



Cofinanciado por
la Unión Europea



MINISTERIO
DE HACIENDA



Fondos Europeos



GOBIERNO
DE ARAGON

MEMORIA ANUAL 2024

Servicio de Seguimiento Hidrogeológico de Bailín, Sabiñánigo (Huesca). Años
2024-2026

Expediente AGM_DGCC_2023_MY8

Gobierno de Aragón

Número proyecto: 60737204
Nº registro informe: 2025/041

Enero 7 2025

Preparado por

Ane Legardón
Técnica de proyecto

Revisado por

Tatiana Alonso
Jefa de Proyecto

Verificado por

David Alcalde
Director de Proyecto

Aprobado por

Tatiana Alonso
Jefa de Proyecto

Historial de revisión

Revisión	Fecha de revisión	Detalles	Autorizado	Nombre	Posición

Lista de distribución

#Copias impresas	PDF requerido	Asociación/ Nombre de la compañía

Preparado para:

Gobierno de Aragón

Preparado por:

Ane Legardón

AECOM Spain DCS S.L.

c/ Alfonso XII, 62

5ª planta

28014 Madrid

España

T: + 34 915 487 790

aecom.com

© 2025 AECOM Spain DCS S.L. Todos los Derechos Reservados.

Este documento ha sido preparado por AECOM Spain DCS S.L. ("AECOM") para único uso del cliente (el "Cliente") en relación con los principios de consultoría, aceptados de manera general; el presupuesto de tasas y los términos de referencia acordados entre AECOM y el Cliente. Cualquier información proporcionada por terceros y mencionada a los presentes que no ha sido verificada por AECOM, a excepción de que se declare lo contrario en el documento. Ningún tercero podrá apoyarse en el presente documento sin la autorización y un acuerdo escrito de AECOM.

Contenidos

1.	Introducción	1
2.	Actuaciones de seguimiento y control	2
2.1	Registro de precipitaciones.....	2
2.2	Campañas de medición de niveles de agua subterránea y espesores aparentes de DNAPL	3
2.3	Extracción de DNAPL y agua contaminada	8
2.4	Control de caudales.....	11
2.5	Campañas de muestreo semestral	13
2.6	Campañas de muestreo mensual.....	23
2.7	Seguimiento del sistema de drenaje ubicado en la Zona 0.....	28
3.	Campañas de conductividad y temperatura	31
4.	Actuaciones de mantenimiento.....	34
4.1	Actuaciones de mantenimiento correctivo	34
4.2	Actuaciones de mejora de las instalaciones	35
4.3	Otros trabajos	35
4.4	Adecuación del sistema de remediación en Zona Ermita	35
4.5	Sustitución y mejora de la planta de tratamiento por sosa en Zona Industrial	37
5.	Perforación de sondeos.....	38
5.1	Sondeos Zona 0 y Barranco 3	38
5.2	Sondeos capa M Zona Barranco 3	51
5.3	Nivelación topográfica.....	56
6.	Ensayos hidráulicos.....	57
6.1	Ensayo de Bombeo en Zona 0	57
6.2	Ensayo de inyección de trazadores	59
7.	Ensayos de infiltración en zona vadosa	61
7.1	Introducción y antecedentes	61
7.2	Ensayo preliminar de columnas	62
7.3	Ensayos de infiltración	72
8.	Ensayos de biorremediación	84
8.1	Trabajos de biorremediación desarrollados en laboratorio	85
8.2	Ensayos piloto de biorremediación en campo	102

Anexos

Anexo A Red de control de niveles

Anexo B Inventario

Anexo C Reportaje fotográfico

Anexo D Planos

Anexo E Perforación de sondeos

Anexo F Ensayo de bombeo

Anexo G Ensayo de trazadores

Figuras

Figura 1. Distribución de la presencia de DNAPL acumulado en sondeos en los últimos años.....	6
Figura 2. Distribución de la conductividad, redox y pH en profundidad capa M (abril 2024).....	16
Figura 3. Distribución de la conductividad, redox y pH en profundidad la capa M (octubre 2024).....	16
Figura 4. Distribución de la afección por benceno. Vista en planta (abril y octubre 2024).....	18
Figura 5. Distribución de la afección por monoclorobenceno. Vista en planta (abril y octubre 2024).....	18
Figura 6. Distribución de la afección por benceno, monoclorobenceno y HCH total. Vista en planta (abril y octubre 2024).....	19
Figura 7. Distribución de la afección por benceno, clorobenceno y HCH total. Vista en perfil de la capa M (abril 2024).....	20
Figura 8. Distribución de la afección por benceno, clorobenceno y HCH total. Vista en perfil de la capa M (octubre 2024).....	20
Figura 9. Ubicación de los sondeos incluidos en la campaña mensual de muestreo.....	24
Figura 10. Sistema de drenaje zona 0 esquematizado.....	28
Figura 11. Fotografías de las 3 arquetas del sistema de drenaje de la Zona 0.....	28
Figura 12. Distribución de la temperatura. Campaña agosto 2024.....	32
Figura 13. Distribución de la temperatura. Campaña diciembre 2024.....	32
Figura 14. Distribución de la conductividad. Campaña agosto 2024.....	33
Figura 15. Distribución de la conductividad. Campaña diciembre 2024.....	33
Figura 16. Imágenes de trabajos efectuados para la adecuación de los equipos en Zona Ermita.....	36
Figura 17. Imágenes de trabajos efectuados para la instalación de la planta de sosa.....	38
Figura 18. Localización de los piezómetros perforados en la campaña de marzo-mayo.....	39
Figura 19. Testigo de 21 m a 23,3 m de P228. Redondeadas en rojo las fracturas con restos de DNAPL.....	40
Figura 20. Fracturas con presencia de DNAPL a 25,9 m, 26,1 m y 26,55 m.....	41
Figura 21. Cuña de limolita de 9,4 a 10,4 m entre arenisca de la capa M.....	42
Figura 22. Fracturas con DNAPL a 13,9 m.....	42
Figura 23. Testigo de 13,7 a 15,9 m. Redondeado en rojo las fracturas con DNAPL.....	43
Figura 24. Testigo de 13,6 a 15,8 m. Redondeado en rojo fracturas con restos de DNAPL.....	44
Figura 25. Fractura a 32,45 m con presencia de fase libre.....	47
Figura 26. Perfil capa M con distribución litológica y de fracturación en profundidad.....	47
Figura 27. Perfil capa M con distribución litológica y de fracturación en profundidad. Vías de circulación preferente del DNAPL.....	49
Figura 28. Localización de los nuevos sondeos en el entorno del Barranco 3.....	51
Figura 29. Fractura a 8,3 m con gotas de fase.....	52
Figura 30. Testigos de 7,1 a 8,8 m. Se señalan las fracturas con presencia de fase.....	53
Figura 31. Inclusión de arenisca de grano muy grueso con cantos calcínicos dispersos a 16,5 m de profundidad.....	53
Figura 32. Fractura a 9,75 m con relleno de arena y materia orgánica con ligero olor.....	54
Figura 33. Testigo de 13,8 a 16 m, en su totalidad arenisca, con cantos dispersos de tipo calcínico.....	55
Figura 34. Perfil de los nuevos sondeos en la capa M con distribución litológica y de fracturación en profundidad.....	55
Figura 35. Unidad móvil para la ejecución del ensayo hidráulico.....	57
Figura 36. Resultados del ensayo de bombeo para los diferentes métodos de interpretación.....	58
Figura 37. Perfil sondeos zona de ensayo.....	60
Figura 38. Ubicación de la balsa de infiltración en el vaso.....	61
Figura 39. Estructura fabricada para la realización de los ensayos de columna (a la derecha, con las columnas llenas de grava).....	62
Figura 40. Preparación de las mezclas para el ensayo 1.....	63
Figura 41. Ejecución del segundo ensayo de columnas.....	65
Figura 42. Preparación del tercer ensayo de columnas.....	68
Figura 43. Ejecución del tercer ensayo de columnas.....	69
Figura 44. Preparativos para el ensayo de la balsa de infiltración.....	73
Figura 45. Resumen de mezcla por el talud de la plataforma del sondeo P195.....	74
Figura 46. Puntos por donde filtró la mezcla en la plataforma del P195 bajo la balsa.....	74
Figura 47. Procedimiento para la toma de muestras en los ensayos aeróbicos en el MiniBio.....	89
Figura 48. Trabajos de preparación de los ensayos aeróbicos del MiniBio.....	90
Figura 49. Evolución de las concentraciones microbiológicas en los diferentes ensayos.....	90
Figura 50. Evolución de las concentraciones de los isómeros de HCH en los diferentes ensayos.....	91
Figura 51. Configuración de los ensayos anaeróbicos en el MiniBio.....	92

Figura 52. Siembras microbiológicas en medio anaeróbico realizadas en los ensayos 93

Figura 53. Evolución de la concentración de microorganismos durante los ensayos anaeróbicos 95

Figura 54. Trabajos de preparación de los ensayos de secuencia en el MiniBio en el laboratorio 96

Figura 55. Trabajos de muestreo en el emplazamiento para el análisis de secuenciación de ADN 101

Figura 56. Ubicación del sondeo P186 para el ensayo ISBR 102

Figura 57. Esquema y fotografías del sistema ISBR 102

Figura 58. Trabajos previos asociados al ensayo ISBR 103

Figura 59. Siembras microbiológicas realizadas en el ensayo ISBR 104

Figura 60. Muestreo microbiológico para el análisis de ADN 105

Figura 61. Ubicación del ensayo de bioestimulación en Zona de Barrera 110

Figura 62. Fabricación de los sistemas de biorremediación del ensayo de Zona de Barrera 110

Figura 63. Ajuste de dosificación de aire, pruebas de inyección y funcionamiento del sistema 111

Figura 64. Biomasa encontrada en el sondeo I1 durante el ensayo analizada en el laboratorio de Bailín 114

Figura 65. Muestras enviadas a GAIKER para secuenciación de ADN 114

Figura 66. Secuencia de trabajos microbiológicos efectuados en Bailín 118

Figura 67. Ubicación del biorreactor aeróbico de campo 118

Figura 68. Pruebas de funcionamiento del biorreactor aeróbico de campo 119

Figura 69. Muestreo de condiciones iniciales y análisis microbiológicos 120

Figura 70. Siembras microbiológicas asociadas al ensayo del biorreactor aeróbico de campo 120

Gráficas

Gráfica 1. evolución de la precipitación (1 enero-31 diciembre 2024) 2

Gráfica 2. Evolución de la precipitación anual (2014 a 2024) 2

Gráfica 3. Evolución de niveles de agua en el Vaso/zona 0 (1 enero-31 diciembre 2024) 3

Gráfica 4. Evolución de niveles de agua en el Barranco 3 (1 enero-31 diciembre 2024) 4

Gráfica 5. Evolución de niveles de agua en la Zona de Barrera (1 enero-31 diciembre 2024) 4

Gráfica 6. Evolución de niveles de agua en Barranco 4 (1 enero-31 diciembre 2024) 4

Gráfica 7. Evolución de niveles aguas abajo en Barranco 4/Zona de Descarga (1 enero-31 diciembre 2024) 5

Gráfica 8. Evolución de niveles de agua en sondeos de capa O en Zona de Barrera (1 enero-18 diciembre 2024) 6

Gráfica 9. Evolución espesores aparentes DNAPL sondeos Zona 0 (1 enero-31 diciembre 2024) 7

Gráfica 10. Evolución espesores aparentes DNAPL sondeos Zona 0 – Barranco 3 (1 enero-31 diciembre 2024) 7

Gráfica 11. Volúmenes de agua y DNAPL extraídos (l) por capa en 2024 8

Gráfica 12. Volúmenes de agua y DNAPL extraídos (l) por sondeo en 2024 8

Gráfica 13. Evolución del volumen de DNAPL extraído desde 2010 9

Gráfica 14. Masa extraída contaminantes principales por capa y zona (g) en bombeos agua subterránea 10

Gráfica 15. Masa extraída contaminantes principales por capa y zona (g) en bombeos DNAPL 11

Gráfica 16. Evolución de caudales estación aforo A319 - Río Gállego (1 enero-31 agosto 2024) 12

Gráfica 17. Evolución de caudales estación aforo A312 – Barranco Bailín (1 enero-31 agosto 2024) 12

Gráfica 18. Evolución de precipitación vs eventos de muestreo del año 2024 13

Gráfica 19. Distribución de la concentración promedio de benceno por zona (abril 2023-octubre 2024) 21

Gráfica 20. Distribución de la concentración promedio de monoclorobenceno por zona (abril 2023-octubre 2024) 21

Gráfica 21. Distribución de la concentración promedio de los clorobencenos (>1 Cl) por zona (abril 2023-octubre 2024) 22

Gráfica 22. Distribución de la concentración promedio de HCH total por zona (abril 2023-octubre 2024) 22

Gráfica 23. Evolución de las proporciones en los diferentes compuestos campañas semestrales muestreo (noviembre 2010-octubre 2024) 23

Gráfica 24. Evolución de las concentraciones de benceno en P222, P129 y P171 (julio 2016-octubre 2024) 25

Gráfica 25. Evolución de las concentraciones de monoclorobenceno en P222, P129 y P171 (julio 2016-octubre 2024) 25

Gráfica 26. Evolución de las concentraciones de HCH total en P222, P129 y P171 (julio 2016-octubre 2024) 25

Gráfica 27. Evolución de las concentraciones de benceno, clorobenceno y HCH total en los sondeos P140, P142 y P126 (octubre 2015-diciembre 2024) 27

Gráfica 28. Evolución de caudales (m³/día) y concentraciones de HCH total (µg/l) en las Arquetas 2 y 3 de la Zona 0 (junio 2023-junio 2024) 30

Gráfica 29. Evolución del volumen de mezcla recuperado en el tiempo (ensayo 1)	64
Gráfica 30. Evolución del volumen de mezcla recuperado en el tiempo vs viscosidad (ensayo 1)	64
Gráfica 31. Evolución del volumen de mezcla recuperado en el tiempo (ensayo 2)	66
Gráfica 32. Evolución de la concentración de Emulse (ensayo 2)	67
Gráfica 33. Evolución de la concentración de los contaminantes (ensayo 2)	67
Gráfica 34. Evolución del volumen de mezcla recuperado en el tiempo (ensayo 3)	70
Gráfica 35. Evolución de la concentración de Emulse (ensayo 3)	70
Gráfica 36. Evolución de la concentración de los contaminantes (ensayo 3)	71
Gráfica 37. Evolución de la concentración de bromuro en P81 (sonda vs Pirenarium).....	75
Gráfica 38. Evolución de la conductividad en profundidad en los sondeos de monitorización	76
Gráfica 39. Evolución de la concentración de surfactante en P196	76
Gráfica 40. Evolución de la concentración de contaminantes en P198.....	77
Gráfica 41. Evolución de la concentración de contaminantes en P171.....	77
Gráfica 42. Evolución de benceno y monoclorobenceno en P196	77
Gráfica 43. Evolución de HCH total en P196	78
Gráfica 44. Evolución de la concentración de bromuro (Pirenarium)	79
Gráfica 45. Evolución de la concentración de bromuro (sonda campo).....	79
Gráfica 46. Evolución de la conductividad en profundidad en los sondeos de monitorización	80
Gráfica 47. Evolución de la concentración de contaminantes en P198 y P171	81
Gráfica 48. Evolución de la concentración de contaminantes en P196.....	81
Gráfica 49. Evolución de la concentración de contaminantes en P195.....	82
Gráfica 50. Evolución de la concentración de contaminantes en el talud de P195	82
Gráfica 51. Comparación de la evolución de contaminantes en P196 ensayo junio vs noviembre	83
Gráfica 52. Evolución de la concentración microbiana en las muestras M1 y M2.....	86
Gráfica 53. Evolución de las concentraciones de los isómeros de HCH en M1 y M2	87
Gráfica 54. Evolución de las concentraciones de los isómeros de HCH en diferentes muestreos de P177	87
Gráfica 55. Evolución de las concentraciones de benceno y clorobenceno en la prueba de viabilidad y en la prueba de variabilidad.....	88
Gráfica 56. Resultados de disminución de los isómeros de HCH en los ensayos anaeróbicos	94
Gráfica 57. Evolución de los isómeros de HCH en los ensayos E4, E7, Secuencia 2 y Secuencia 3.....	97
Gráfica 58. Evolución de la concentración de microorganismos en los diferentes ensayos comparados en condiciones de siembra aeróbica y anaeróbica	99
Gráfica 59. Evolución de la concentración de oxígeno disuelto durante el ensayo.....	103
Gráfica 60. Evolución de las concentraciones de microorganismos durante el ensayo ISBR en P186	104
Gráfica 61. Evolución de las concentraciones de microorganismos durante el ensayo ISBR en P179N.....	104
Gráfica 62. Evolución concentración genes funcionales/microorganismos (vía anaerobia) en P186.....	106
Gráfica 63. Concentración genes funcionales/microorganismos (vía anaerobia) celdas sistema ISBR.....	106
Gráfica 64. Evolución de las concentraciones de isómeros de HCH en P186	107
Gráfica 65. Evolución de las concentraciones de isómeros de HCH en P179N	108
Gráfica 66. Evolución de las concentraciones de benceno y clorobencenos en P186.....	108
Gráfica 67. Evolución de concentración de nutrientes en los sondeos de actuación	111
Gráfica 68. Evolución de la concentración de oxígeno disuelto durante el ensayo.....	112
Gráfica 69. Evolución de la concentración microbiológica durante el ensayo en I1 y O1	112
Gráfica 70. Evolución de concentración microbiológica durante en ensayo en O2, I1S y O1S	113
Gráfica 71. Clasificación taxonómica de géneros encontrados en la secuenciación de ADN	115
Gráfica 72. Evolución de a-HCH y e-HCH por días durante el ensayo en I1 y O1.....	116
Gráfica 73. Evolución de a-HCH y e-HCH por días durante el ensayo en O2, I1S y O1S	117

Tablas

Tabla 1. Volúmenes de agua extraídos y concentraciones promedio por zona y capa en 2024	9
Tabla 2. Volúmenes de DNAPL extraídos y proporción promedio contaminantes en las muestras de DNAPL analizadas en 2017	10
Tabla 3. Estaciones de aforo ubicadas en el entorno del emplazamiento.....	11
Tabla 4. Valores estadísticos estaciones de aforo Bailín año 2024.....	12
Tabla 5. Muestras tomadas en la campaña de abril de 2024	14
Tabla 6. Muestras tomadas en la campaña de octubre de 2024	15
Tabla 7. Resultados analíticos (µg/l) muestras de contraste (abril 2024).....	23

Tabla 8. Resultados analíticos (µg/l) muestras de contraste (octubre 2024).....	23
Tabla 9. Distribución de ORCs en los sondeos de control	25
Tabla 10. Caudales medidos en el sistema de drenaje Zona 0 en m ³ /día (enero-agosto 2024)	29
Tabla 11. Concentraciones de benceno, clorobenceno y HCH total (enero-diciembre 2024)	29
Tabla 12. Profundidad de los sondeos realizados en la campaña de marzo-mayo.....	39
Tabla 13. descripción litológica del sondeo P228.....	40
Tabla 14. Descripción litológica del sondeo P229	40
Tabla 15. Descripción litológica del sondeo P230	41
Tabla 16. Descripción litológica del sondeo P231	42
Tabla 17. Descripción litológica del sondeo P232	43
Tabla 18. Descripción litológica del sondeo P233	44
Tabla 19. Descripción litológica del sondeo P234	44
Tabla 20. Descripción litológica del sondeo P235	45
Tabla 21. Descripción litológica del sondeo P236	45
Tabla 22. Descripción litológica del sondeo P237	45
Tabla 23. Descripción litológica del sondeo P238	45
Tabla 24. Descripción litológica del sondeo P239	46
Tabla 25. Descripción litológica del sondeo P240	46
Tabla 26. Suma de COCs (mg/kg) y de techo y base de lasca, por fractura muestreada en los nuevos sondeos de la capa M.....	48
Tabla 27. Parámetros fisicoquímicos (30 mayo 2024).....	50
Tabla 28. Concentraciones de benceno, clorobenceno y HCH total (30 mayo 2024)	50
Tabla 29. Parámetros fisicoquímicos (23 septiembre 2024).....	50
Tabla 30. Concentraciones de benceno, clorobenceno y HCH total (23 septiembre 2024)	50
Tabla 31. Características de los sondeos realizados en la campaña de noviembre	52
Tabla 32. Descripción litológica del sondeo P241	52
Tabla 33. Descripción litológica del sondeo P242	53
Tabla 34. Descripción litológica del sondeo P243	54
Tabla 35. Descripción litológica del sondeo P244	54
Tabla 36. Parámetros fisicoquímicos (15 enero 2025)	56
Tabla 37. Concentraciones de benceno, clorobenceno y HCH total (15 enero 2025)	56
Tabla 38. Coordenadas UTM ETRS89 y profundidades de los nuevos sondeos.....	56
Tabla 39. Características de los sondeos empleados en el ensayo de bombeo	57
Tabla 40. Resumen sondeos y parámetros monitorización ensayo	59
Tabla 41. Llegada de trazadores a los pozos monitorizados y su comunicación hidráulica	60
Tabla 42. Preparación de 4 condiciones diferentes para el primer ensayo	63
Tabla 43. Viscosidad de las mezclas (ensayo 1).....	63
Tabla 44. Preparación de 4 condiciones diferentes para el segundo ensayo.....	65
Tabla 45. Resultados muestreos control C3 ensayo 2	66
Tabla 46. Resultados muestreos control C3 ensayo 2	66
Tabla 47. Resultados muestreos control C4 ensayo 2	66
Tabla 48. Preparación de 4 condiciones diferentes para el tercer ensayo	69
Tabla 49. Viscosidad de las mezclas (ensayo 3).....	69
Tabla 50. Resultados muestreo DNAPL.....	70
Tabla 51. Evolución del ensayo de infiltración.....	73
Tabla 52. Dosificaciones para los ensayos aeróbicos del MiniBio.....	89
Tabla 53. Ensayos de secuencia y correspondencia con los ensayos anteriores realizados	97
Tabla 54. Características de sondeos y profundidades muestreadas	100
Tabla 55. Genes funcionales y microorganismos relacionados con vías de degradación anaeróbica para los principales contaminantes presentes en el acuífero de Bailín	105
Tabla 56. Concentraciones y relación C:N:P previa al ensayo de bioestimulación en los sondeos de actuación	110

1. Introducción

El presente documento, elaborado por AECOM SPAIN DCS S.L. (en adelante, AECOM), corresponde a la Memoria Anual del año 2024. En este informe se detallan y analizan los trabajos realizados entre el día 1 de enero y 31 de diciembre de 2024, se interpretan los datos obtenidos y se describen las principales conclusiones extraídas.

Entre el 1 de enero y el 7 de septiembre de 2024, los trabajos se engloban en el marco del **Servicio de Seguimiento Hidrogeológico de Bailín, Sabiñánigo (Huesca)**, Prórroga de 1 de mayo de 2023 a 7 de septiembre de 2024, con N° de Expediente 1404-4422-2019/18, y del 8 de septiembre al 31 de diciembre de 2024, forman parte de un nuevo contrato, correspondiente al **Seguimiento Hidrogeológico de Bailín, Sabiñánigo (Huesca). Años 2024-2026**, con N° de expediente AGM_DGCC_2023_MY8.

Las actuaciones de la presente memoria se incluyen dentro de la actuación AGMA02 "**Descontaminación y rehabilitación de los espacios contaminados por los residuos del lindano en Aragón**" del Objetivo Político 2 del Programa FEDER Aragón 2021-2027.

A continuación, se resumen las distintas actuaciones llevadas a cabo en el periodo de referencia:

Actuaciones de seguimiento y control

- Recopilación de datos meteorológicos de la estación instalada por el Gobierno de Aragón en el emplazamiento.
- Campañas periódicas de medición de niveles de agua y fase libre densa no acuosa (en adelante, DNAPL) mediante sonda hidronivel y obtención de datos de nivel en continuo mediante medidores de presión (en adelante, *divers*) y sensores de nivel (LORA).
- Extracción de agua subterránea y DNAPL en sondeos conectados a la red de bombeo.
- Control de caudales en las estaciones de aforo de la CHE situadas en el Barranco de Bailín y río Gállego a la altura de la descarga de la capa M.
- Muestreos de control mensual en los sondeos P126, P140 y P142 de la Zona de Descarga y los sondeos P222, P129 y P171 en distintas zonas del emplazamiento.
- Aforados y muestreos del sistema de drenaje de la Zona 0.
- Campañas semestrales de muestreo en sondeos seleccionados por todo el emplazamiento.
- Campañas semestrales de conductividad y temperatura en todos los piezómetros del emplazamiento.
- Campañas de perforación de sondeos en Zona 0 y de Zona 0 a Barranco 3.

