zona de pantalla frontal) para evitar la recarga y contaminación de aguas bajo el terraplén de la carretera.

#### Mejora de la caracterización.

Para el Servicio de Seguimiento de Sardas 2021, se debería mejorar la caracterización de:

- la zona bajo el terraplén de la carretera y su entorno inmediato al pie del vertedero. Esta zona continúa siendo una prioridad. El pozo S23, es el de mayor rendimiento en el bombeo de fase libre organoclorada
- los **lodos de colmatación del embalse** que juegan un papel importante en cuanto al intercambio de aguas entre acuífero-embalse y no se dispone prácticamente de datos acerca de ellos.







A 513009-475 – Seguimiento hidrogeológico Sardas. Memoria anual 2021

#### Otras mejoras y propuestas

- Favorecer la coordinación e integración de grupos de investigación para la mejora del modelo conceptual del emplazamiento, así como para la investigación de técnicas de tratamiento.
- Continuar el estudio de tratamientos con técnicas de SEAR, S-ISCO, electrocinéticas y biológicas (incluyendo fitorremediación).
- Estudiar y diseñar posibles mejoras en los drenajes de aguas en la zona de cabecera del vertedero para minimizar las potenciales entradas de aguas en este.
- Instalación de un nuevo punto de medida del nivel del embalse.

	Madrid 31 de marzo de 2022
Realizado por:	
Jorge Gómez	Joaquín Guadaño
Técnico de Provecto	Jefe de Provecto