Otros trabajos

- Actuaciones de mantenimiento preventivo programadas dentro del calendario anual.
- Actuaciones de mantenimiento correctivo y mejora de las instalaciones.
- Desarrollo de sondeos.
- Obra civil.
- Ensayo de bombeo en Zona 0.
- Ensayo de trazadores en la capa M.
- Ensayos de infiltración de surfactante en la balsa del vaso desmantelado.

Trabajos relacionados con la biorremediación

- Ensayo piloto de bioestimulación en Zona de Barrera.
- Ensayos de estimulación microbiana en condiciones aeróbicas y anaeróbicas en laboratorio.
- Ensayo de viabilidad microbiológica y variabilidad entre muestras.
- Ensayo de biorreactor anaeróbico en campo.
- Ensayo de biorreactor aeróbico en campo.

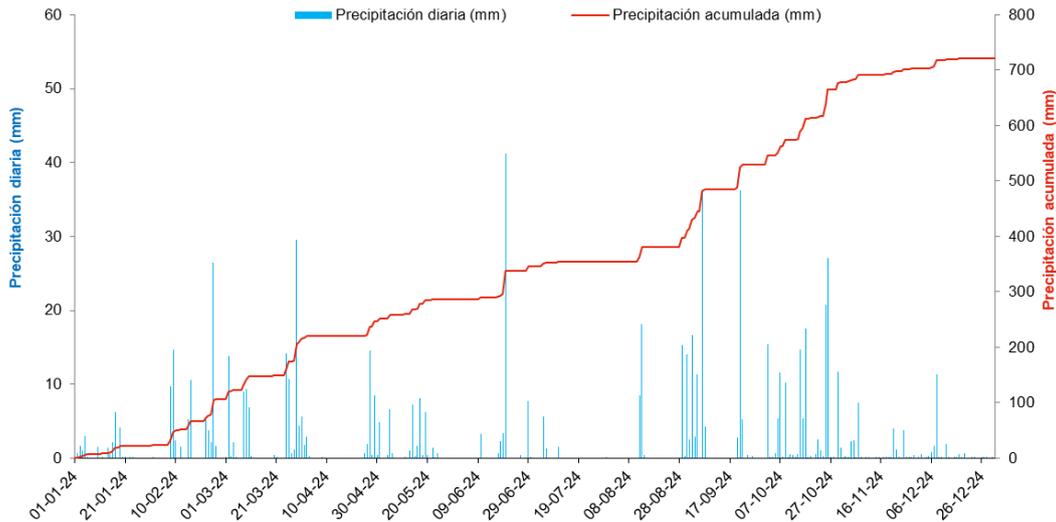
2. Actuaciones de seguimiento y control

2.1 Registro de precipitaciones

En el emplazamiento se ubica una estación meteorológica que toma datos diarios de precipitación, temperatura, humedad, radiación, etc. Estos registros se encuentran disponibles para su visualización en la aplicación web <https://webtrans.geonica.com/index.php?idioma=spanish>, accesible mediante un código de usuario y una contraseña facilitados por la Dirección Facultativa¹.

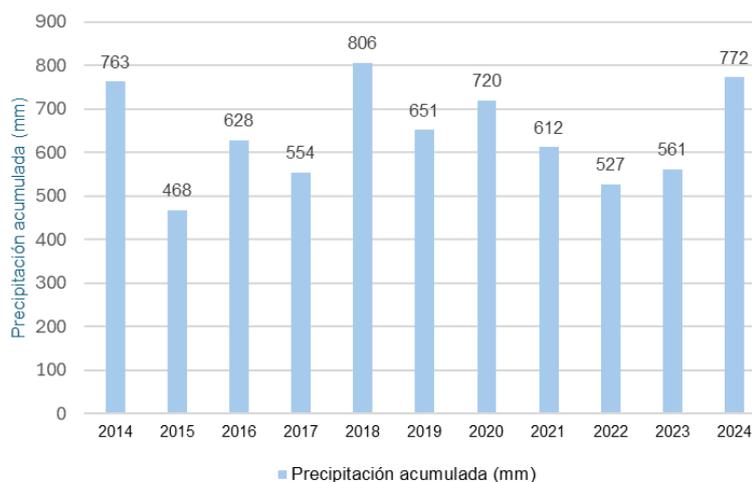
En la siguiente gráfica se presenta la evolución de la precipitación diaria y la precipitación acumulada durante el año 2024.

Gráfica 1. evolución de la precipitación (1 enero-31 diciembre 2024)



Este año 2024, se ha caracterizado por un alto régimen de precipitaciones, como se puede observar en la gráfica inferior, donde se compara la precipitación acumulada en los últimos 10 años. La precipitación acumulada este año ha sido de 772 mm. Esta cifra se encuentra significativamente por encima de la media registrada en los últimos 10 años, la cual se sitúa en unos 642 mm.

Gráfica 2. Evolución de la precipitación anual (2014 a 2024)



¹ Los datos tomados por la estación meteorológica vienen reflejados en horario solar, habiendo por tanto un desfase con la hora oficial que depende de la estación del año (2 horas en horario de verano y 1 hora en horario de invierno).

2.2 Campañas de medición de niveles de agua subterránea y espesores aparentes de DNAPL

Las campañas de medición de niveles de agua subterránea y DNAPL están establecidas de acuerdo con la representatividad de los datos hidrogeológicos, de manera que los sondeos que presentan una mayor rapidez de respuesta tanto a la recarga como a las variaciones en la calidad química del agua subterránea, así como aquellos que suelen presentar espesores aparentes de DNAPL, se miden con una mayor frecuencia.

Las mediciones se llevan a cabo generalmente mediante sonda hidronivel. No obstante, en aquellas zonas donde se ha comprobado que se obtiene una información relevante del modelo hidrogeológico, los niveles de agua en los sondeos más representativos se monitorizan en continuo mediante medidores de presión (*divers*) o sensores de nivel en continuo (LORA).

En el Anexo A se muestra la distribución de los sondeos que actualmente conforman la red de control del emplazamiento, agrupados según la periodicidad de las mediciones y del método de registro (sonda hidronivel, *diver* o LORA).

En los siguientes subapartados se analiza la evolución mensual de los niveles de agua subterránea y los espesores aparentes de DNAPL. Cabe destacar que el análisis de los niveles de agua se efectúa a partir de los sondeos más representativos de las capas principales, o de aquellos en los cuales se ha observado un comportamiento diferente al habitual (variaciones bruscas de nivel no relacionadas con eventos de precipitación, cambios entre las cotas máximas o mínimas, etc.).

2.2.1 Evolución de niveles de agua subterránea en capa M

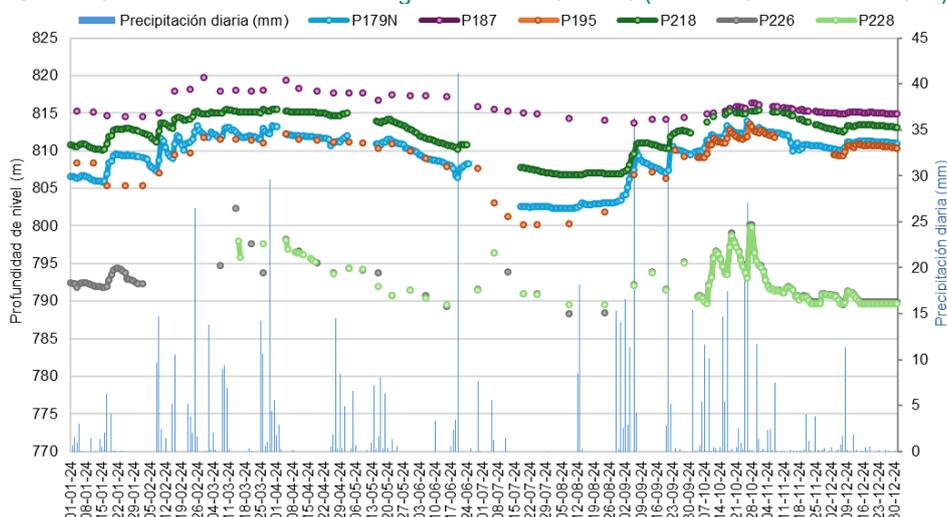
La capa M es la única capa que presenta una continuidad litológica que permite conectar el flujo de agua subterránea a través de la red de fracturación, desde el vaso del antiguo vertedero de HCH hasta el río Gállego. Esta capa es la más relevante desde el punto de vista del transporte de masa contaminante, y por ello se estudia y controla con más detalle.

El grado de conexión hidráulica de las distintas fracturas y la profundidad a la que se encuentra el nivel de agua condicionan la dirección del flujo subterráneo en el emplazamiento. En la zona de foco, donde el nivel de agua se encuentra más somero, además del flujo longitudinal que se produce a través de las fracturas de las capas de arenisca, existe una componente de flujo transversal. Esto es debido a que, independientemente de la litología, hay una mayor densidad de fracturación en superficie. Por otro lado, la densidad de fracturación, que disminuye en profundidad, es mucho menor en las capas de limolita que en las capas de arenisca.

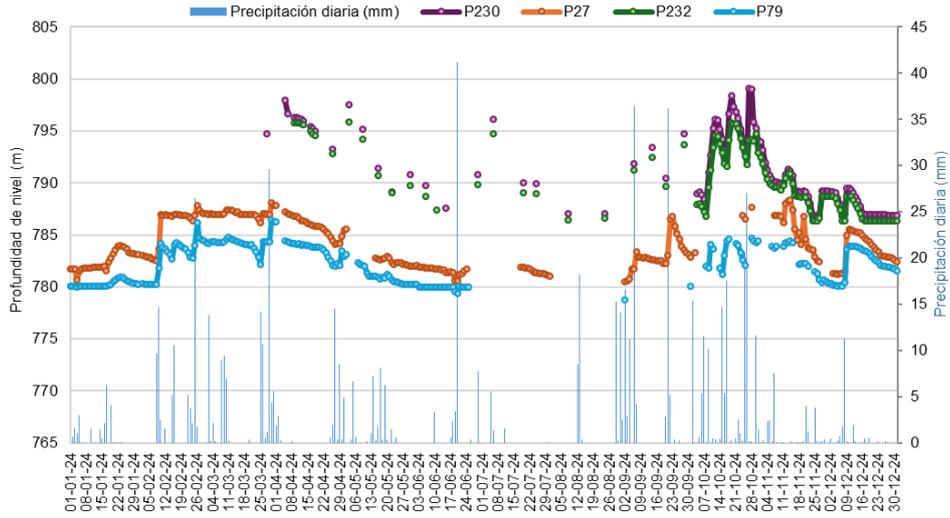
A partir del Barranco 3, el nivel de agua en la capa M se sitúa entre los 20-30 m de profundidad, por lo que el flujo de agua circula principalmente por las fracturas más profundas de la capa en dirección al río, sin que apenas se produzca flujo transversal.

En las gráficas a continuación se representa la evolución de los niveles de agua durante el año 2024 para los sondeos de la capa M equipados con *diver* o LORA, agrupados según la zona del emplazamiento en la que se ubican.

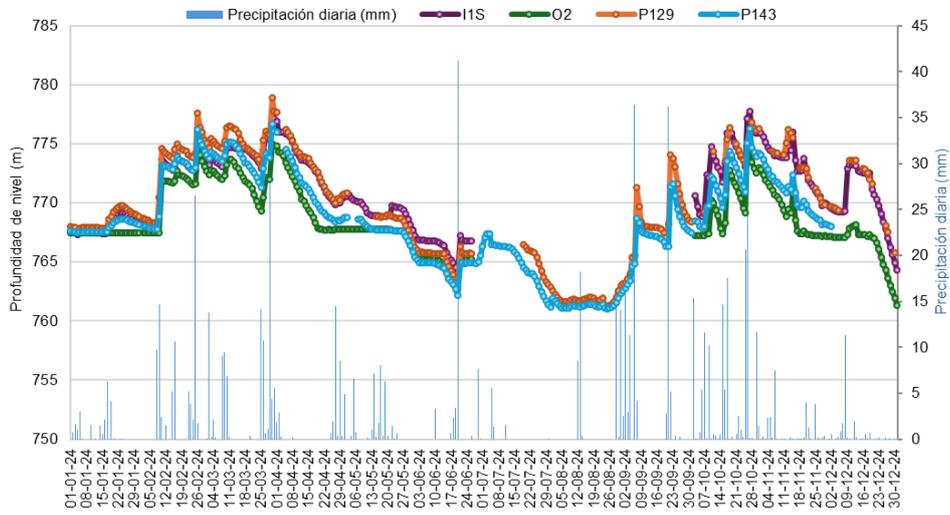
Gráfica 3. Evolución de niveles de agua en el Vaso/zona 0 (1 enero-31 diciembre 2024)



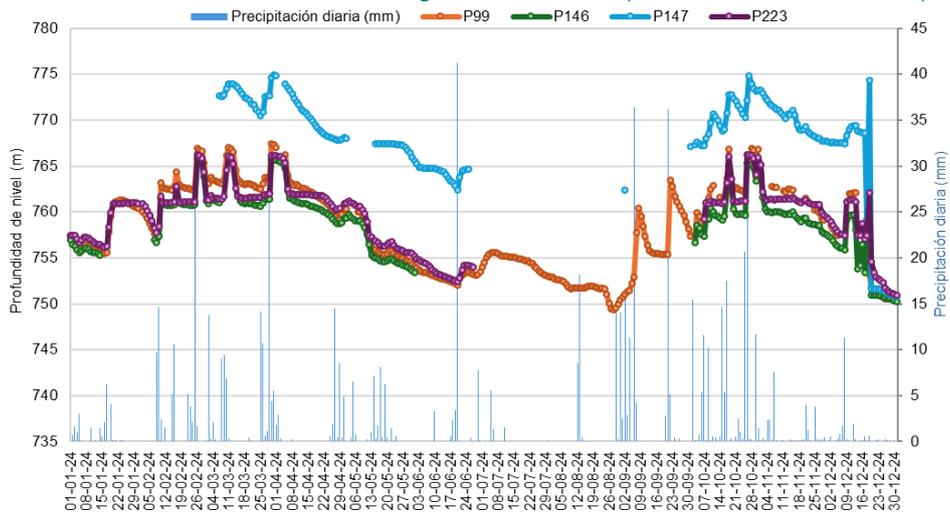
Gráfica 4. Evolución de niveles de agua en el Barranco 3 (1 enero-31 diciembre 2024)



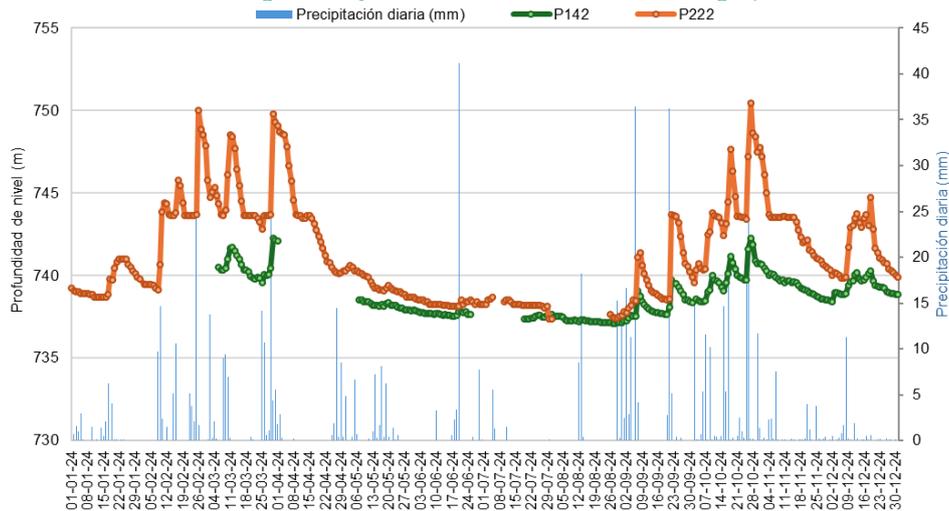
Gráfica 5. Evolución de niveles de agua en la Zona de Barrera (1 enero-31 diciembre 2024)



Gráfica 6. Evolución de niveles de agua en Barranco 4 (1 enero-31 diciembre 2024)



Gráfica 7. Evolución de niveles aguas abajo en Barranco 4/Zona de Descarga (1 enero-31 diciembre 2024)



Este año, se han observado principalmente dos episodios de aguas altas en el emplazamiento, de acuerdo con las épocas en las que se han producido las precipitaciones más cuantiosas y prolongadas. El primer episodio se mantuvo entre febrero y abril, y el segundo entre finales de septiembre y diciembre.

Por otro lado, se realizó una campaña de sondeos desde el 6 de marzo y el 2 de mayo entre la Zona 0 y Barranco 3, y una segunda desde el 20 de octubre y 20 de noviembre en el entorno del Barranco 3. La inyección de volúmenes de agua significativos durante las campañas de perforación provocó ascensos puntuales en los sondeos cercanos a las perforaciones, afectando a P226 (Zona 0) durante la primera campaña, y P230, P232 (Zona 0 a Barranco 3), P26 y P27 (Barranco 3) durante la segunda campaña.

Los dos periodos de aguas bajas se produjeron durante el mes de enero y entre mayo y septiembre, este último coincidiendo con la temporada estival. A mediados de junio, sin embargo, se produjo un episodio de lluvias intensas, el más alto registrado durante el año, que no tuvo un impacto remarcable en los niveles monitorizados, debido a que fueron lluvias torrenciales que se dieron en un pequeño periodo de tiempo.

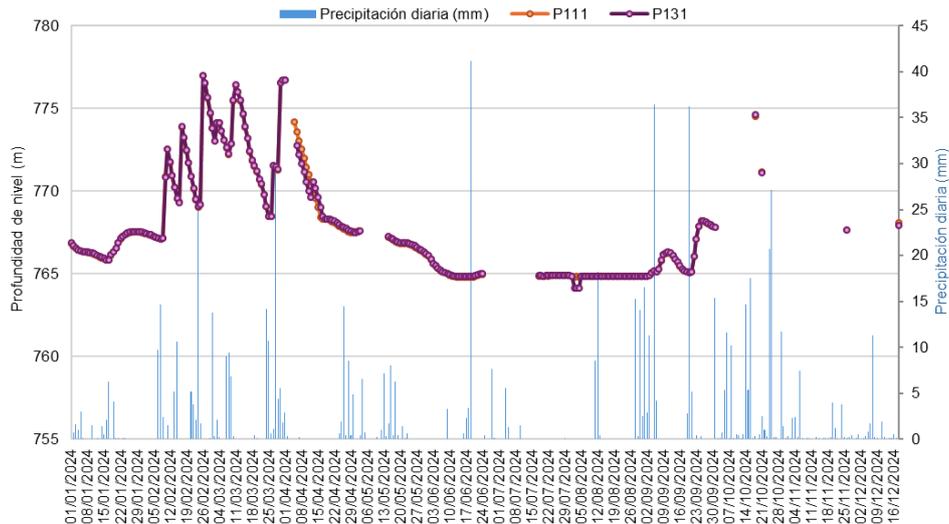
2.2.2 Evolución de los niveles de agua subterránea en otras capas

En capas distintas a la M, se han monitorizado en continuo los sondeos P111 y P131, ubicados en la Zona Barrera en la capa O, una capa de arenisca significativa que se extiende desde el vaso paralela al sur de la capa M hasta cerca del Barranco 4. Esta monitorización se mantuvo hasta octubre de 2024, pasando después las mediciones a periodicidad mensual.

En la gráfica a continuación se representa la evolución de los niveles de agua durante 2024 para los sondeos con *diver* o LORA².

² Los *divers* y LORAs se encuentran programados de modo que tomen una lectura de presión cada hora. No obstante, para facilitar la presentación y visualización de los datos, se muestra únicamente una medida diaria, correspondiente al dato obtenido en la lectura de las 14:00 h.

Gráfica 8. Evolución de niveles de agua en sondeos de capa O en Zona de Barrera (1 enero-18 diciembre 2024)



La reacción de estos dos sondeos es muy similar a la que se produce en los sondeos de la capa M en esta zona, con periodos de aguas altas y bajas coincidentes, sin que se haya detectado ningún evento que haya alterado el comportamiento de los niveles.

2.2.3 Evolución de espesores aparentes de DNAPL

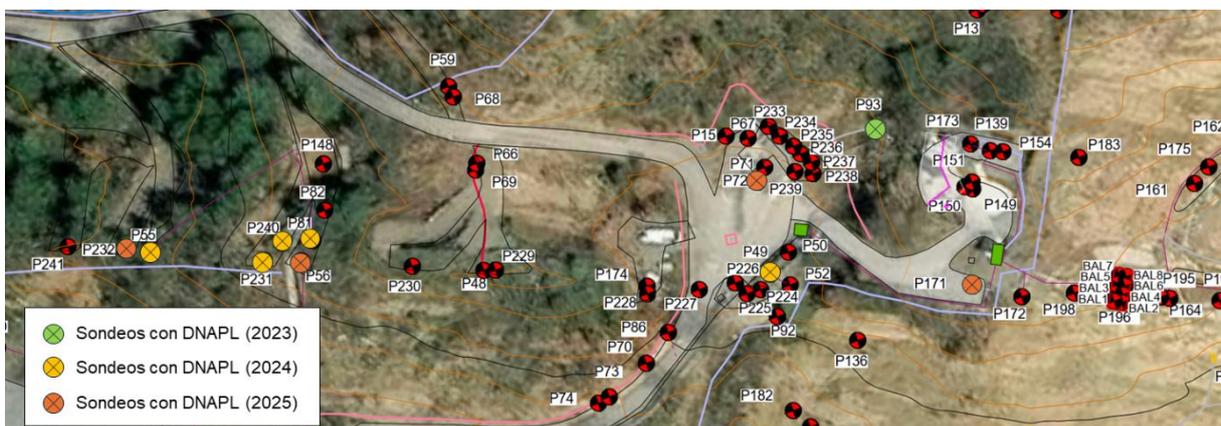
Las tareas de extracción de DNAPL constituyen una de las principales actuaciones que se llevan a cabo en el seguimiento hidrogeológico del emplazamiento, y que tienen el objetivo de retirar la masa contaminante de DNAPL que se acumula en el fondo de los sondeos y, con ello, reducir el principal foco de afección que alimenta la pluma de fase disuelta.

Históricamente, los residuos líquidos asociados a los procesos de cloración fallidos en la fabricación del lindano se vertieron en el vertedero de Bailín hasta el cierre de la fábrica de INQUINOSA. Esta fase líquida no acuosa y densa formó un DNAPL que percoló por las fracturas del suelo del vertedero, movilizándose a través de la red de fracturación que le ofrecía menor resistencia, preferentemente por las capas de arenisca, que presentan una mayor densidad y conexión de fracturas.

De este modo, la distribución del DNAPL llegó a abarcar una extensión desde el vaso del vertedero hasta el Barranco 3. En algunos sondeos perforados en las capas de arenisca M, K, I y O, se acumulaba DNAPL con una frecuencia que permitía obtener unas tasas de extracción en los sondeos del orden de los 5 a 7 l/día.

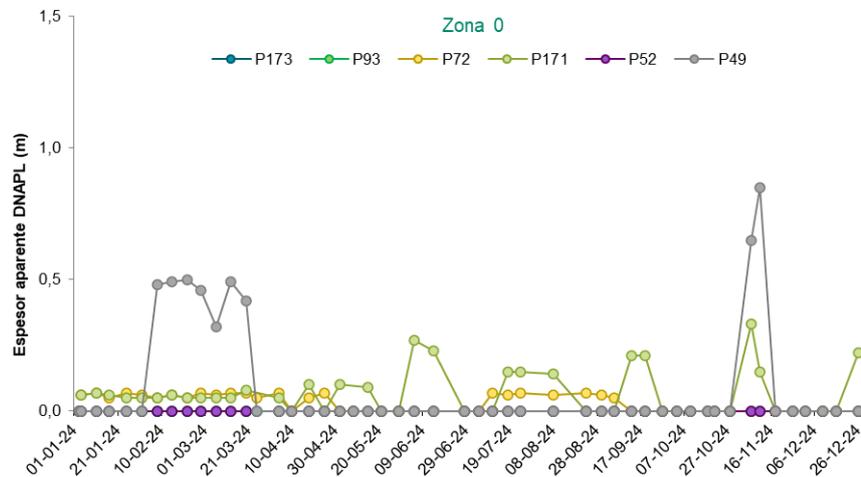
Sin embargo, tras más de una década de operaciones de bombeo intensivos, en la que se ha ido ampliando y optimizando la red de extracción, la tasa de acumulación de DNAPL en los sondeos ha ido disminuyendo paulatinamente. De este modo, actualmente el DNAPL se encuentra prácticamente en fase residual en las fracturas, y las tasas de extracción han disminuido considerablemente en los pocos sondeos que actualmente son productivos.

Figura 1. Distribución de la presencia de DNAPL acumulado en sondeos en los últimos años

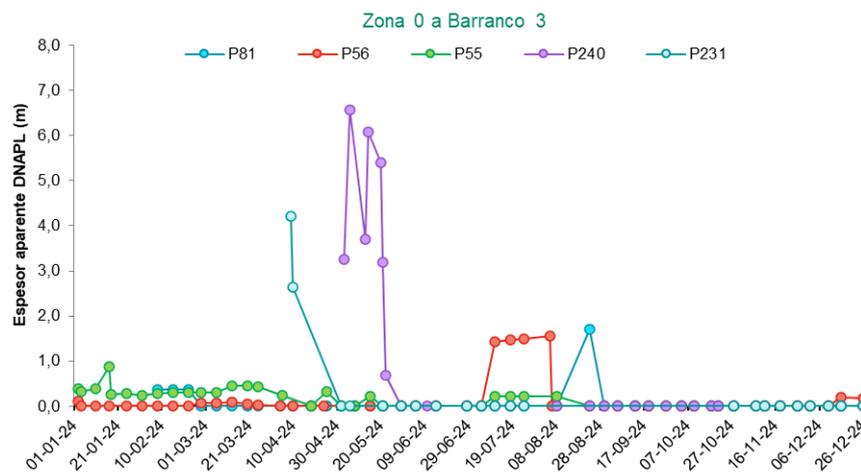


En las siguientes gráficas se recoge la evolución de los espesores aparentes de DNAPL en 2024 de los sondeos que actualmente presentan DNAPL. Se han agrupado según su ubicación en las distintas zonas del emplazamiento en las que se encuentran.

Gráfica 9. Evolución espesores aparentes DNAPL sondeos Zona 0 (1 enero-31 diciembre 2024)



Gráfica 10. Evolución espesores aparentes DNAPL sondeos Zona 0 – Barranco 3 (1 enero-31 diciembre 2024)



En función de la evolución de los espesores aparentes de DNAPL, se han podido apreciar los siguientes comportamientos:

- En la zona del **vaso**, durante 2023 los sondeos conectados a la red P175 y P172 presentaron fase libre en la primera mitad del año (un espesor máximo de unos 25 cm en P175, de la capa I, y entre 1,5 y 2 m en P172, de la capa M), pero tras los bombeos realizados en ambos puntos, los espesores fueron disminuyendo hasta dejar de acumularse. Durante 2024 en ninguno de estos puntos se ha vuelto a detectar DNAPL.
- En **Zona 0**, los únicos sondeos con variaciones de DNAPL a lo largo del año ha sido P171 y P49 de la capa M, y P72, de la capa K, aunque en este último el espesor acumulado máximo ha sido solo de 7 cm. La perforación de sondeos próximos a los puntos de control entre la Zona 0 y el Barranco 3 (2 de marzo-2 de mayo y 24 de octubre-20-noviembre), pudieron provocar una liberación de presiones en la red de fracturación favoreciendo la movilización de DNAPL residual al interior de dichos sondeos.
- En la **Zona 0 a Barranco 3**, a parte de la acumulación que se generó en la perforación de los nuevos sondeos P240 y P231, donde el DNAPL residual presente en las fracturas de esta zona se movilizó a estos nuevos puntos, únicamente se ha producido algún repunte puntal en los sondeos P81 y P56 en los meses de julio y agosto, si bien después de ser bombeados apenas ha vuelto a acumularse DNAPL.

2.3 Extracción de DNAPL y agua contaminada

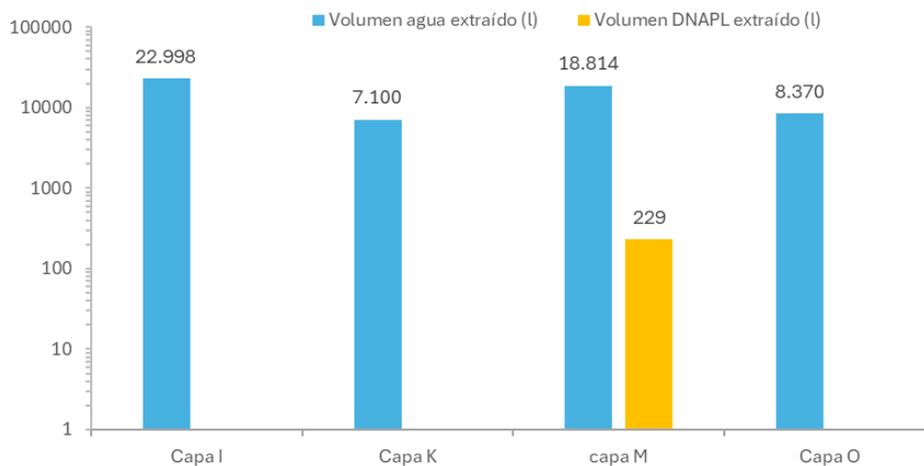
Las labores de bombeo se planifican en función de la evolución de los niveles de agua y DNAPL, así como de las concentraciones que presentan los sondeos. Para ello, se tiene en cuenta el rendimiento de cada sondeo de acuerdo con su tasa de recuperación, condicionada principalmente por la mayor o menor conexión hidráulica de sus fracturas y la saturación en DNAPL de éstas.

No obstante, actualmente muy pocos sondeos son capaces de acumular suficiente espesor aparente de DNAPL como para ser extraído mediante bombeo, y en los que todavía se acumula, lo hace muy lentamente, lo que condiciona que la frecuencia de los bombeos se ajuste al periodo de acumulación de cada sondeo.

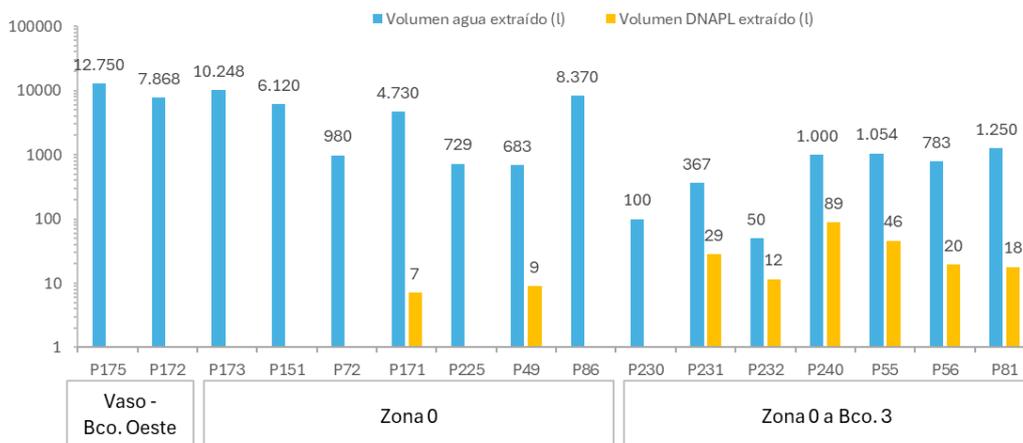
En la siguiente gráfica se resumen los volúmenes totales de DNAPL y agua contaminada extraídos por capa en el año 2024, y en la gráfica a continuación, se recogen estos valores por sondeo en función en la zona en la que se sitúan. En total, se han bombeado 57.282 l de agua y 229 l de DNAPL.

Tal y como se observa, los sondeos de la capa M son los más productivos en cuanto a extracción de DNAPL. Por otro lado, se ha bombeado un volumen de agua mayor de sondeos situados en capa I. El sondeo donde más DNAPL se ha extraído ha sido P240, con 89 l, seguido de P55, con 46 l. En el resto, se han bombeado volúmenes inferiores, entre 7 y 29 l. Todos estos puntos se encuentran ubicados dentro del foco secundario en capa M, entre Zona 0 y Barranco 3.

Gráfica 11. Volúmenes de agua y DNAPL extraídos (l) por capa en 2024



Gráfica 12. Volúmenes de agua y DNAPL extraídos (l) por sondeo en 2024

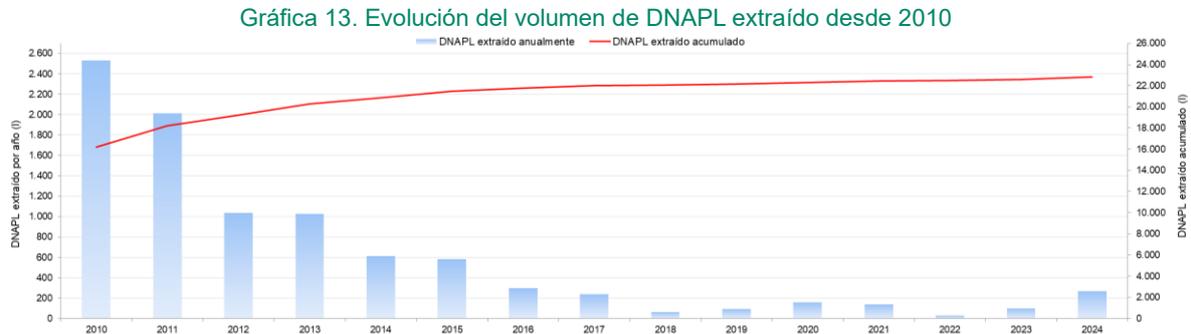


Bombeos Barranco 3

En el barranco 3, la bomba automatizada que capta agua procedente de la surgencia de la capa M se ha activado en varias ocasiones durante los meses de abril, septiembre y octubre, bombeando un total de 33,7 m³.

2.3.1 Evolución rendimientos de extracción

Desde enero a diciembre de 2024 se ha recuperado un total de 266 l de DNAPL. Desde el año 2006, cuando comenzaron las labores de extracción en el emplazamiento, se llevan extraídos 22,86 m³ de DNAPL. En la gráfica a continuación se recogen los volúmenes de DNAPL extraído desde 2010, así como la tendencia de evolución del rendimiento de extracción.



Este año, se han conseguido aumentar ligeramente las cantidades extraídas de DNAPL respecto a años anteriores, principalmente debido a aporte de los nuevos sondeos perforados. Así mismo, los trabajos de perforación también han repercutido en que algunos puntos hayan aumentado sus tasas de recuperación, como P55, P56 y P81, al facilitar la movilización del DNAPL residual existente en las fracturas del entorno hacia el interior de los sondeos.

2.3.2 Equivalencia en masa de los volúmenes extraídos

A partir de las labores de bombeo de DNAPL y agua subterránea se extrae masa contaminante, siendo una actuación fundamental para el control de la pluma en el emplazamiento. Según los volúmenes recuperados, se ha calculado la masa total de benceno, monoclorobenceno y HCH total extraída durante 2024 en función de las siguientes fórmulas:

$$M_{\text{fase disuelta}} = C * V \quad (1)$$

$$M_{\text{DNAPL}} = X * D_{\text{DNAPL}} * V_{\text{DNAPL}} \quad (2)$$

donde:

M_{fase disuelta} es la masa extraída en fase disuelta de cada uno de los contaminantes de interés (µg)

C es la concentración de cada contaminante en la fase disuelta (µg/l)

V es el volumen total de agua extraída (l)

M_{DNAPL} es la masa extraída en la fase densa de cada uno de los contaminantes de interés (kg)

X es la proporción del contaminante dentro del DNAPL (%)

D es la densidad del DNAPL (kg/l)

V_{DNAPL} es el volumen total de DNAPL extraído (l)

Masa extraída en fase disuelta

En función de la concentración promedio de los compuestos principales analizados en las campañas de muestreo de este año, se ha calculado la masa extraída en la fase disuelta según la anterior fórmula (1). En la tabla siguiente se recopilan los datos empleados para el cálculo.

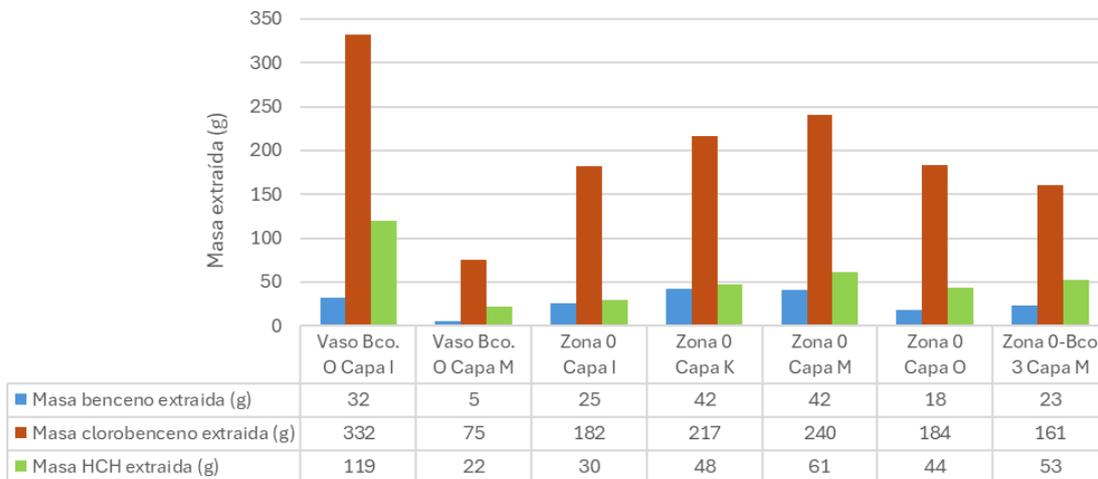
Tabla 1. Volúmenes de agua extraídos y concentraciones promedio por zona y capa en 2024

Sondeo	Zona	Capa	Volumen agua extraído (l)	Concentración promedio benceno (µg/l)	Concentración promedio clorobenceno (µg/l)	Concentración promedio HCH total (µg/l)
P175	Vaso Bco. Oeste	I	12.750	2.481	26.073	9.349
P172	Vaso Bco. Oeste	M	7.868	649	9.538	2.790

Sondeo	Zona	Capa	Volumen agua extraído (l)	Concentración promedio benceno (µg/l)	Concentración promedio clorobenceno (µg/l)	Concentración promedio HCH total (µg/l)
P173	Zona 0	I	10.325	2.454	17.615	2.898
P72	Zona 0	K	980	5.942	30.548	6.724
P151	Zona 0	K	6.120	5.942	30.548	6.724
P171	Zona 0	M	4.730	6.712	38.809	9.910
P49	Zona 0	M	733	6.712	38.809	9.910
P225	Zona 0	M	729	6.712	38.809	9.910
P86	Zona 0	O	8.370	2.125	21.942	5.249
P81	Zona 0 a Barranco 3	M	1.667	4.327	30.401	9.925
P56	Zona 0 a Barranco 3	M	860	4.327	30.401	9.925
P55	Zona 0 a Barranco 3	M	1.054	4.327	30.401	9.925
P230	Zona 0 a Barranco 3	M	100	4.327	30.401	9.925
P231	Zona 0 a Barranco 3	M	566	4.327	30.401	9.925
P232	Zona 0 a Barranco 3	M	50	4.327	30.401	9.925
240	Zona 0 a Barranco 3	M	1.000	4.327	30.401	9.925

La masa total extraída por capa se resume en la siguiente gráfica. En total, se han extraído 187 g de benceno, 1.391 g de monoclorobenceno y 376 g de HCH total a partir de los bombeos de agua subterránea.

Gráfica 14. Masa extraída contaminantes principales por capa y zona (g) en bombeos agua subterránea



Masa extraída en DNAPL

Según los análisis de la composición del DNAPL efectuados en 2017, se determinó un valor promedio de densidad de 1,5 g/cm³ (1,5 kg/l). A partir de ese valor, y de los porcentajes de cada uno de los compuestos en la fase densa, se ha calculado la masa extraída a partir de los bombeos de DNAPL con la fórmula anterior (2). En la tabla siguiente se recogen los valores empleados para el cálculo.

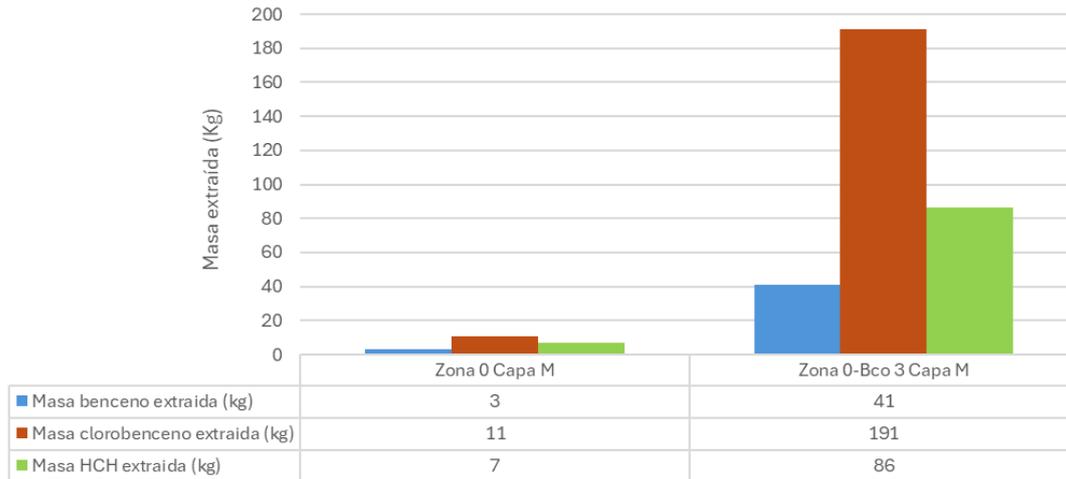
Tabla 2. Volúmenes de DNAPL extraídos y proporción promedio contaminantes en las muestras de DNAPL analizadas en 2017

Sondeo	Zona	Capa	Volumen DNAPL extraído (l)	Proporción benceno (%)	Proporción clorobenceno (%)	Proporción HCH Total (%)
P175	Vaso Bco. Oeste	I	2,64	18%	44%	27%
P172	Vaso Bco. Oeste	M	13,93	13%	44%	30%
P93	Zona 0	I	6,55	18%	44%	27%
P72	Zona 0	K	2,24	18%	44%	27%
P171	Zona 0	M	5,71	13%	44%	30%

Sondeo	Zona	Capa	Volumen DNAPL extraído (l)	Proporción benceno (%)	Proporción clorobenceno (%)	Proporción HCH Total (%)
P49	Zona 0	M	18,9	13%	44%	30%
P81	Zona 0 a Barranco 3	M	33,9	11%	51%	23%
P56	Zona 0 a Barranco 3	M	5,28	11%	51%	23%
P55	Zona 0 a Barranco 3	M	8,66	11%	51%	23%

La masa total extraída por capa se resume en la siguiente gráfica. En total, se han extraído unos 44 kg de benceno, 202 kg de monoclorobenceno y 93 kg de HCH total a partir de los bombeos de DNAPL.

Gráfica 15. Masa extraída contaminantes principales por capa y zona (g) en bombeos DNAPL



2.4 Control de caudales

En el barranco de Bailín y en el río Gállego se encuentran dos estaciones de aforo de la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE), ubicadas a la salida del barranco (barranco de Bailín) y aguas abajo de la descarga de la capa M (río Gállego) respectivamente.

En la página web de SAIH Ebro (Sistema Automático de Información Hidrológica del Ebro), se dispone de una amplia información acerca del control de caudales de las estaciones. En la página asociada a cada estación (ver tabla a continuación), se presenta una ficha con la ubicación, datos analógicos a tiempo real, datos estadísticos, mapas, fotos, e información sobre caudales de referencia. Así mismo, se pueden visualizar los gráficos con los niveles, caudales, precipitación y otros parámetros en diferentes escalas temporales, e imprimir y exportar los datos en formato PDF y Excel.

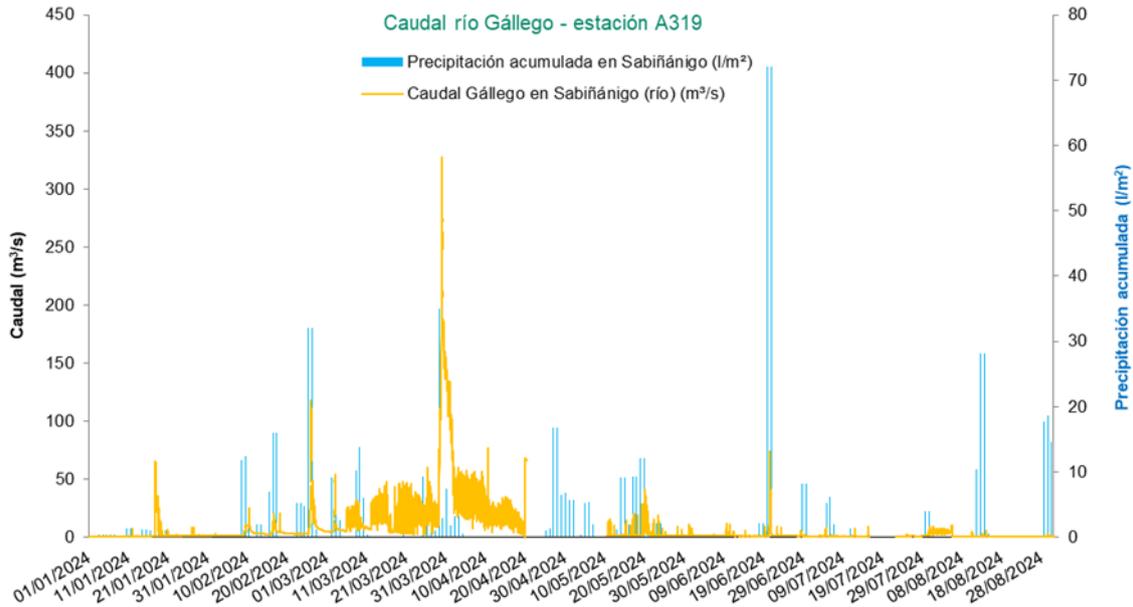
Tabla 3. Estaciones de aforo ubicadas en el entorno del emplazamiento

Estación	Control	Enlace web
A312	Salida barranco Bailín	http://www.saihebro.com/saihebro/index.php?url=/datos/ficha/estacion:A312
A319	Río Gállego Sabiñánigo	http://www.saihebro.com/saihebro/index.php?url=/datos/ficha/estacion:A319

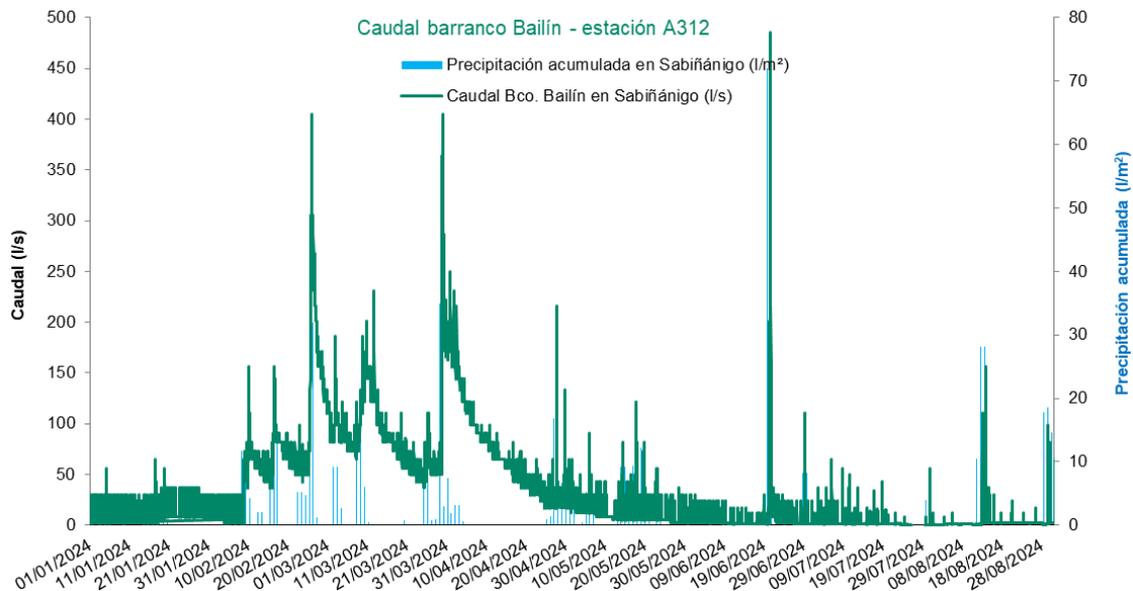
De enero a agosto de 2024, se registró la evolución de los caudales en ambas estaciones junto con la precipitación diaria acumulada. A partir de este momento, se dejó de incluir esta evolución en los informes de seguimiento, ya que no se efectuó cabo ninguna actuación que se pudiera ver afectada por estos caudales, ni se han observado incoherencias con el régimen de precipitaciones. Así mismo, puesto que la información se encuentra disponible on-line, se puede extraer en cualquier momento que sea necesario.

En las gráficas a continuación se muestran los caudales puntuales en cada estación. Cabe destacar que los caudales en el río Gállego que se recogen en la gráfica no reflejan el caudal natural del río en esta zona, estando condicionados por la gestión y deriva de caudal al canal hidroeléctrico que se realiza desde el embalse de Sabiñánigo, situado aguas arriba. Los caudales totales se registran en la web de la CHE como "caudal río+central".

Gráfica 16. Evolución de caudales estación aforo A319 - Río Gállego (1 enero-31 agosto 2024)



Gráfica 17. Evolución de caudales estación aforo A312 – Barranco Bailín (1 enero-31 agosto 2024)



Los caudales en el río Gállego registrados están en concordancia con el régimen de precipitaciones acontecido durante 2024, con una mayor respuesta a las lluvias a principios de abril, y unos caudales mínimos durante gran parte del periodo estival. En el barranco de Bailín, los caudales generan ascensos más notables que se producen inmediatamente a la precipitación, pudiendo estar los valores máximos ligeramente sobreestimados.

En la siguiente tabla se resumen los valores estadísticos obtenidos de todo el año 2024 en cada estación.

Tabla 4. Valores estadísticos estaciones de aforo Bailín año 2024

Estación	Caudal mínimo (l/s) / día registro	Caudal medio (l/s)	Caudal máximo (l/s) / día registro
A312 (barranco Bailín)	0,310 01/08/2024	36,640	905,20 06/09/2024
A319 (río Gállego)	(*error registro)	9,676	327,76 29/03/2024
A319 (río Gállego + central)	0,850 23/07/2024	27,094	347,96 29/03/2024

2.5 Campañas de muestreo semestral

El seguimiento de la calidad química del agua es determinante para la caracterización de la pluma contaminante. Para llevar a cabo este seguimiento, se realizan a lo largo del año campañas de muestreo con distinta periodicidad y número de sondeos. En las campañas semestrales se toman entre 70 y 80 muestras, seleccionando los sondeos más representativos dependiendo de las circunstancias de la propia campaña, o aquellos de los que se pretende obtener alguna información relevante, según la evolución de los niveles, la existencia de nuevos sondeos perforados, ensayos realizados, etc.

El programa de muestreo contempla la toma de muestras a bajo caudal con el objetivo de obtener una muestra lo más representativa posible del agua del acuífero. Para ello, se muestrea con una bomba tipo *bladder* a la profundidad de máxima afección (zona de flujo preferente) y, en caso de no ser posible (diámetro piezómetro reducido, etc.), se utilizan tomamuestras desechables de un solo uso tipo *bailer* o *hydrasleeve*.

Los parámetros fisicoquímicos se miden con sonda multiparamétrica previamente calibrada en el momento de la toma de la muestra. Por último, las muestras, recogidas en viales topacio de 250-500 ml, se entregan el mismo día de su extracción al laboratorio Pirenarium de la DGA, en Sabiñánigo, para su análisis.

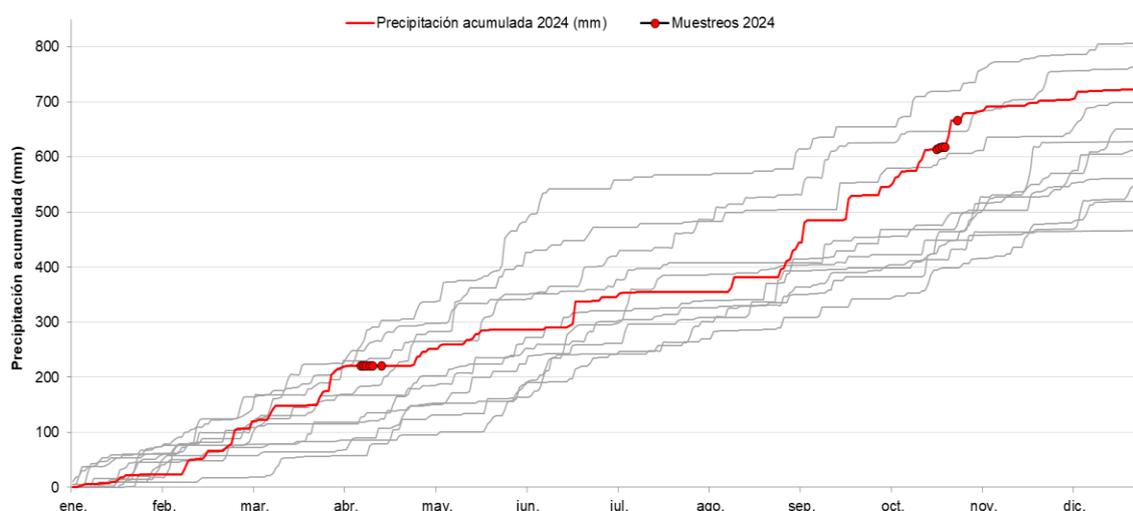
Así mismo, en cada campaña se toman muestras duplicadas (un 5% del total) para su análisis en el laboratorio de referencia externo SGS³, tal y como se viene haciendo en los últimos años a modo de contraste y de control de calidad de los datos.

Con objeto de garantizar la calidad en el estudio de la evolución de la pluma, y dadas las diferentes características de las capas principales que se distinguen en el emplazamiento, la campaña de muestreo se planifica para muestrear los sondeos perforados en cada capa en el menor intervalo temporal, desde los menos afectados hasta los que históricamente han presentado mayor afección.

En la siguiente gráfica se presenta la evolución de la precipitación acumulada durante 2024 (línea roja) comparada con la evolución de la precipitación acumulada de los últimos 10 años (líneas grises), y las fechas en las que se han realizado las campañas de muestreo de 2024. De esta forma, se puede observar si el muestreo se ha efectuado en periodo seco o húmedo, dado que esta circunstancia puede influir en los resultados analíticos.

Este año se han llevado a cabo dos campañas de muestreo, una en abril y otra en octubre. La campaña de abril ha coincidido con una época de transición de aguas altas a bajas, y aunque el muestreo se realizó ya en ausencia de precipitaciones, con los niveles bajando en prácticamente todo el emplazamiento, aún permanecían bastante altos. En cambio, el muestreo de octubre se enmarca en aguas altas en pleno periodo de lluvias y con los niveles subiendo.

Gráfica 18. Evolución de precipitación vs eventos de muestreo del año 2024



³ SGS (antiguo Synlab Analytics & Services y, anteriormente, Alcontrol) es un laboratorio que dispone de acreditación ISO/IEC 17025 y que ha sido utilizado como laboratorio de contraste en los últimos 10 años.

En la campaña de abril se muestrearon un total de 77 sondeos, mientras que en noviembre se muestrearon un total de 75 puntos distribuidos por todo el emplazamiento. Cabe destacar que, el sondeo P231, situado entre Zona 0 y Barranco 3, estaba incluido inicialmente en la propuesta de muestreo, pero debido a una obstrucción a causa de una caída del *diver* instalado en el mismo, no pudo ser muestreado en el mes de octubre.

En la tabla a continuación, se incluyen los sondeos muestreados en ambas campañas junto con la zona y capa a la que pertenecen, la profundidad y el método de muestreo utilizado en la campaña de abril. En octubre, todos los sondeos se han muestreado con *bladder*, a excepción de P126, que se ha realizado con *bailer* desechable.

Tabla 5. Muestras tomadas en la campaña de abril de 2024

Zona	Capa	Sondeo	Prof. (m)	Método muest.	Zona	Capa	Sondeo	Prof. (m)	Método muest.
Aguas Arriba Vaso	M	P87	40	Bl	Barranco 2	Otras	P160	15	Bl
		P84	20	Bl		IU	P80	15	Bl
Barranco 0	M	P187	15	Ba	Zona 0 a Barranco 3	M	P55	20	Bl
		P221	16	Bl			P81	35	Bl
		P177	15	Bl		OU	P110	15	Bl
		P178	15	H			P26	45	Bl
	M	P218	25	Bl		M	P27	20	Bl
Vaso – Barranco Este		P220	25	Bl	Barranco 3		P54	25	Bl
		P168	10	H			P79	35	Bl
	Otras	P189	nivel	Ba		O	P94	20	H
		P207	15	Bl		U	P97	25	Bl
		P212	20	Bl		Otras	P153	15	Bl
		P162	14	H			P127	40	Bl
	I	P175	22	H		M	P129	45	Bl
		P183	30	H	Zona Barrera		P143	46	Bl
		P184	nivel	Ba			P144	nivel	Ba
	K	P161	12	H		O	P111	40	Bl
		P166	9	H			P131	45	Bl
Vaso – Barranco Oeste		P165	11	H		OU	P121	25	Bl
		P172	30	Bl			P146	nivel	Ba
	M	P179N	25	Bl			P147	nivel	Ba
		P180	20	H	Barranco 4	M	P223	33	Bl
		P186	30	Bl			P98	38	Bl
	OU	P181	nivel	Bl			P99	45	Bl
	U	P109	30	Bl		OU	P122	20	Bl
	Otras	P163	14	H		Otras	P152	15	Bl
		P15	15	Bl	Aguas abajo Barranco 4	M	P102	30	Bl
	I	P173	35	Bl			P222	37	Bl
		P67	8	Bl			P126	nivel	Ba
		P93	20	Bl	Zona Descarga	M	P140	30	Bl
		P149	30	Bl			P141	20	Bl
	K	P151	55	Bl			P142	45	Bl
		P71	35	Bl					
		P72	20	Bl					
Zona 0		P171	35	Bl					
	M	P174	30	Bl					
		P49	28	Bl					
		P52	50	Bl					
	O	P86	10	Bl					
		P92	10	Bl					
	OU	P70	10	Bl					
		P74	20	Bl					
	U	P90	25	Bl					

Notas: H: *Hydrasleeve*; Bl: *Bladder*; Ba: *Bailer*

Tabla 6. Muestras tomadas en la campaña de octubre de 2024

Zona	Capa	Sondeo	Prof. (m)	Zona	Capa	Sondeo	Prof. (m)			
Aguas Arriba Vaso	M	P87	40			P77	15			
Barranco 0	M	P84	20		IU	P80	15			
		P187	15		K	P66	25			
Vaso – Barranco Este	M	P177	17	Zona 0 a Barranco 3	M	P229	35			
		P218	25			P230	32			
	P168	10	P232			23				
	P207	15	P240			30				
	P212	20	P55			20				
	I		P162			14	P81	35		
			P175			22	OU	P110	15	
			P184			19		P27	15	
			P183			30	Barranco 3	M	P54	25
			P172			30		P79	35	
P179N			25		I1S	35				
Vaso – Barranco Oeste	M	P180	20		O1S	35				
		P186	30	Zona Barrera	M	O2	35			
	P192	19	P127			40				
	P195	25	P129			35				
	P198	30	P143			46				
	OU	P181	15			P111	35			
	U	P109	30			O	P131	45		
	Zona 0	I	P15			15		P146	25	
			P173			35	Barranco 4	M	P223	30
		P93	20			P98			35	
P149		30	P99			35				
P151		45	OU	P122	20					
K			P238	18	Aguas abajo Barranco 4	M			P104	28
			P71	35		P222			37	
			P72	20		P126			2	
			P171	35	Zona Descarga	M			P140	30
P174		27	P141	20						
P224	30	P142	44							
P225	30									
P227	27									
P228	25									
P49	28									
P52	50									
O	P86	20								
OU		P70	18							
		P74	20							
U	P90	25								
Otras		P237	17							
		P239	20							

2.5.1 Medición de parámetros físico-químicos

Durante la toma de muestras de agua, se midieron los parámetros pH, conductividad, temperatura, potencial redox y oxígeno disuelto mediante sonda multiparamétrica para establecer las condiciones fisicoquímicas del acuífero y evaluar las causas de posibles alteraciones en el entorno que puedan modificarlas ocasionalmente.

En las siguientes figuras se representa la distribución en perfil de la capa M del pH, redox y conductividad para las dos campañas de muestreo de 2024. Particularmente dentro de la capa M, se pueden visualizar rápidamente aquellas zonas peor conectadas donde perduran los efectos de la inyección de oxidantes en profundidad.

Figura 2. Distribución de la conductividad, redox y pH en profundidad capa M (abril 2024)

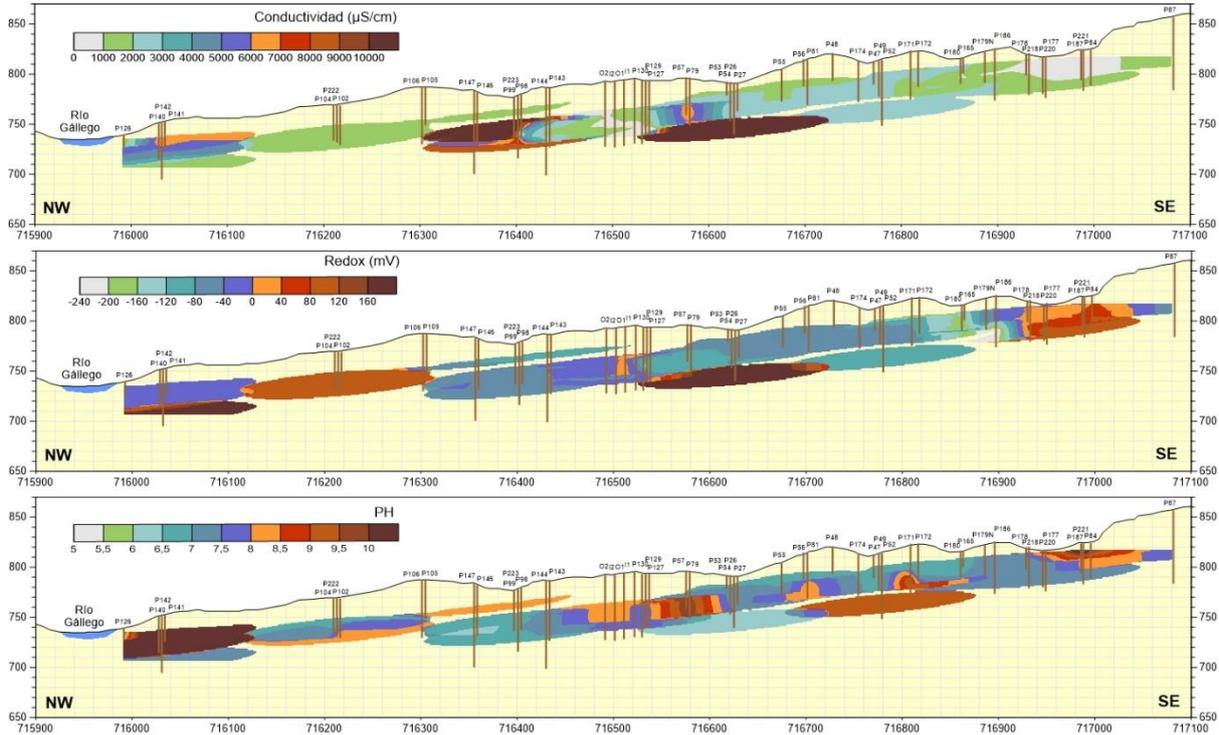
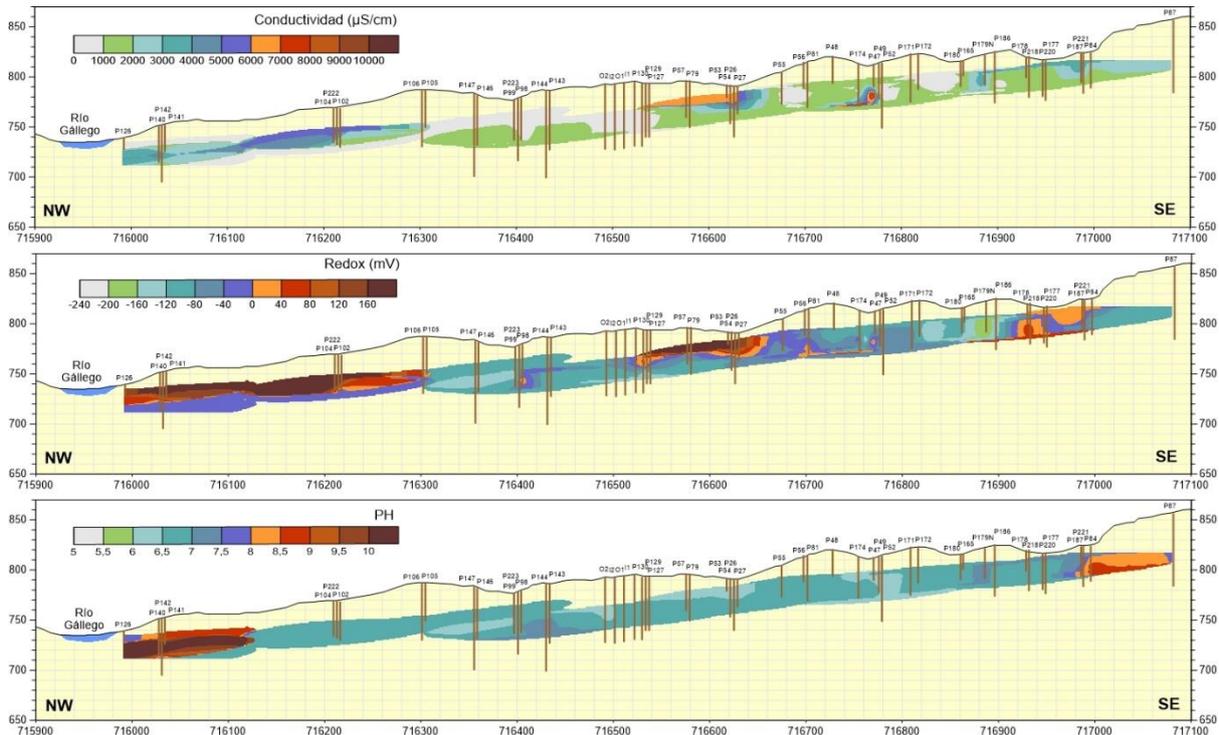


Figura 3. Distribución de la conductividad, redox y pH en profundidad la capa M (octubre 2024)



Los valores de **conductividad** medidos en ambas campañas se situaron, en general, dentro del rango habitual de los sondeos, si bien se registraron valores más elevados en profundidad en sondeos mal conectados, donde la renovación del agua es más escasa y perduran los efectos de las inyecciones de oxidante que se han ido efectuando en los últimos años. No obstante, algunas profundidades se han modificado para la campaña de octubre con el fin de evitar alcanzar estas zonas peor conectadas.

Otros factores a tener en cuenta implican la presencia de dispositivos de liberación de oxígeno (ORCs) en algunos sondeos, como los situados aguas abajo de Barranco 4 y Zona de Descarga, que provocan un aumento general en todos los parámetros, incluyendo la conductividad; aún más si son renovados en fechas próximas a las campañas de muestreo, como ocurrió en octubre.

Por último, en la campaña de muestreo de octubre, los valores de conductividad, especialmente en zonas más someras, se redujeron de forma generalizada, lo que es concordante con la época de aguas altas, aunque puntualmente se detectaron ascensos en puntos que han sufrido un aumento de la carga contaminante, como P179N situado en el vaso (capa M).

En cuanto al **pH**, este valor se ha mantenido dentro del rango histórico (entre 6 y 8) en todos los sondeos del emplazamiento, con algunas excepciones puntuales en sondeos, generalmente con valores de pH superiores a 10, también relacionados con la presencia de restos de y la ejecución de actuaciones en el entorno. Por otro lado, el pH reflejó una disminución en la campaña de octubre respecto a la campaña de abril (el promedio baja de los 7,93 a los 7,00 para el conjunto de puntos muestreados).

El **oxígeno disuelto** suele oscilar entre los 0 y los 3 mg/l en general; y en particular, suele ser más elevado en sondeos donde se encuentran instalados ORCs. Dado el periodo de precipitaciones, la media de oxígeno disuelto también fue inferior durante el muestreo de octubre (0,95 mg/l) y el **redox** es mayoritariamente negativo, con valores algo más elevados en aquellos puntos donde están colocados los ORCs y con influencia de presencia de restos de reactivos acumulados en el fondo de los sondeos.

2.5.2 Resultados analíticos de la campaña de muestreo semestral

En las siguientes figuras se representa la distribución de las concentraciones de los tres compuestos principales analizadas en las campañas de muestreo en una vista en planta para el conjunto del emplazamiento, así como la distribución de los mismos compuestos en profundidad en un perfil de la capa M, desde aguas arriba del vaso desmantelado hasta el río Gállego.

Figura 4. Distribución de la afección por benceno. Vista en planta (abril y octubre 2024)

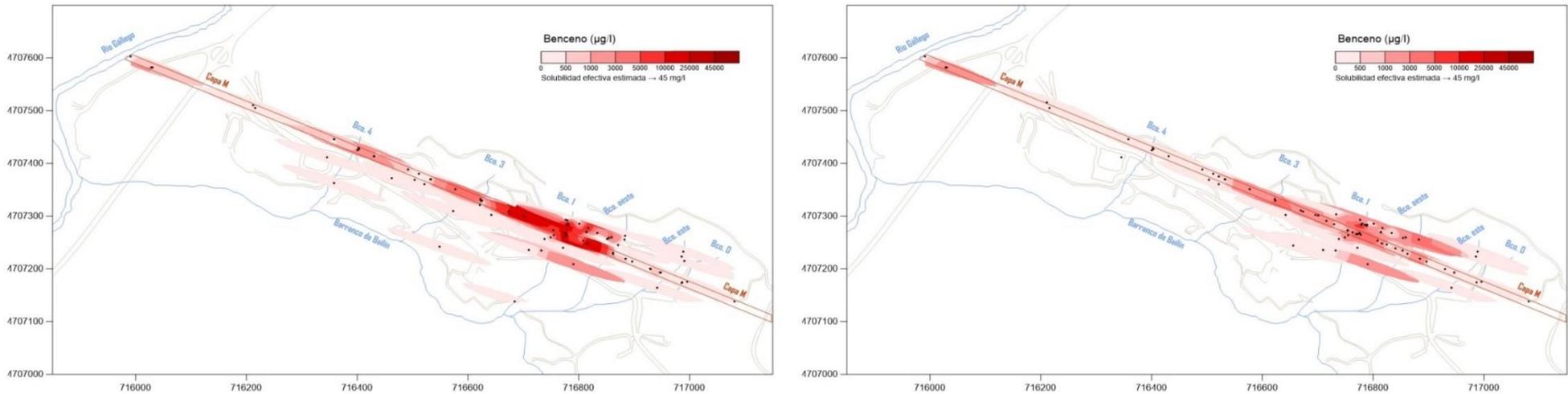


Figura 5. Distribución de la afección por monoclorobenceno. Vista en planta (abril y octubre 2024)

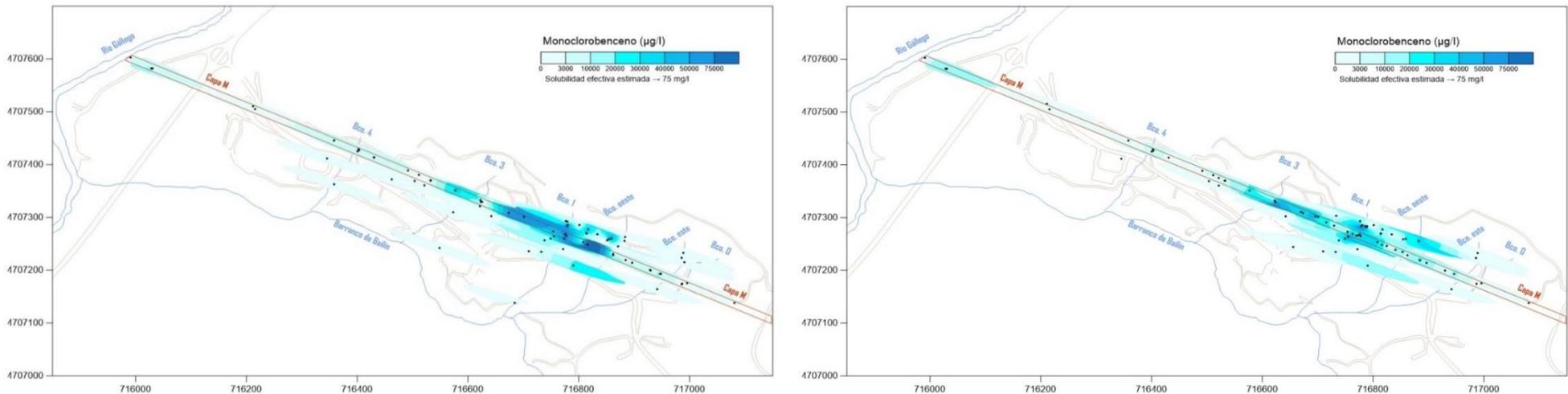
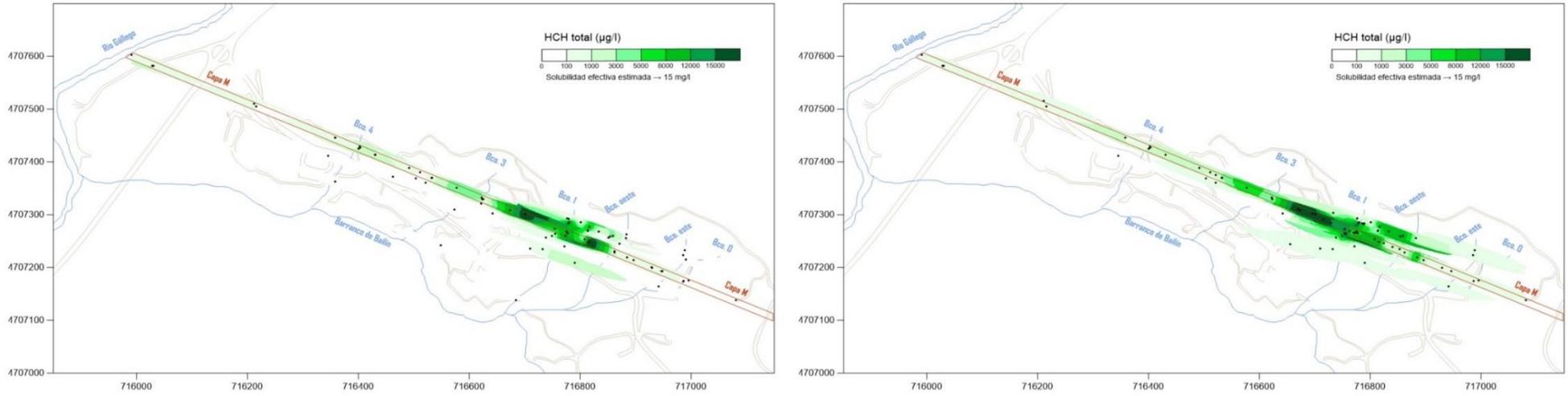


Figura 6. Distribución de la afección por benceno, monoclorobenceno y HCH total. Vista en planta (abril y octubre 2024)



Las concentraciones más elevadas de **benceno** y **monoclorobenceno**, se detectaron en sondeos con presencia habitual de DNAPL, algunos por encima del límite de solubilidad, como en P172 (149 mg/l) para el monoclorobenceno. En el muestreo de octubre, se analizaron concentraciones considerablemente menores a las registradas en abril, a excepción de la Zona de Descarga, donde suelen estar más o menos constantes. Este hecho parece contrastar con el comportamiento habitual que presentan los sondeos en cuanto a relación entre aguas altas y bajas, puesto que la campaña de octubre se ha efectuado en un momento de alta pluviosidad. No obstante, aunque durante la campaña de abril las lluvias ya habían cesado, el hecho de que el acuífero permaneciera en aguas altas durante casi dos meses antes del muestreo ha podido influir significativamente en el aumento de carga contaminante. Por el contrario, en octubre las aguas altas habían comenzado únicamente un par de semanas antes, habiéndose encontrado el acuífero en aguas bajas durante más de 5 meses.

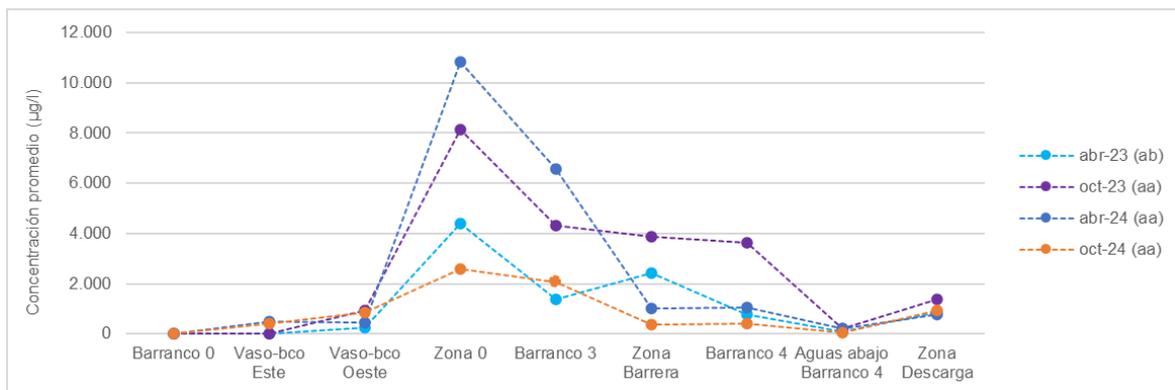
La distribución del **HCH** suele ser más mantenida, aunque, al igual que con el clorobenceno, en la campaña abril se han detectado concentraciones más elevadas en sondeos situados en zona media de la pluma. En octubre, las concentraciones se han elevado levemente en la capa I (Zona 0) y en los sondeos de capa M en Zona 0 a Barranco 3, debido a la presencia de DNAPL en los nuevos sondeos realizados en esta zona.

Por último, en general, cabe destacar que, en ambas campañas, la realización de sondeos ha supuesto una cierta movilización de la carga contaminante a consecuencia de la inyección de agua para los trabajos de perforación, por lo que se han encontrado concentraciones más elevadas de lo habitual en sondeos de Zona 0 a Barranco 3 en abril, y en el sondeo P27 del Barranco 3 en octubre.

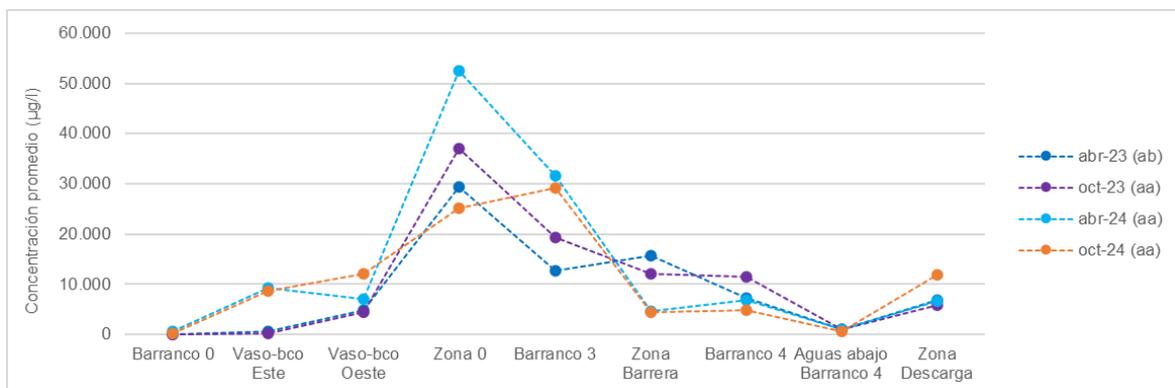
2.5.3 Evolución de la pluma de afección en la capa M

En las siguientes gráficas se muestra la distribución de las concentraciones promedio en sondeos de la capa M por zona del emplazamiento, para las últimas 4 campañas semestrales de muestreo para cada compuesto. Se indica si la campaña se realizó en aguas altas ("aa") o aguas bajas ("ab").

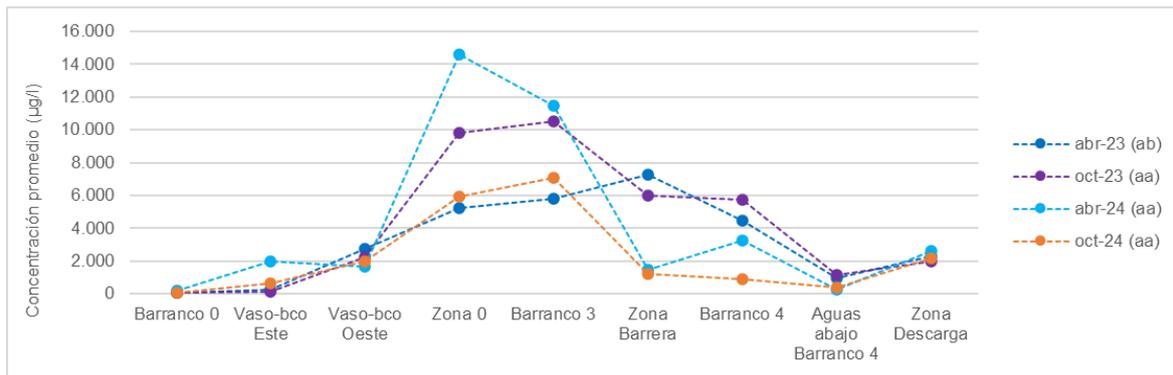
Gráfica 19. Distribución de la concentración promedio de benceno por zona (abril 2023-octubre 2024)



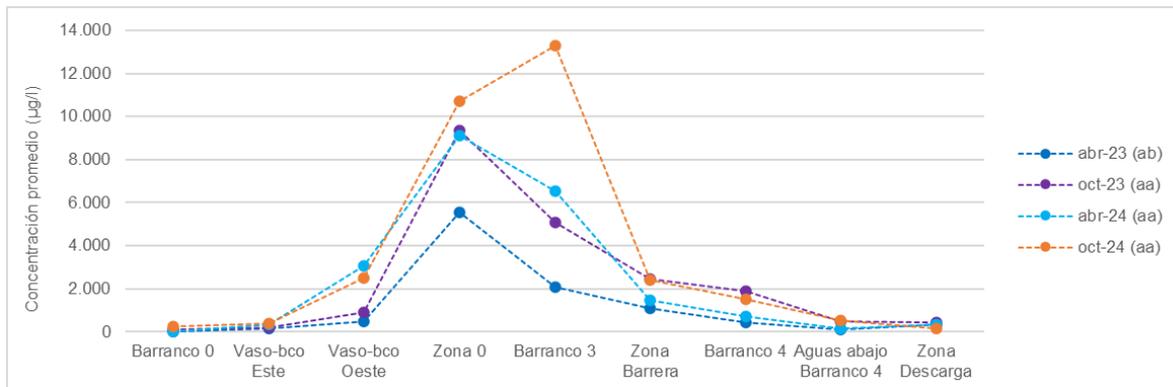
Gráfica 20. Distribución de la concentración promedio de monoclorobenceno por zona (abril 2023-octubre 2024)



Gráfica 21. Distribución de la concentración promedio de los clorobencenos (>1 Cl) por zona (abril 2023-octubre 2024)



Gráfica 22. Distribución de la concentración promedio de HCH total por zona (abril 2023-octubre 2024)



De forma general, tal y como se ha comentado con anterioridad, las concentraciones a lo largo de 2024 se han visto afectadas por el régimen de precipitaciones y la perforación de nuevos sondeos.

Respecto a la campaña de octubre, se observa un marcado aumento de las concentraciones en Barranco 3 por la inclusión de los nuevos sondeos perforados en el entorno con presencia de DNAPL, por lo que, a pesar de observarse un cambio en el perfil de contaminación, las concentraciones se siguen manteniendo coherentes con la presencia de DNAPL en las zonas de foco, con valores más elevados en Zona 0 a Barranco 3 y una disminución de la carga contaminante hacia aguas abajo.

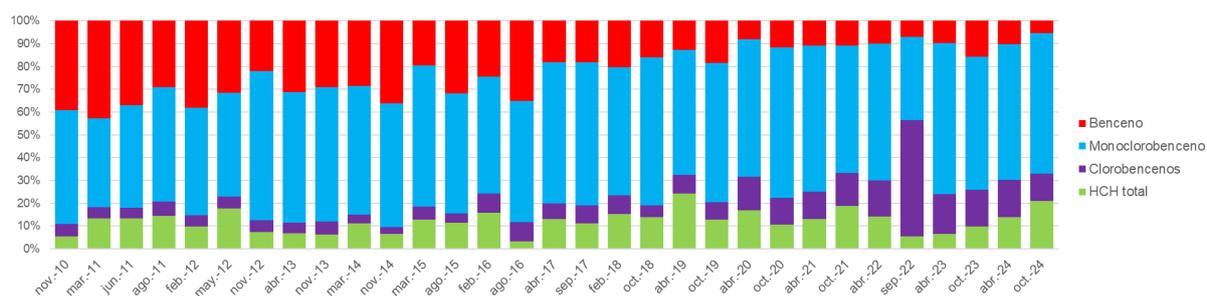
De forma más específica, el **benceno** y **monoclorobenceno** han sufrido una disminución generalizada en prácticamente todas las zonas, salvo durante la campaña de abril en la zona de perforación de sondeos y en la zona del Barranco Este del vaso.

Otra cosa que destacar es el reequilibrio de la concentración de los **clorobencenos**, mostrando una tendencia idéntica con el monoclorobenceno, en contra de la evolución observada años anteriores, donde la influencia de los ensayos de remediación había provocado el aumento de estos compuestos en las zonas medias de pluma.

Para el **HCH total**, la oscilación de las concentraciones promedio entre campañas suele ser más acusada en zonas con mayor presencia de DNAPL y se suele ir homogeneizando agua abajo. Sin embargo, la tendencia que siguen las concentraciones por zona presenta pocos cambios y está sujeta a una menor variabilidad respecto a otros compuestos, lo que probablemente esté relacionado con la naturaleza de este compuesto, más estable y persistente en el tiempo porque es menos fácilmente degradable. Por ello, las concentraciones se mantienen más estables que con los demás compuestos y el aumento de las concentraciones es únicamente apreciable en el Barranco 3, donde se ha detectado presencia de DNAPL en los nuevos sondeos.

En la siguiente gráfica se muestra la evolución en las proporciones entre los diferentes compuestos analizadas en los muestreos semestrales realizados desde noviembre de 2010. Tal y como se observa, la tendencia de la proporción del benceno muestra un claro descenso teniendo en cuenta todo el histórico. Este hecho, unido a que el monoclorobenceno no ha sufrido prácticamente ninguna variación al ser el compuesto más mayoritario (a excepción de periodos excepcionales como durante el ensayo LIFE en 2022), hacen que la proporción de HCH total en la mezcla sea más elevada, sin que ello conlleve un aumento de concentraciones asociado sino que más bien es un reflejo de la naturaleza persistente y menos biodegradable de este compuesto.

Gráfica 23. Evolución de las proporciones en los diferentes compuestos campañas semestrales muestreo (noviembre 2010-octubre 2024)



2.5.4 Control de calidad. Duplicados

En las dos campañas semestrales de muestreo se ha efectuado un control de calidad mediante la toma de muestras duplicadas, que han sido enviadas para su análisis a un laboratorio de referencia externo (SGS). Los resultados obtenidos se han contrastado con las concentraciones determinadas por el laboratorio Pirenarium (P). En las siguientes tablas se recogen los resultados obtenidos en ambas campañas.

Tabla 7. Resultados analíticos (µg/l) muestras de contraste (abril 2024)

Compuesto	P26		P129		P98		P142	
	P	SGS	P	SGS	P	SGS	P	SGS
alfa-HCH	896	21	324	220	223	430	85	170
beta-HCH	58	2	52	42	43	65	13	25
gamma-HCH	1.172	15	8	19	13	14	281	45
delta-HCH	2.851	110	1.437	2.400	1.010	4.500	74	1.600
épsilon-HCH	224	20	253	500	173	920	29	430
HCH total	5.201	168	2.074	3.181	1.462	5.929	482	2.270

Tabla 8. Resultados analíticos (µg/l) muestras de contraste (octubre 2024)

Compuesto	P27		P129		P98		P142	
	P	SGS	P	SGS	P	SGS	P	SGS
alfa-HCH	206	420	137	300	188	240	175	270
beta-HCH	60	160	8	23	13	27	16	41
gamma-HCH	244	290	281	480	73	61	62	99
delta-HCH	2.148	2.800	1.332	1.600	2.654	2.100	2.725	2.400
épsilon-HCH	365	450	176	200	312	260	388	340
HCH total	3.023	4.120	1.934	2.603	3.240	2.688	3.366	3.150

En la campaña de abril, los resultados fueron algo dispares en las muestras P26 y P142, detectándose una diferencia de entre uno y dos grados de magnitud en el análisis de todos los isómeros. En el caso del laboratorio Pirenarium, se reportó al alza en P26 y a la baja en P142.

Por su parte, en la campaña de octubre, los valores obtenidos por ambos laboratorios fueron muy similares, y encontrándose dentro del mismo orden de magnitud en la mayoría de los casos, a excepción del beta-HCH en P27 y P129, si bien puede estimarse dentro de la normalidad, de acuerdo con la variabilidad propia de este compuesto en estas muestras.

2.6 Campañas de muestreo mensual

Desde marzo de 2015, se lleva a cabo un seguimiento mensual de la evolución de las concentraciones en los sondeos P126, P140 y P142 de la Zona de Descarga. El motivo de efectuar este control más detallado se debió a la detección de valores máximos de benceno, monoclorobenceno y HCH total en P126, sondeo que se ubica en la capa M a orillas del río Gállego, en la campaña de muestreo realizada en el mes de marzo de 2015, unos 6 meses después de que terminaran las obras del desmantelamiento del vertedero de HCH.

Gracias a este seguimiento más en detalle, se puede obtener una imagen periódica de la evolución y estado de la pluma de afección en su cercanía al río Gállego. No obstante, a lo largo de los años, los trabajos de remediación y de control en el vertedero de Bailín han ido aumentando de manera progresiva. Bajo estas condiciones, es más probable que se produzcan más frecuentemente cambios y variaciones en la pluma en fase disuelta, no solamente inducidos por efectos estacionales, sino también por las actuaciones llevadas a cabo.

Por otro lado, de mayo de 2022 a octubre de 2024, se ha estado realizando un control mensual adicional sobre sondeos de capa M ubicados en zona de foco (P171, en Zona 0), en zona media de pluma (P129, en Zona de Barrera), y en zona distal de pluma, antes de Zona de Descarga (P222, aguas debajo de Barranco 4). Sin embargo, debido a que se ha implementado un control más exhaustivo mediante la ampliación de las campañas que antes se realizaban de modo semestral a frecuencia trimestral, donde estos sondeos están incluidos, y en base a la evolución de las concentraciones observada estos últimos años, se ha considerado suficiente para el seguimiento de la evolución de la pluma, por lo que se han excluido del control mensual desde el mes de noviembre de 2024.

En la siguiente figura se muestra la ubicación de los sondeos sobre un plano del emplazamiento.

Figura 9. Ubicación de los sondeos incluidos en la campaña mensual de muestreo



Cabe destacar que, desde octubre de 2015, las campañas mensuales de muestreo de los tres sondeos de la Zona de Descarga (P126, P140 y P142) se realizan con filtro de 0,45 μm , debido a la excesiva turbidez que presentan habitualmente las muestras en esta zona. Cabe destacar que el empleo de los filtros no repercute significativamente en las concentraciones de los compuestos más volátiles como el benceno y monoclorobenceno, de modo que se garantiza un seguimiento más homogéneo de la evolución de estos compuestos. No obstante, para no comprometer el análisis de la evolución de las concentraciones, en las campañas de muestreo semestral se toman también muestras sin filtro en estos sondeos.

Por su parte, debido a que los muestreos de los sondeos P222, P129 y P171 se realizaban históricamente sin filtro, se ha mantenido este método para mantener la comparabilidad. Es por ello que la comparación directa de las muestras tomadas en los sondeos P222, P129 y P171 con las de Zona de Descarga debe realizarse con cautela.

Así mismo, a raíz de las diferencias detectadas en el último año en las concentraciones de HCH de las muestras tomadas con y sin filtro, se ha añadido la medición de la turbidez como parámetro adicional de control. La turbidez da una idea de la cantidad de finos en suspensión que pueden existir en una muestra, lo cual está directamente relacionado con una mayor concentración de partículas en suspensión en el agua subterránea y, por tanto, una potencial mayor concentración de contaminantes.

Especialmente, el HCH, al ser un compuesto hidrófobo, se adhiere al material particulado con mayor facilidad que el resto de los compuestos presentes en el agua subterránea, que son más solubles, y al aumentar la proporción de finos, puede producirse un aumento en su concentración.

Por último, con motivo de favorecer la biodegradación aeróbica de los compuestos volátiles antes de su descarga al río Gállego, en acuerdo con la Dirección Facultativa y la CHE, se definió una actuación de control basada en la instalación de dispositivos de liberación pasiva de oxígeno (ORCs, de sus siglas en inglés) en los sondeos P222, P140, P141 y P142.

Estos dispositivos, de forma tubular, contienen peróxido de calcio en polvo, lo cual es un liberador lento de oxígeno activo cuando reacciona con el agua. En contacto con el agua subterránea, el peróxido de calcio comienza a diluirse lentamente.

El aporte de oxígeno facilita a la comunidad microbiana la capacidad de degradación aeróbica del benceno y clorobenceno, y además, gracias al carácter alcalino del producto, se induce un aumento de pH en el agua subterránea que favorece la reducción de concentraciones de HCH por procesos de deshalohidrogenación. Los ORCs se instalaron en los sondeos de control el día 6 de julio de 2023 y actualmente se encuentran instalados según la siguiente distribución.

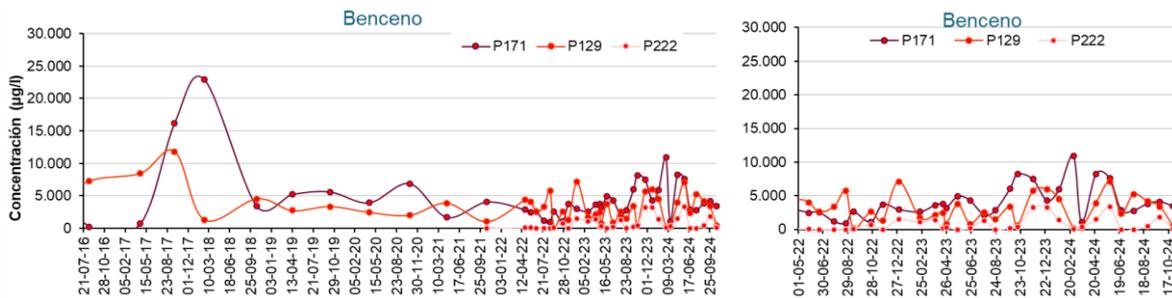
Tabla 9. Distribución de ORCs en los sondeos de control

Sondeo	Nº ORCs instalados	Diámetro ORCs	Longitud ORCs (m)	Profundidad instalación
P222	2	1"	1	33 y 37 m
P140	4	1"	1	20, 24,6, 29,2 y 34 m
P141	5	2"	0,4	16, 18,4, 20,8 23,2 y 25,6 m
P142	8	2"	0,4	40, 40,8, 41,6, 42,4, 43,2, 44,0, 44,8 y 45,6 m

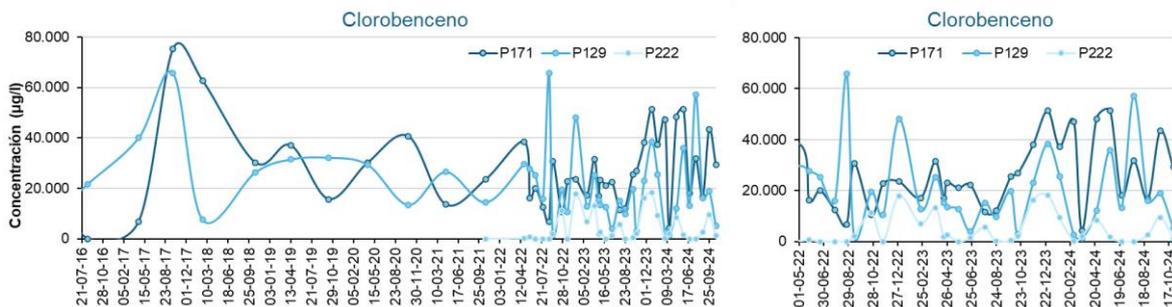
Resultados analíticos

En las siguientes gráficas se representa la evolución histórica de las concentraciones en P171, P129 y P222 hasta octubre de 2024. Para facilitar la visualización, en la gráfica de la derecha se representa únicamente la evolución registrada desde que comenzaron los muestreos mensuales, en junio de 2022.

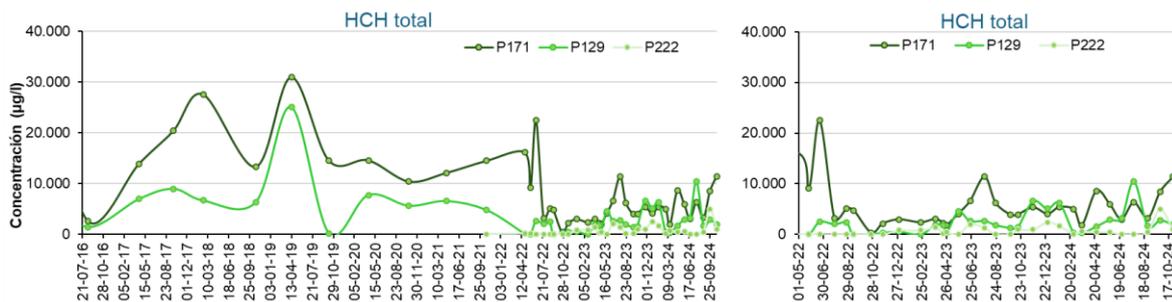
Gráfica 24. Gráfica 25. Evolución de las concentraciones de benceno en P222, P129 y P171 (julio 2016-octubre 2024)



Gráfica 25. Evolución de las concentraciones de monoclorobenceno en P222, P129 y P171 (julio 2016-octubre 2024)



Gráfica 26. Evolución de las concentraciones de HCH total en P222, P129 y P171 (julio 2016-octubre 2024)



En las gráficas que se incluyen en la siguiente página se representa la evolución de las concentraciones en la Zona de Descarga desde octubre de 2015 hasta diciembre de 2024. En la parte inferior se señalan las actuaciones más relevantes que han podido tener influencia en la evolución de las concentraciones, como la instalación de los liberadores de oxígeno de mayo de 2016 a julio de 2018 ("ORCs"), los ensayos ISCO en 2016, 2019, 2020 y 2022 ("ISCO"), los ensayos de aireación y extracción de vapores en 2018 y 2019 ("AS/SVE"), actuaciones puntuales de inyección de oxidantes de 2019, 2020 y 2021 ("inyecciones") o los eventos enmarcados dentro del proyecto LIFE llevados a cabo entre 2021 y 2022, etc.

De acuerdo con la evolución de las concentraciones en las distintas zonas, se puede destacar lo siguiente:

- En el caso del **benceno y monoclorobenceno**, se produjeron repuntes en los sondeos en febrero, abril-mayo, julio y septiembre en los sondeos ubicados aguas arriba de la Zona de descarga, los cuales se han visto reflejados en mayor o menos medida en los sondeos de la Zona de Descarga.

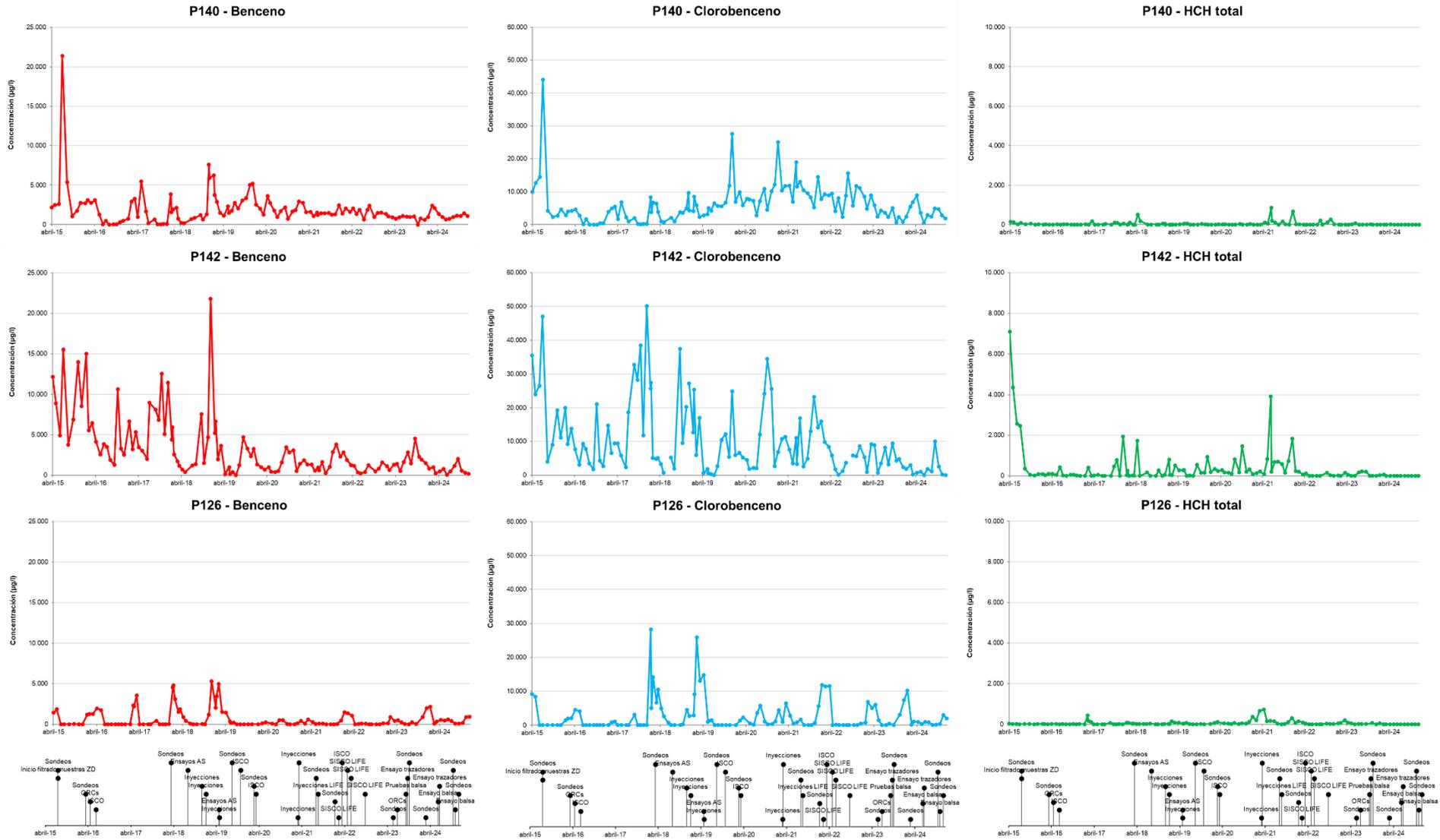
Los eventos de febrero y septiembre podrían deberse principalmente al impacto de la época de lluvias más intensas. Los aumentos de concentración se han venido relacionando históricamente con el aumento del flujo de masa a consecuencia de un mayor régimen de precipitaciones, cuyo efecto no se produce de forma inmediata, sino que depende de la velocidad de flujo que transporta la carga contaminante desde aguas arriba de la capa M, por lo que los incrementos de concentración se suelen detectar con retardo en la Zona de Descarga respecto al resto de sondeos.

Otros ascensos puntuales pueden ocasionarse por la influencia de algunas actuaciones, como las campañas de perforación de sondeos, que, al inyectar volúmenes importantes de agua, promueven un efecto combinado de empuje hacia aguas debajo de la carga contaminante y un efecto de lavado de las fracturas que facilitaría un aumento de la velocidad de flujo a través de la red de fracturación, y consecuentemente una mayor flujo de masa en estos periodos.

No obstante, la variabilidad de los resultados se mantiene dentro del rango observado en los últimos años.

- En cuanto al **HCH total**, los repuntes asociados a actuaciones y eventos de precipitaciones son más moderados y las concentraciones se mantienen más estables en la Zona de Descarga, siendo más elevadas en zonas aguas arriba en función de la cercanía de los sondeos al foco.

Gráfica 27. Evolución de las concentraciones de benceno, clorobenceno y HCH total en los sondeos P140, P142 y P126 (octubre 2015-diciembre 2024)



2.7 Seguimiento del sistema de drenaje ubicado en la Zona 0

En el mes de junio de 2023, se llevaron a cabo trabajos de limpieza y aspiración de arquetas y tuberías del sistema de drenaje ubicado en la Zona 0, ya que parte de las conducciones se encontraban colmatadas. Debido a ello, se decidió llevar a cabo un seguimiento de los caudales subsuperficiales que discurren por el barranco que atraviesa norte-sur esta zona del emplazamiento (Barranco 2) y de las concentraciones de esta agua con los siguientes objetivos:

- Establecer una relación entre los caudales subsuperficiales y la presencia de fase libre residual en el subsuelo en esta zona.
- Dimensionar la capacidad drenante del sistema y poder replantear uno similar, o con ciertas modificaciones, en caso de plantear actuaciones de sellado de la capa M en un futuro.

En la siguiente figura se muestra un esquema sintetizado del sistema de drenaje y la situación de las arquetas (1, 2 y 3) y tuberías, y a continuación, se adjuntan fotografías de las 3 arquetas: la de la izquierda corresponde a la arqueta 3, donde vierte la tubería 2; la del medio corresponde a la arqueta 2, donde finaliza el dren francés; y la de la derecha corresponde a la arqueta 1, que recolecta los 4 ramales (3 en el fondo de la arqueta y un cuarto más elevado sobre las escaleras de acceso).

Figura 10. Sistema de drenaje zona 0 esquematizado

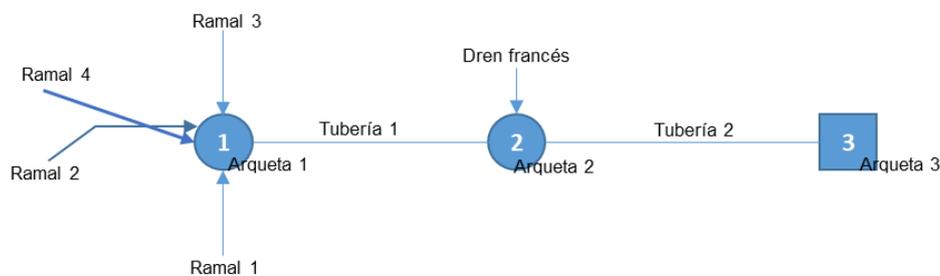


Figura 11. Fotografías de las 3 arquetas del sistema de drenaje de la Zona 0



Para el estudio, se han ido realizando labores de aforado y muestreo de los caudales en varios puntos del sistema (ramal 1, ramal 2, ramal 3, ramal 4, arqueta 2, dren francés y arqueta 3) con una periodicidad semanal en enero y febrero. En marzo la periodicidad pasó a ser mensual debido a la escasa variabilidad de concentraciones y caudales detectada a lo largo del año. Las muestras se han tomado preferentemente haciendo coincidir el evento de muestreo con un episodio de precipitaciones, para evaluar los potenciales incrementos de concentración y el rango de aumento de caudales en el sistema, y establecer así relaciones del flujo de masa proveniente de la escorrentía subsuperficial.

Las mediciones este año se han realizado de enero a agosto de 2024. Durante el mes de abril no se pudo efectuar el seguimiento debido a la realización de la campaña de perforación de sondeos, al canalizarse el agua de las perforaciones en la arqueta de cabecera del sistema de drenaje de la Zona 0 (donde vierten las aguas los ramales 1, 2 y 3) para su trasvase posterior al decantador.

A partir de agosto, estos controles periódicos han cesado, ya que se han obtenido datos suficientes para estudiar la dinámica de las fluctuaciones, que se ha visto confirmada campaña tras campaña.

En la siguiente tabla se muestra el caudal medido en cada punto de control y el acumulado en m³/día medido desde el día 4 de enero. Cabe mencionar que, debido a que el fondo de la arqueta 1 se encuentra a 3,5 m de profundidad, no es posible acceder a las tuberías de drenaje (ramales) para tomar una muestra o medir el caudal con métodos precisos.

Tabla 10. Caudales medidos en el sistema de drenaje Zona 0 en m³/día (enero-agosto 2024)

Fecha	Ramal 1	Ramal 2	Ramal 3	Ramal 4	Arqueta 2 - tubería 1	Dren francés	Arqueta 3 - tubería 2
04/01/2024	0	0	0	0	0,461	0	0,288
09/01/2024	0	0	0	0	0,432	0	0,274
16/01/2024	0	0	0	0	0,418	0	0,288
25/01/2024	0	-	0	0	1,454	0	1,411
01/02/2024	0	-	0	0	0,792	0	0,691
05/02/2024	0	0	0	0	0,576	0	0,461
13/02/2024	-	-	-	0	2,002	0	1,886
20/02/2024	-	-	-	-	4,262	0	4,147
27/03/2024	0	0	0	0	7,200	0	5,760
03/05/2024	0	0	0	0	1,728	0	1,728
24/06/2024	0	0	0	0	0,158	0	0,144
07/2024	0	0	0	0	0	0	0
08/2024	0	0	0	0	0	0	0
Acumulado (m³/día)	0,238	0,101	0	0	36,570	0	31,846
Caudal total acumulado (m³/día) del 28 de junio de 2023 a agosto de 2024							68,755

De forma general, los caudales medidos en las tuberías de drenaje son más elevados que los correspondientes a la suma de caudales de los elementos anteriores al punto de medición, sobre todo en la arqueta 2 (es decir, el caudal que sale por la tubería 1 a la arqueta 2 es más alto que el sumatorio de los ramales que conectan a la arqueta 1), lo que indica que se produce un aporte de escorrentía hacia las arquetas no solo a través de las conducciones que las conectan.

Esto es debido a la rotura en las tuberías 1 y 2, que conectan las tres arquetas, como pudo comprobarse grabando ambas tuberías con la cámara de video de los sondeos. Las roturas son consecuencia del crecimiento de raíces de los árboles colindantes.

Durante el mes de marzo de 2024 se registraron en las arquetas 2 y 3 los caudales más elevados desde que se inició el seguimiento, mientras que a medida que se acercaba el periodo estival estos valores descendieron, lo cual es acorde al régimen de precipitaciones registrado.

En la siguiente tabla se muestran los resultados de las concentraciones de benceno, monoclorobenceno y HCH total analizadas en cada arqueta. Cabe destacar que no se pudo muestrear la arqueta 1 por la imposibilidad de acceder a las tuberías de drenaje (ramales), y no se acumularon volúmenes de agua suficientemente altos como para poder tomar una muestra del fondo de la arqueta con un muestreador o recipiente de muestreo. Además, en los meses de julio y agosto el sistema de drenaje se encontraba seco por las bajas precipitaciones, por lo que no se realizaron muestreos.

Tabla 11. Concentraciones de benceno, clorobenceno y HCH total (enero-diciembre 2024)

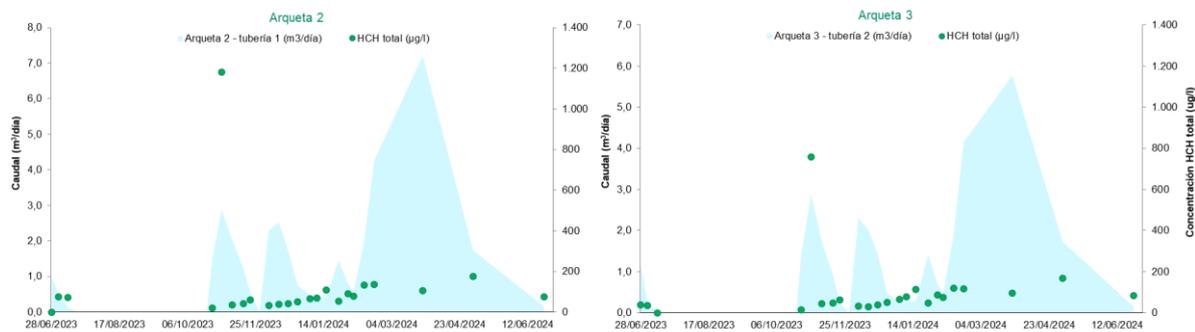
Fecha	Arqueta 2 (tubería 1)			Arqueta 3 (tubería 2)		
	Benceno (µg/l)	Monoclorobenceno (µg/l)	HCH total (µg/l)	Benceno (µg/l)	Monoclorobenceno (µg/l)	HCH total (µg/l)
04/01/2024	0,3	3,2	66	1	11	64
09/01/2024	<0,1	0,8	70	0,2	4	78
16/01/2024	<0,1	0,2	109	0,3	4	114
25/01/2024	<0,1	0,4	54	<0,1	3	47
20/02/2024	102	462	136	4	51	117
27/03/2024	70	628	106	2	40	96

Fecha	Arqueta 2 (tubería 1)			Arqueta 3 (tubería 2)		
	Benceno (µg/l)	Monoclorobenceno (µg/l)	HCH total (µg/l)	Benceno (µg/l)	Monoclorobenceno (µg/l)	HCH total (µg/l)
03/05/2024	49	1.379	177	<0,1	11	167
24/06/2024	<0,1	<0,1	76	<0,1	0,1	84

Las concentraciones detectadas en el sistema son significativamente bajas en comparación con las observadas en el acuífero, siendo la concentración de HCH total la más alta en comparación con los compuestos más volátiles. Esto es concordante con la fuente de afección, ya que proviene del arrastre de escorrentías subsuperficiales y no del agua subterránea, ya que en este último caso, la fuente principal de benceno y clorobenceno es el DNAPL presente en las fracturas de la zona saturada.

En ambas arquetas, las concentraciones más elevadas se dieron durante el muestreo de febrero y el de mayo, coincidiendo con episodios de precipitaciones más intensas. En la siguiente gráfica se representa la evolución de caudales y concentraciones de HCH registrada desde junio de 2023 a junio de 2024.

Gráfica 28. Evolución de caudales (m³/día) y concentraciones de HCH total (µg/l) en las Arquetas 2 y 3 de la Zona 0 (junio 2023-junio 2024)



Los caudales que se recogen en las dos arquetas se producen en función del régimen de precipitaciones, coincidiendo con los episodios de mayor intensidad aquellos días en los que se registra un mayor caudal. En cuanto a la concentración de HCH, fue muy similar en ambos puntos de registro, si bien se detectaron concentraciones ligeramente mayores en la Arqueta 2, aunque también los caudales fueron ligeramente superiores.

Es notable por otro lado, el pico relativamente anormal de concentración que se analizó en el muestreo del día 31 de octubre, tras un evento de precipitación significativo que tuvo lugar el día 30. En estas arquetas se recoge la escorrentía subsuperficial pero también se filtra escorrentía superficial, por lo que puede producirse un aporte de contaminación adicional, no solo debido al lavado de la red de fracturación más somera en la zona vadosa en esta zona de barranco. Cabe destacar que, de febrero a mayo de 2024, coincidiendo con el periodo de lluvias, se registran los caudales más elevados desde que se comenzó el seguimiento. En este periodo, las concentraciones de HCH fueron superiores a otros meses con caudales más bajos, pero se mantuvieron dentro de la tendencia general.

Los caudales medios se situaron entre los 0,79 m³/día (Arqueta 3) y los 0,92 m³/día (Arqueta 2), con máximos de algo menos de 7,2 m³/día en momentos de precipitación más intensa, lo que da una idea de la capacidad drenante del sistema. En este aspecto, se produce una pérdida promedio de caudal entre ambos puntos de unos 0,11 m³/día debido a la rotura de las tuberías de conexión, que se pierde subsuperficialmente por el eje del barranco.

Así mismo, teniendo en cuenta los caudales por la concentración de HCH, el flujo de masa de HCH que se movería hacia la Arqueta 2, sin tener en cuenta los picos registrados el día 31 de octubre, se encontraría en torno a los 132 mg/día de media, y en la Arqueta 3, sobre los 103 mg/día.

3. Campañas de conductividad y temperatura

Los programas de control mediante la medida de perfiles de conductividad y temperatura son utilizados para evaluar, entre las campañas de muestreos semestrales, posibles variaciones en la calidad química del agua, que indiquen de forma indirecta cualquier variación estacional de las zonas de flujo preferentes, así como de la carga contaminante presente en el agua subterránea.

Así mismo, desde que se realizan tratamientos fisicoquímicos para la remediación, como los ensayos de oxidación química *in situ* (ISCO), que aumentan la conductividad del acuífero en equilibrio con las concentraciones, estas campañas también sirven para monitorizar la distribución de los aditivos en distintas partes de emplazamiento, y su agotamiento o persistencia en los sondeos.

Por lo general, se toman medidas de conductividad y temperatura con sondas tipo TLC cada 10 m desde el nivel del agua hasta prácticamente el fondo del sondeo, con la excepción de los sondeos de la capa M, donde se toman medidas cada 5 m.

La **temperatura**, en general, es un parámetro bastante homogéneo dentro del mismo sondeo, donde los perfiles muestran variaciones de la temperatura en la vertical influenciadas por factores como la carga hidráulica del acuífero, la presencia de escorrentía subsuperficial, la profundidad de los sondeos, o la presencia de DNAPL. Además, también hay que tener en cuenta que entre campañas también se producen variaciones asociadas a cambios estacionales.

Por su parte, la **conductividad** es un parámetro que puede tener una mayor variación y en condiciones de equilibrio varía fundamentalmente en función de la carga contaminante y la tasa de precipitación, que condiciona la recarga del acuífero y, en consecuencia, la renovación del agua subterránea en los sondeos. De manera general, los valores más altos de conductividad se suelen registrar en los sondeos con presencia de DNAPL y en los tramos profundos de los sondeos situados entre el Barranco 3 y Barranco 4, que tienen una menor recarga de agua.

Por otro lado, este parámetro también es sensible a la presencia de otros compuestos en el agua subterránea, como algunos aditivos empleados en los ensayos y trabajos de remediación que se inyectan en el acuífero. De este modo, se puede emplear como trazador para visualizar la distribución de los productos y evaluar su variación en función de las condiciones de equilibrio en el agua subterránea. Así mismo, es habitual que los compuestos persistan en mayor o menor medida en el interior de los sondeos con una conexión más limitada con la red de fracturación, especialmente en el fondo, donde pueden precipitar y mantenerse un tiempo más prolongado.

En las gráficas de las páginas siguientes se representa una vista en planta con los valores de temperatura y conductividad a la cota del nivel piezométrico junto con un perfil de la distribución de estos parámetros en la capa M en profundidad de las dos campañas efectuadas este año, en agosto y diciembre.

Respecto a los valores de **temperatura**, los valores más altos se han registrado en los sondeos situados en la zona del vaso en las cotas más someras, y en sondeos de Zona 0 situados en capas por debajo de la M. Así mismo, los sondeos en zonas de foco (vaso y Zona 0), con presencia de DNAPL y DNAPL residual, son los que han presentado valores más elevados de temperatura en profundidad. Por su parte, los valores más bajos se han detectado en los sondeos en zonas de barranco y junto al río (Barranco 0, Barranco 3, Barranco 4 y Zona de Descarga).

Respecto a los valores de **conductividad**, es notable el hecho de la persistencia en profundidad de los productos oxidantes inyectados en las diferentes actuaciones de remediación que se han efectuado en los últimos años. De este modo, existe una distribución de valores elevados de conductividad en la mayoría de los fondos de los sondeos situados en capa M desde el Barranco 3 hasta aguas abajo del Barranco 4, y en la zona del vaso.

Por otro lado, se observa un ascenso en las conductividades de forma general a cota de nivel piezométrico durante 2024, de forma que muchas de las zonas que en años anteriores mostraban valores menores a 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$, han mostrado valores entre los 1.000 y 2.000 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$. Esto podría deberse a una disminución de la cota del nivel piezométrico respecto a años anteriores, y a la influencia de una mayor concentración a mayor profundidad.

Figura 12. Distribución de la temperatura. Campaña agosto 2024

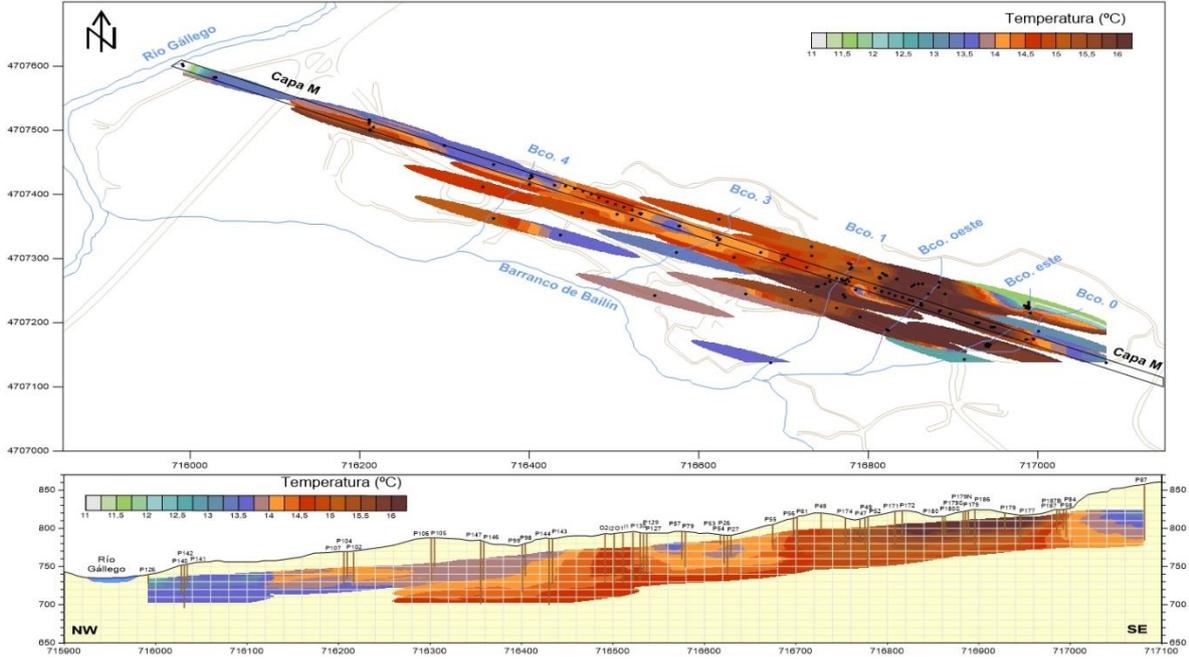


Figura 13. Distribución de la temperatura. Campaña diciembre 2024

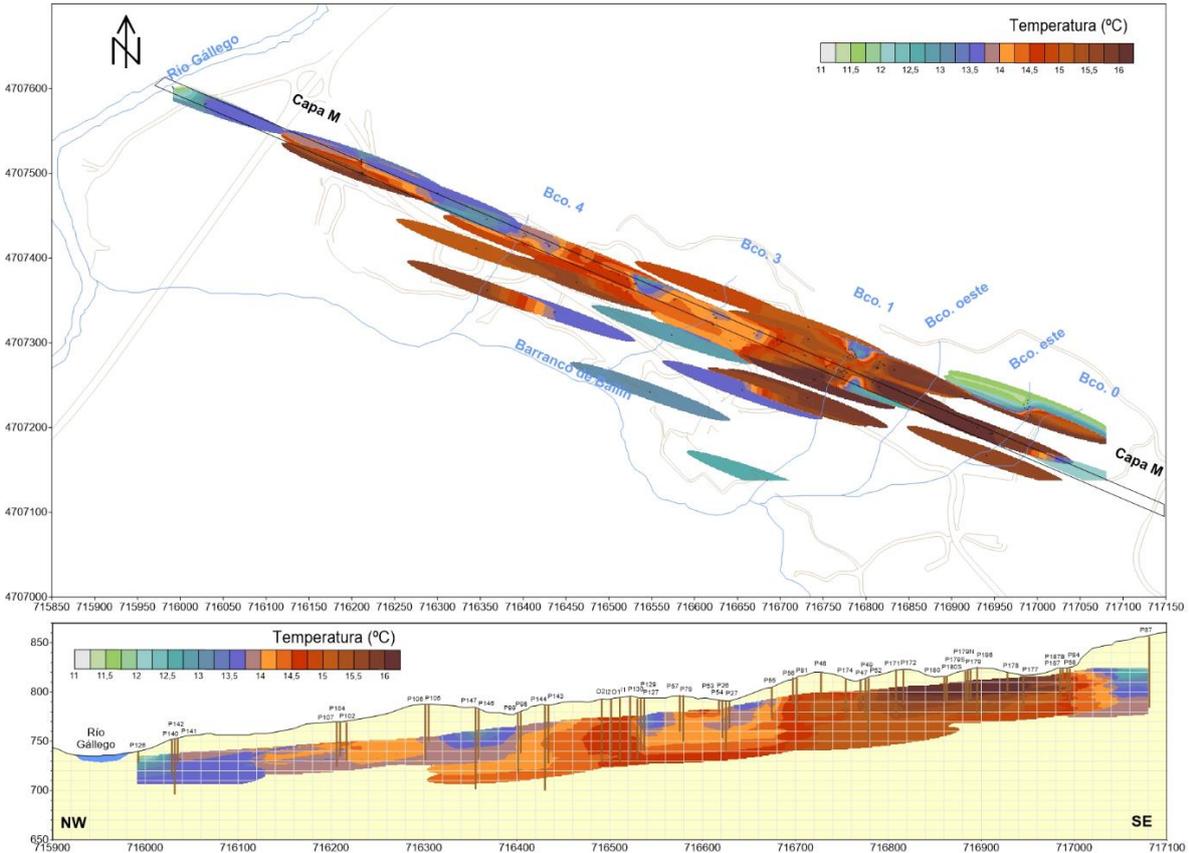


Figura 14. Distribución de la conductividad. Campaña agosto 2024

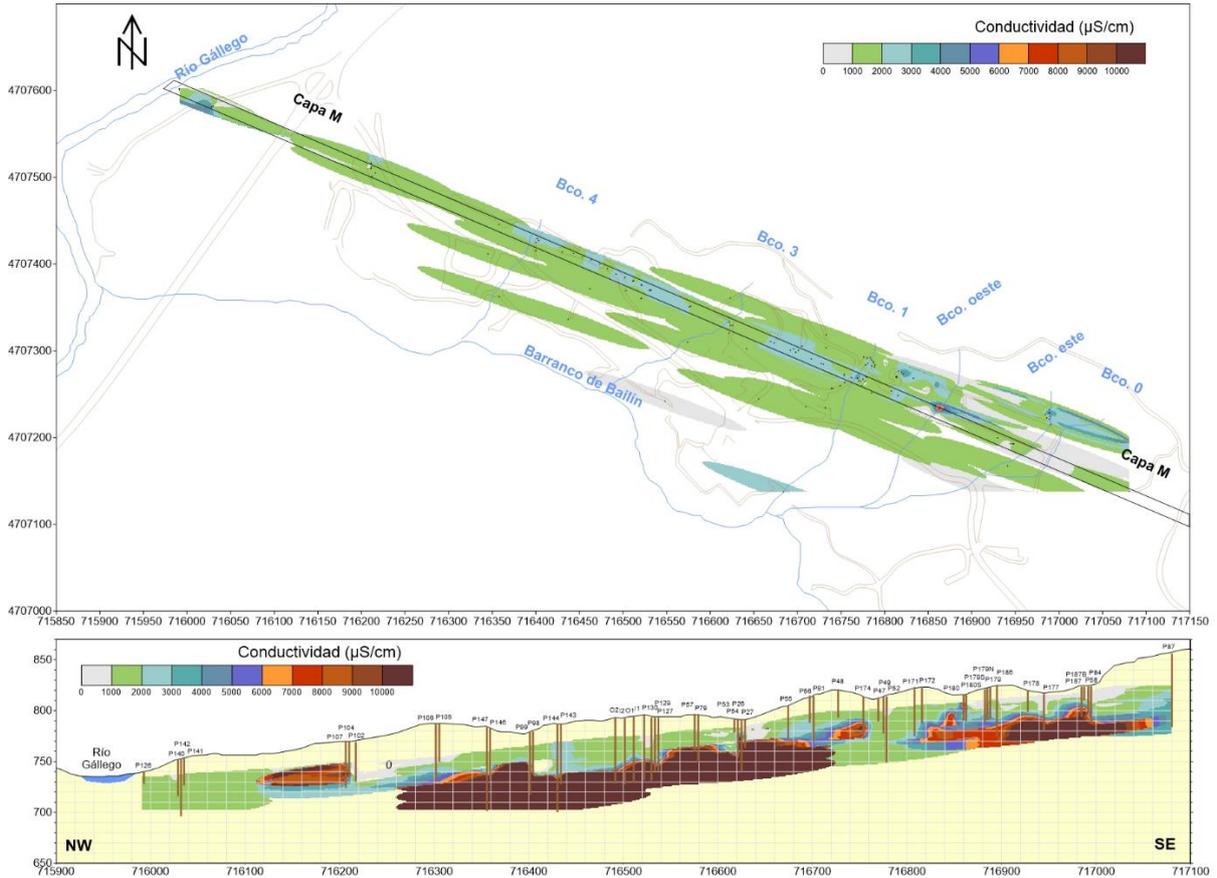
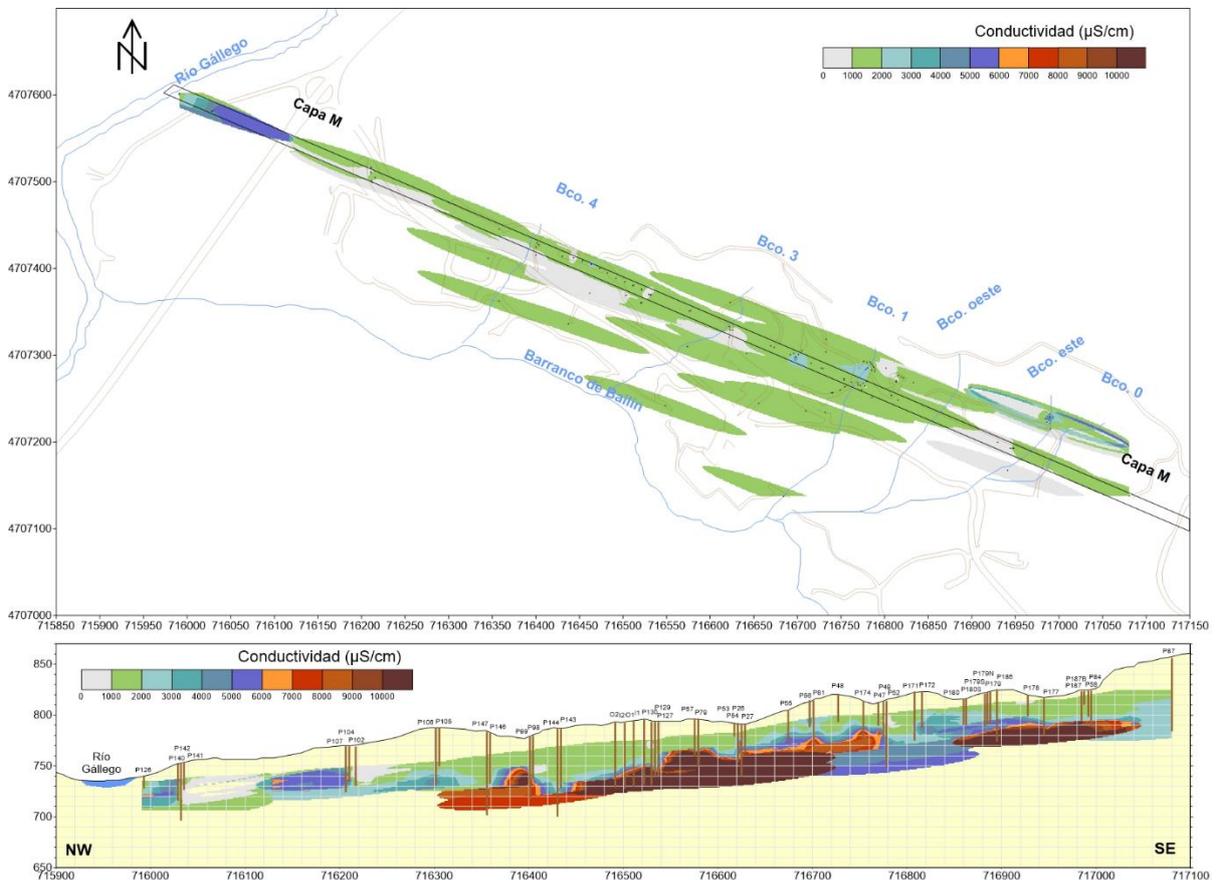


Figura 15. Distribución de la conductividad. Campaña diciembre 2024



4. Actuaciones de mantenimiento

El mantenimiento de todas las instalaciones y equipos disponibles en el emplazamiento constituye una labor prioritaria para garantizar el desarrollo óptimo de los trabajos de seguimiento. En particular, es indispensable mantener en perfecto estado de funcionamiento el sistema de extracción y todos los elementos que lo componen, de forma que las actuaciones de bombeo no se vean interrumpidas por eventuales fallos o por el desgaste de los componentes.

Durante los últimos años, se ha incrementado el número de equipos y tareas de mantenimiento a realizar en el seguimiento. Por ello, y con el objetivo de llevar un mayor control y trazabilidad de todos los trabajos, AECOM ha sistematizado y digitalizado gran parte de las tareas que se programan y actualizan semanalmente.

Las revisiones se efectúan con una periodicidad diversa (diaria, semanal y mensual en función del tipo de equipo o instalación) con el fin de identificar de forma preventiva fallos de funcionamiento o falta de operatividad de los equipos. La correcta planificación de estos trabajos repercute en una reducción de los tiempos y costes asociados a estos contratiempos.

A continuación, se detallan las principales actuaciones relativas al mantenimiento de las instalaciones llevadas a cabo en el emplazamiento este año 2024. En el [Anexo B](#) se recoge el inventario de equipos y fungibles disponibles en el emplazamiento y en el [Anexo C](#) se recopilan fotografías relativas a los trabajos de mantenimiento realizados.

4.1 Actuaciones de mantenimiento correctivo

Las principales actuaciones de mantenimiento correctivo realizadas a lo largo del año se recopilan a continuación:

- Reparación del generador de emergencia de la Zona Industrial.
- Vaciados del decantador.
- Reparación de la bomba del sondeo P175.
- Reparación y sustitución de mangueras de abastecimiento al sondeo P175.
- Reparaciones y limpieza del biorreactor instalado en el sondeo I1 de la Zona de Barrera.
- Reparación y reemplazo de la garrafa de abastecimiento de sosa de la planta de tratamiento en Zona 0.
- Sustitución de cerraduras en la caseta de los compresores y del almacén de la Zona Industrial.
- Limpieza y adecuación de la plataforma de almacenamiento de la Zona Industrial.
- Sustitución de grupo electrógeno de emergencia.
- Reposición de la acometida eléctrica tras el robo producido en las instalaciones.
- Reparación del compresor.
- Limpieza del tomamuestras de DNAPL del decantador.
- Limpieza de obstrucción en la bomba instalada en el sondeo P232.
- Limpieza y reparación de la bomba instalada en el sondeo P240
- Cambio de la manguera de riego deteriorada ubicada en la Zona Industrial.
- Reparación del grifo de la fuente de suministro de agua de la zona oficinas.
- Sustitución de la cinta y cabezal de la sonda hidronivel SN02.
- Sustitución de la bomba de achique del Barranco 3.
- Reparación y limpieza de las bombas *bladder* de los sondeos I1, I1S, O1, O1S y O2 de la Zona de Barrera.
- Reparación de la tubería de extracción de agua en P55.
- Sustitución de la electroválvula del sistema de aire de la bomba neumática del sondeo P56.
- Sustitución de cuadro eléctrico para la bomba de impulso del Barranco 3.
- Desatascado del sondeo P231.

- Limpieza y adecuación del vial de acceso a la zona 0 y techado de los remolques de la zona.
- Retirada de electroválvula dañada en el sondeo P52.
- Limpieza y remodelación de las canalizaciones de P175.
- Limpieza de zona de paso afectado por la caída de un árbol.

4.2 Actuaciones de mejora de las instalaciones

Las actuaciones realizadas a lo largo de 2024 relativas a la mejora de las instalaciones, incluyendo obras de adecuación de accesos, se resumen a continuación.

- Desbroces y limpieza de cuentas y canalizaciones.
- Instalación de puerta en los vestuarios del Blanco y Negro.
- Instalación de nueva lavadora en el vestuario Blanco y Negro.
- Adecuación del maletín con el sistema de bombeo para la realización de las labores de muestreo.
- Adecuación del sondeo P151 de la Zona 0 para la realización de bombeos dinámicos.
- Realización de obras de mejora y adecuación de accesos para las campañas de perforación de sondeos.
- Instalación de bombas de abastecimiento de agua en vestuarios.
- Instalación de un tejado en la entrada de la oficina.
- Instalación de una pared separadora en los vestuarios del Blanco y Negro.
- Adecuación del sistema e instalación de un calentador de agua en los baños de las oficinas.
- Adaptación del sondeo P177 para la futura colocación del biorreactor aeróbico de campo.
- Redistribución de las casetas de almacén ubicadas en el aparcamiento de las oficinas.
- Acondicionamiento de equipos para los ensayos de infiltración y trazadores.
- Traslado de oxidantes a la planta de transferencia y a la caseta de Zona de Barrera.
- Modificación en la bomba instalada en el sondeo P49 para recuperar DNAPL.
- Instalación de nuevas arquetas en sondeos para la instalación de equipos LORA.
- Excavación de una zanja e instalación de tubos para poder pasar mangueras desde los equipos de la Zona Ermita al decantador.

4.3 Otros trabajos

Otros trabajos realizados en el emplazamiento han sido:

- Instalación eléctrica, montaje y pruebas de carga del biorreactor aeróbico de campo.
- Limpieza y desmontaje de la planta de sosa.
- Abastecimiento de agua para las campañas de sondeos.
- Retirada de las tuberías de una instalación antigua de bombeo en P79.

4.4 Adecuación del sistema de remediación en Zona Ermita

En el marco de los trabajos para la ejecución de ensayos físico-químicos que comenzó en el contrato anterior relativo al Seguimiento Hidrogeológico de Bailín, 2ª Prórroga mayo 2023-agosto 2024, durante 2024 se ha llevado a cabo la adecuación e instalación del sistema de remediación ubicado en la llamada Zona Ermita en Zona 0.

Los elementos principales de que consta esta instalación son los siguientes:

- Bomba eléctrica Grunfos SQE 1-65 con variador de frecuencia para la extracción.
- Decantador de 4,5 m³ de capacidad, de acero inoxidable.
- 2 depósitos de 5.000 l conectados en serie al decantador.
- 2 depósitos de 1.000 l para la mezcla de reactivos.

- 2 depósitos de 12.000 l para almacenar/recircular las mezclas de reactivos y almacenar agua limpia para las mezclas.
- 2 agitadores instalados en los depósitos de 1.000 l.
- 4 bombas de trasvase ESPA Prisma 35 3N para la recirculación de los tanques de 5.000 l al tanque de 12.000 l, trasvase de los tanques de 1.000 l al de 12.000 l, inyección de la mezcla a los sondeos de actuación, y trasvase del depósito de 12.000 l (agua limpia) a los de 1.000 l para la mezcla.
- 2 caudalímetros COMAC 24VC para el control de los caudales de inyección y recirculación.

Los principales trabajos relativos al montaje del sistema de remediación realizados han sido los siguientes:

- Adquisición de equipos.
- Ampliación del cubeto de contención. En agosto de 2024 se efectuó una obra de ampliación del cubeto con el objetivo de disponer de la capacidad necesaria para albergar todos los equipos.
- Instalación de decantador y sobreelevación. Se diseñó y fabricó un decantador con capacidad suficiente para los ensayos y se instaló en una plataforma hormigonada elevada dentro del cubeto que fue ejecutada para tal fin dentro del cubeto.
- Adquisición e instalación de depósitos de mezcla y recirculación, con instalación de agitadores.
- Instalación de bombas y conexiones.
- Extensión de tubería desde las instalaciones al sistema de extracción en Zona Industrial.

En la actualidad el sistema se encuentra operativo, si bien se requiere la finalización de algunas conexiones eléctricas, incluyendo la instalación de un cuadro eléctrico, y la ejecución de pruebas de carga y funcionamiento. En el **Anexo D** se incorporan los planos relativos al cerramiento de la estructura.

Figura 16. Imágenes de trabajos efectuados para la adecuación de los equipos en Zona Ermita





4.5 Sustitución y mejora de la planta de tratamiento por sosa en Zona Industrial

En el marco de los trabajos para la ejecución de ensayos físico-químicos que comenzó en el contrato anterior relativo al Seguimiento Hidrogeológico de Bailín, 2ª Prórroga mayo 2023-agosto 2024, desde agosto de 2024 se ha llevado a cabo la sustitución de la planta de tratamiento por hidrólisis alcalina (planta de sosa) ubicada en la Zona Industrial.

El diseño de la nueva planta incorpora la instalación de 3 resistencias y un sistema de aireación para potenciar el tratamiento. Así mismo, respecto al anterior diseño, se ha mejorado el canal de entrada al tanque para facilitar la homogeneización del volumen almacenado en el interior de la planta. La planta consta de los componentes que se indican a continuación. Los planos con el diseño de los componentes se encuentran en el [Anexo D](#).

- Depósito de acero inoxidable de 5.000 l de capacidad.
- Soplantes, para el sistema de aireación/extracción de vapores.
- Resistencias.
- Bomba dosificadora.
- pH-metro.
- Depósito de carbón activo.
- Cuadro eléctrico de alimentación a los distintos componentes.

En el mes de agosto comenzaron de desmantelamiento de la antigua planta, la cual presentaba una fuga en una de las juntas. Los trabajos efectuados desde entonces han consistido en:

- Vaciado, limpieza y retirada del tanque de la antigua planta de sosa.
- Fabricación del tanque y soporte para las soplantes y el cuadro eléctrico.
- Instalación eléctrica y del sistema de aireación.
- Fijación del cuadro eléctrico, soplantes y bombas dosificadoras en el soporte.
- Conexión de otros elementos.

Actualmente, todos los componentes ya se encuentran instalados a falta de las últimas conexiones del tanque al depósito de carbón activo y pruebas de carga y funcionamiento.

Figura 17. Imágenes de trabajos efectuados para la instalación de la planta de soda



5. Perforación de sondeos

Este año 2024 se han llevado a cabo 2 campañas de perforación de sondeos, realizadas una en los meses de marzo y mayo, y otra en noviembre.

Los trabajos de perforación se han ejecutado siguiendo en todo momento los protocolos y procedimientos de seguridad y salud específicos, y en coordinación con las empresas concurrentes en el emplazamiento, con el fin de evitar posibles interferencias.

Todos los registros de perforación de sondeos se encuentran recogidos en el [Anexo E](#).

5.1 Sondeos Zona 0 y Barranco 3

Del 6 de marzo al 2 de mayo de 2024 se efectuó la perforación de 13 nuevos sondeos en el emplazamiento ubicados entre la Zona 0 y el Barranco 3 (de P228 a P240).

Uno de los objetivos de la ejecución de estos sondeos era cortar la capa M en zonas de foco primario donde actualmente se dispone de información limitada en profundidad, o bien los sondeos del entorno no se encuentran perforados preferencialmente cortando las zonas de circulación preferente de la capa de arenisca. Estos sondeos además se han empleado en los ensayos de bombeo e inyección de trazadores realizados en 2024.

El otro objetivo era ampliar la caracterización de una zona situada entre las capas I y K en la zona de foco primario, donde se prevé que pudiera existir presencia de fase libre residual en las fracturas, para intentar potenciar la extracción de DNAPL que se encuentra próxima al límite de recuperación hidráulica, y determinar si existen vías de movilización que conecten capas. Adicionalmente, estos sondeos también podrían ser empleados como puntos de monitorización frente a una potencial actuación de remediación en estas capas.

Para la realización de los sondeos fue necesario efectuar accesos adecuados para asegurar el correcto emplazamiento de la maquinaria de perforación y garantizar la ejecución y la seguridad de los trabajos. Asimismo, de manera previa al inicio de las perforaciones se realizaron tareas de conexión para el suministro de agua.

5.1.1 Ubicación y características de los sondeos

Los sondeos planificados en esta campaña se perforaron entre Zona 0 y Barranco 3 en capa M, y en una plataforma en la “rotonda” de la Zona 0, entre las capas K e I.

Figura 18. Localización de los piezómetros perforados en la campaña de marzo-mayo



Todos los sondeos se han perforado con batería doble de 116 mm de diámetro, con corona de diamante y recuperación de testigo continuo, reperforándose un tramo inicial con batería de 128 mm para equipar con boquilla de acero y proteger los sondeos de posibles desprendimientos en las paredes.

Los sondeos quedaron perforados sobre la roca sin instalación de tubería piezométrica. En la siguiente tabla se detallan las profundidades de cada uno de ellos. En total, se perforaron 347,5 m.l

Tabla 12. Profundidad de los sondeos realizados en la campaña de marzo-mayo

Sondeo	Profundidad (m)	Capa	Zona
P228	29,0	M	Zona 0
P229	39,4	M	Zona 0 a Barranco 3
P230	39,1	M	Zona 0 a Barranco 3
P231	35,0	M	Zona 0 a Barranco 3
P232	25,4	M	Zona 0 a Barranco 3
P233	20,2	Otras	Zona 0
P234	15,7	Otras	Zona 0
P235	19,9	Otras	Zona 0
P236	20,0	Otras	Zona 0
P237	20,1	Otras	Zona 0
P238	22,3	Otras	Zona 0
P239	25,3	Otras	Zona 0
P240	36,1	M	Zona 0 a Barranco 3

5.1.2 Testificación de sondeos

Los trabajos de perforación comenzaron el día 6 de marzo con la perforación del sondeo P228 en la Zona 0 y finalizaron el 2 de mayo con la perforación del sondeo P240 en Zona 0 a Barranco 3. A continuación, se describe la litología atravesada en cada uno de los sondeos.

Sondeo P228

La perforación comenzó el día 6 de marzo y finalizó el 13 del mismo mes a la profundidad de 29 m. El nivel freático apareció a los 9,0 m.

Tabla 13. descripción litológica del sondeo P228

De (m)	A (m)	Litología
0	0,5	Relleno arenoso y arcilloso con algún fragmento de arenisca.
0,5	21,4	Arenisca gris muy fracturada con tramo limo-arcilloso de 1,3 a 1,8 m. Arenisca gris algo meteorizada hasta 4,3 m. Entre 3,4 y 3,6 m muy fracturada. Roca sana comienza en 4,8 m.
21,4	22,2	Limolita y arenisca. Contacto entre litologías, interdigitaciones. De 21,8 a 22,0 m zona fracturada con relleno conglomerático.
22,2	29,0	Limolita roja con bioturbación. A partir de 24,8 m limolita roja masiva.

Desde el inicio de la perforación y, tras pasar el relleno correspondiente a la plataforma, se interceptó la arenisca de la capa M. Sin embargo, a partir de los 21,4 m se encontró el contacto con la limolita.

Las fracturas localizadas en este sondeo son en su mayoría menores a 1 mm. A partir de los 17,3 m de profundidad aumentan ligeramente, oscilando entre los 2-5 mm de apertura. Muchas de estas fracturas han presentado signos de afección como olor intenso y restos de DNAPL en forma de gotículas e iridiscencias. En la siguiente figura se muestran varias fracturas afectadas por DNAPL (a 21,80 m; 21,90 m y 22,95 m).

Figura 19. Testigo de 21 m a 23,3 m de P228. Redondeadas en rojo las fracturas con restos de DNAPL



Tras pasar el tramo de materiales de relleno y cortar la capa M, se produjo la pérdida total del agua inyectada para la perforación, entre los 4,6 y 4,7 m de profundidad. Este comportamiento se repite en el resto de las perforaciones realizadas en la capa M.

Sondeo P229

La perforación de este sondeo comenzó el día 14 de marzo y finalizó el 20 del mismo mes alcanzando una profundidad total de 39,4 m. El nivel freático apareció a los 16,7 m.

Tabla 14. Descripción litológica del sondeo P229

De (m)	A (m)	Litología
0	0,6	De 0 a 0,1 m zahorra. De 0,1 a 0,6 m relleno de limolita y árido muy fragmentado.
0,6	4,6	De 0,6 a 1,5 limolita muy meteorizada de color rojizo-ocre. Fragmentos grandes. De 1,5 a 4,7 m limolita roja masiva.
4,6	11,6	Limolita roja con inclusiones de arenisca. De 8,7 a 8,9 m inclusiones de mayor entidad de arenisca y algún canto disperso. De 9 a 10,1 m lentejón de conglomerado con matriz de arenisca y alguna inclusión de limolita roja, tramo heterogéneo muy fracturado. De 10,1 a 11,6 m limolita roja con abundantes inclusiones de arenisca.

De (m)	A (m)	Litología
11,6	19,4	De 11,6 a 12,1 m tramo muy fracturado de arenisca. De 12,1 a 15,2 m arenisca gris sana. De 15,2 a 16,5 m arenisca gris con cantos dispersos de 30 cm de diámetro máximo. De 16,5 a 19,4 m arenisca gris.
19,4	19,6	Arenisca gris con lentejón de limolita roja.
19,6	39,4	Arenisca. En 21,65 m lentejón de limolita. De 36,4 a 39,4 m arenisca con bioturbación rellena de limolita roja.

Tras pasar el tramo de relleno y los primeros metros de limolita muy meteorizada, a 11,6 m se interceptó la capa M. Hasta los 13 m, las fracturas predominantes tenían en torno a 1 mm de apertura y buzamientos de 75 y 90°. De esta profundidad en adelante se encontraron algunas fracturas de mayor espesor (predominando las de 2, 3 y 5 mm), y todas fueron prácticamente horizontales (0-10°).

A partir de los 23,4 m se observó fase libre en algunas de las fracturas. La pérdida total de agua se produjo de los 8,4 a 11,4 m de profundidad.

Figura 20. Fracturas con presencia de DNAPL a 25,9 m, 26,1 m y 26,55 m



Sondeo P230

La perforación comenzó el día 20 de marzo y finalizó el 26 del mismo mes cuando se alcanzó la profundidad final de 39,1 m. El nivel freático se detectó a los 19,86 m.

Tabla 15. Descripción litológica del sondeo P230

De (m)	A (m)	Litología
0	1,0	De 0 a 0,2 m zahorra y gravas. De 0,2 a 0,3 m suelo vegetal. De 0,3 a 1,0 m suelo arcilloso de relleno.
1,0	2,4	De 1 a 1,2 m limolita alterada fracturada. De 1,2 a 2,4 m limolita roja con cantos dispersos de tipo siliciclástico.
2,4	3,5	Contacto limolita roja y conglomerado con 85° de buzamiento. Muy fracturado a consecuencia de la perforación.
3,5	9,4	De 3,6 a 4,3 m arenisca gris muy meteorizada y fracturada con rellenos arcillosos y arenosos. De 4,3 a 6,9 m contacto de la arenisca meteorizada que pasa a arenisca gris con inclusiones de conglomerados y algún canto disperso. De 6,9 a 7 m zona fracturada. De 7 a 9,4 m arenisca gris roca sana.
9,4	10,4	Cuña de limolita roja con 45° de buzamiento en el contacto con la arenisca. Presenta bioturbaciones rellenas de arenisca.
10,4	27,4	De 10,4 a 11,7 m arenisca muy fracturada. De 11,7 a 27,4 m arenisca gris roca sana.
27,4	39,1	Arenisca con bioturbación rellena de limolita roja.

Siguiendo el patrón de los anteriores sondeos, se comenzó con un tramo de relleno y limolita alterada a continuación, cortando la capa M en torno a los 4 m. Entre los 9,4 y los 10,4 m se observó una cuña de limolita, para después continuar de nuevo con la arenisca de la capa M. La pérdida de agua se produjo entre 1,9 y 2,4 m de profundidad.

Figura 21. Cuña de limolita de 9,4 a 10,4 m entre arenisca de la capa M



Las fracturas se dividen en familias de <math><20^\circ</math>, $30-45^\circ$ y 80°, siendo la mayoría de ellas de menos de 1-2 mm de espesor. Se han detectado varias fracturas afectadas por fase libre, a destacar una de 2 mm a 13,9 m y otra de 1 mm a 22 m de profundidad.

Figura 22. Fracturas con DNAPL a 13,9 m



Sondeo P231

La perforación comenzó el día 26 de marzo y finalizó el día 3 de abril al alcanzar los 35 m de profundidad. El nivel freático se detectó a los 10,51 m.

Tabla 16. Descripción litológica del sondeo P231

De (m)	A (m)	Litología
0	0,2	Zahorra y gravas.
0,2	0,3	Lajas de arenisca.
0,3	7,9	De 0,3 a 1,4 m tramo muy fracturado con intercalaciones de arenisca y limolita, con unos 10 cm superiores de suelo vegetal. De 1,4 a 7,9 m laminaciones de limolita roja y arenisca gris muy meteorizada. A partir de 5,6 m tramo muy fracturado.
7,9	8,0	10 cm de limolita ocre/rojiza.
8,0	15,2	De 8 a 15,2 m arenisca gris masiva, roca sana de grano grueso.

De (m)	A (m)	Litología
15,2	30,3	De 15,2 a 18,3 m arenisca gris con diseminaciones de limolita roja. En 16 m contacto limolita roja y arenisca gris subvertical e irregular. De 18,3 a 20,9 m tramo heterogéneo de arenisca y limolita, hasta 19,8 m predomina fracción limolita y de 19,8 a 20,9 m predomina fracción arenisca. De 20,9 a 30,3 m limolita roja con interdigitaciones de arenisca y bioturbación.
30,3	35,0	Limolita roja masiva con bioturbación.

En este sondeo, tras atravesar un pequeño tramo de relleno se cortó un tramo muy fracturado de limolita roja con intercalaciones de arenisca, y a los 8 m se atravesó la arenisca gris sana de la capa M. A los 15,2 m se da con una zona heterogénea de arenisca y limolita para terminar el sondeo con limolita roja masiva.

En este sondeo se cortaron numerosas fracturas, divididas en familias de $<20^\circ$, $30-45^\circ$ y 80° , mayormente de menos de 1 mm de espesor, a excepción de algunas con relleno arenoso (3, 10 y 15 mm principalmente). Destacan dos fracturas en las que se detectó presencia de DNAPL a 15,6 m (3 mm) y 15,65 m (2 mm) de profundidad. La pérdida total de agua se produjo a los 2 m.

Figura 23. Testigo de 13,7 a 15,9 m. Redondeado en rojo las fracturas con DNAPL



Sondeo P232

La perforación comenzó el día 4 de abril y finalizó el día 5 al alcanzar los 25,4 m de profundidad. El nivel freático se detectó a los 4,80 m.

Tabla 17. Descripción litológica del sondeo P232

De (m)	A (m)	Litología
0	0,4	Relleno. De 0 a 0,2 m zahorra y gravas. De 0,2 a 0,4 m suelo vegetal.
0,4	2,7	De 0,4 a 1,5 m fragmentos de limolita roja muy meteorizada con algún canto de grava disperso. De 1,5 a 2,75 m limolita roja con bioturbación rellena de arenisca, muy meteorizada y fracturada.
2,7	3,1	Zona de contacto entre limolita roja y arenisca. Contacto interdigitado de 85° .
3,1	5,8	De 3,1 a 5,8 m limolita sana menos fracturada con bioturbación.
5,8	22,5	De 5,8 a 9,9 m arenisca con inclusiones puntuales de limolita. Arenisca de grano grueso. Contacto entre litologías 60° . De 9,9 a 10,6 m algún canto disperso dentro de la arenisca. De 10,6 a 12 m arenisca gris. De 12,0 a 12,4 m arenisca con cantos dispersos. Desde los 12,45 m arenisca gris.
22,5	22,9	Zona de contacto entre limolita y arenisca 80° .
22,9	25,4	Limolita roja con bioturbación y alguna inclusión puntual de arenisca.

El contacto con la arenisca de la capa M se produjo a partir de los 5,8 m. De los 22,5 m al final del sondeo predominó la limolita roja. En el tramo de arenisca se observaron diversas fracturas, algunas de ellas con presencia de DNAPL. La pérdida total de agua de la perforación se produjo a los 1,45 m de profundidad.

Figura 24. Testigo de 13,6 a 15,8 m. Redondeado en rojo fracturas con restos de DNAPL



Sondeo P233

La perforación comenzó el día 5 de abril y finalizó el día 9 al alcanzar los 20,2 m de profundidad. El nivel freático se detectó a los 2,62 m.

Tabla 18. Descripción litológica del sondeo P233

De (m)	A (m)	Litología
0	0,4	Relleno. De 0 a 0,2 m zahorra y gravas. De 0,2 a 0,4 m suelo vegetal.
0,4	10,3	Limolita. De 0,4 a 1,4 m fragmentos de limolita muy meteorizada. De 1,4 a 10,3 m limolita sana con bioturbación rellena de arenisca.
10,3	10,6	Contacto 80º limolita-arenisca.
10,6	11,6	Arenisca gris.
11,6	12,2	Contacto interdigitado e irregular entre arenisca y limolita roja.
12,2	20,2	Limolita roja con abundante bioturbación rellena de arenisca. En 14,1 m fractura cementada.

La litología predominante de este sondeo ha sido limolita, con un pequeño tramo de arenisca entre los 10,6 y los 11,6 m. Se observaron algunas fracturas a lo largo del sondeo, pero no se detectó afección.

Sondeo P234

La perforación comenzó el día 9 de abril y finalizó el 10 del mismo mes, al alcanzar los 17,5 m de profundidad. El nivel freático se detectó a los 3,22 m.

Tabla 19. Descripción litológica del sondeo P234

De (m)	A (m)	Litología
0	0,8	Relleno. De 0 a 0,2 m zahorra y gravas. De 0,2 a 0,8 m suelo vegetal con restos de raíces.
0,8	15,7	Limolita. De 0,8 a 2 m limolita roja muy alterada y meteorizada, zona muy fracturada. De 2 a 15,7 m limolita roja con bioturbación rellena de arenisca. A los 7,05 m fractura producida por el corte de una vena de cemento. En 14,5 m fractura producida por inyección de cemento.

Solo se ha detectado limolita en el sondeo, con pocas fracturas de menos de 1 mm de espesor. No se han visto evidencias de DNAPL.

Sondeo P235

La perforación comenzó el día 10 de abril y finalizó el día 11 al alcanzar los 19,9 m de profundidad. No se cortó el nivel freático en la perforación de este sondeo.

Tabla 20. Descripción litológica del sondeo P235

De (m)	A (m)	Litología
0	1,2	Relleno. De 0 a 0,2 m zahorra y gravas. De 0,2 a 1,2 m suelo vegetal arcilloso con restos de raíces.
1,2	17,4	Limolita. De 1,2 a 1,6 m limolita roja muy meteorizada y fracturada. De 1,6 a 9,5 m limolita roja con bioturbación. De 9,5 a 13,9 m limolita roja más arenosa. De 13,9 a 17,4 m limolita roja con bioturbación rellena de arenisca.
17,4	18,4	Arenisca gris.
18,4	19,9	Limolita roja con bioturbación.

La litología predominante de este sondeo ha sido limolita, con un pequeño tramo de arenisca entre los 17,4 y los 18,4 m. No se han detectado signos de afección.

Sondeo P236

La perforación comenzó el día 11 de abril y finalizó el día 15 al alcanzar los 20 m de profundidad. No se cortó el nivel freático en la perforación de este sondeo.

Tabla 21. Descripción litológica del sondeo P236

De (m)	A (m)	Litología
0	1,1	Relleno. De 0 a 0,3 m zahorra y gravas. De 0,3 a 1,1 m suelo vegetal con restos de raíces.
1,1	9,8	Limolita. De 1,1 a 1,6 m limolita muy meteorizada y fracturada. De 1,6 a 9,8 m limolita roja con bioturbación.
9,8	11,8	Contacto de arenisca de grano grueso con limolita roja 85° de buzamiento. Cantos de 5 cm dispersos.
11,8	14,1	Limolita roja.
14,1	15,6	Contacto interdigitado entre arenisca de grano grueso y limolita roja.
15,6	18,5	Limolita roja.
18,5	19,8	Contacto interdigitado arenisca grano grueso y limolita roja.
19,8	20,0	Limolita roja.

Este sondeo ha presentado varios tramos de alternancia entre limolita y arenisca, aunque no se han detectado evidencias de afección.

Sondeo P237

La perforación comenzó el día 15 de abril y finalizó el día 17 al alcanzar los 20,1 m de profundidad. No se cortó el nivel freático en la perforación de este sondeo.

Tabla 22. Descripción litológica del sondeo P237

De (m)	A (m)	Litología
0	0,6	Relleno. De 0 a 0,2 m zahorra, gravas. De 0,2 a 0,5 m suelo vegetal. De 0,5 a 0,6 hormigón, solera.
0,6	20,1	Limolita roja. De 0,6 a 1,0 m muy meteorizada.

Se ha cortado únicamente limolita en este sondeo. Ninguna de las fracturas presentaba presencia o signos de afección por DNAPL.

Sondeo P238

La perforación comenzó el día 17 de abril y finalizó el día 18 al alcanzar los 22,3 m de profundidad. No se cortó el nivel freático en la perforación de este sondeo.

Tabla 23. Descripción litológica del sondeo P238

De (m)	A (m)	Litología
0	0,5	De 0 a 0,2 m zahorra y gravas. De 0,2 a 0,5 m suelo vegetal.
0,5	16,4	Limolita. De 0,5 a 1,4 m muy meteorizada. De 1,4 a 8,6 m muy fracturada. De 8,6 a 9,3 m con algún canto de 2 cm disperso.

De (m)	A (m)	Litología
16,4	17,5	Contacto limolita roja con arenisca gris de grano grueso con 85° de buzamiento.
17,5	19,2	Arenisca gris de grano grueso con algún canto de 8 cm disperso.
19,2	19,9	Contacto muy irregular entre arenisca gris y limolita roja.
19,9	22,4	Limolita roja con intrusiones y bioturbación de arenisca de grano muy grueso.

Se han observado varios tramos de arenisca en este sondeo. No se ha detectado presencia de fase libre o signos de afección en ninguna de las fracturas.

Sondeo P239

La perforación comenzó el día 24 de abril y finalizó el día 25 al alcanzar los 23,5 m de profundidad. No se cortó el nivel freático en la perforación de este sondeo.

Tabla 24. Descripción litológica del sondeo P239

De (m)	A (m)	Litología
0	1,9	De 0 a 0,2 m zahorra, grava suelta. De 0,2 a 1,9 m suelo vegetal-arenoso-arcilloso.
1,9	25,3	De 1,9 a 3,1 m limolita roja muy meteorizada con alguna pequeña inclusión de arenisca gris grano 2 cm y bioturbación. De 3,1 a 19,1 m limolita roja masiva con alguna inclusión de arenisca gris grano 4 cm y bioturbación. De 19,1 a 22,2 m limolita roja con muchas inclusiones de arenisca gris de grano grande (8 cm) y bioturbación. De 22,2 a 25,3 m limolita roja con alguna inclusión de arenisca gris de grano más fino (4 cm) y bioturbación.

No se han presenciado evidencias de DNAPL.

Sondeo P240

La perforación comenzó el día 29 de abril y finalizó el día 2 de mayo al alcanzar los 36,1 m de profundidad. El nivel freático apareció a los 14,6 m.

Tabla 25. Descripción litológica del sondeo P240

De (m)	A (m)	Litología
0	1,9	De 0 a 0,2 m cubierta vegetal. De 0,2 a 1,9 m material disgregado.
1,9	3,1	De 1,9 a 2,0 m limolita más sólida disgregada. De 2,0 a 3,1 m limolita roja con alguna inclusión de arenisca gris de grano 2 cm con bioturbación.
3,1	4,5	Contacto entre limolita roja y arenisca gris de grano grueso (predomina limolita en el testigo).
4,5	14,0	De 4,5 a 4,9 m limolita roja masiva con algunas inclusiones de arenisca gris y bioturbación. De 4,9 a 7,0 m mayor presencia de inclusiones de arenisca de grano más grueso. De 7,0 a 14,0 menos inclusiones de arenisca. De 6,9 a 7,15 m y de 8,45 a 8,6 m zonas muy fracturadas.
14,0	14,3	Contacto entre limolita roja y arenisca gris de grano grueso buzamiento 45°.
14,3	17,2	De 14,3 a 15,4 m arenisca gris de grano grueso. A partir de 15,4 a 17,2 m arenisca gris de grano más fino, más uniforme.
17,2	36,1	Alternancia de láminas de limolita roja y arenisca gris. De 17,2 a 23,6 m predomina arenisca. De 23,6 a 28,25 m predomina limolita roja. De 28,25 a 36,1 m predomina arenisca.

Este sondeo ha presentado varios tramos de contacto entre limolita y arenisca, con predominancia de la arenisca de la capa M entre los 17,2 y los 23,6 m y los 28,2 y los 36,1 m. Presenta múltiples fracturas en familias de 20, 45, 70 y 90° y de variable grosor, 1, 2, 4 y 8 mm de espesor. En este sondeo ha aparecido fase libre en varias fracturas en el tramo saturado.

Figura 25. Fractura a 32,45 m con presencia de fase libre



5.1.3 Identificación de las vías de movilización del DNAPL

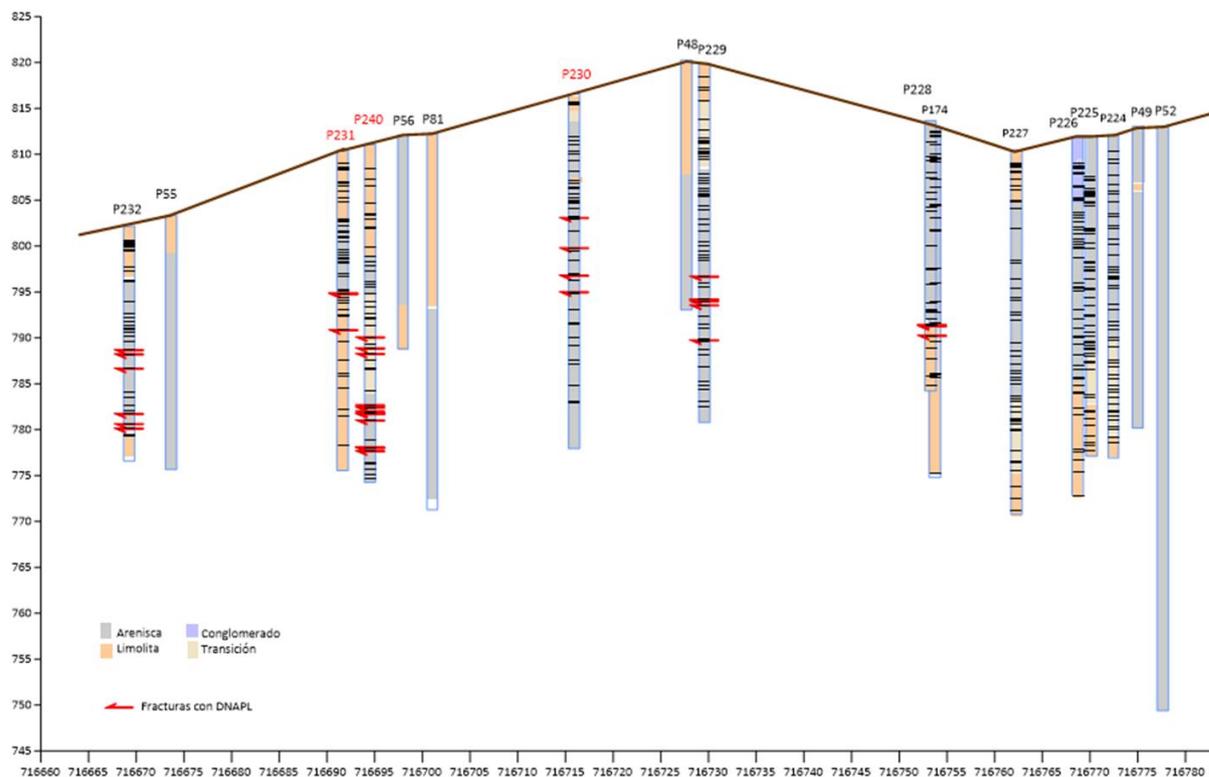
Evidencias de DNAPL en los nuevos sondeos

Durante la campaña de perforación de 2024 en la capa M, se ha detectado presencia de fase libre no acuosa en todos los sondeos. De los 6 sondeos, los que más fracturas impactadas han presentado han sido el P240, ubicado unos metros aguas abajo de P81, y P232, aguas abajo de P55. Por otro lado, también se observaron varias fracturas impactadas en P229 (junto a P48), y P230 (entre P48 y P81); y en menor medida, en P231 (aguas abajo de P56) y en P174.

El sondeo P240 fue el que acumuló un mayor espesor de DNAPL tras la perforación, seguido de P231, P230 y P232. También P240 está siendo el sondeo más productivo ha sido P240, ya que ha seguido acumulando DNAPL a lo largo del mes de mayo.

En la figura a continuación se muestra un perfil litológico a lo largo de la capa M de los nuevos sondeos con la representación de las fracturas, y se señalan en rojo aquellas en las que ha aparecido DNAPL en fase libre.

Figura 26. Perfil capa M con distribución litológica y de fracturación en profundidad



Debido a la ubicación de P240, y a la profundidad de las fracturas en las que ha aparecido el DNAPL, parece que se ha producido una movilización del DNAPL desde P81 en profundidad. En P81, se ha ido acumulando DNAPL desde que fue perforado en 2005, de modo el DNAPL que se ha ido incorporando al fondo del sondeo ha ido alimentando las fracturas situadas en el tramo más profundo del sondeo, lo que ha ocasionado esta afección a estas cotas más profundas de la capa M.

Esto mismo parece ser la causa de encontrar fracturas con DNAPL a más de 20 m en P232, donde se ha podido movilizar desde el fondo del sondeo P55.

En el caso de P230, la cota de las fracturas con DNAPL se sitúa ligeramente más elevada que en el resto de sondeos, lo que también podría indicar una vía de movilización desde cotas más altas, como procedente del sondeo P48, donde históricamente se detectaron espesores de DNAPL.

Muestreo de roca

Para afinar la ubicación de las vías preferentes de circulación de la fase libre, se tomaron muestras de las fracturas de los sondeos de la capa M con signos de afección, extrayendo lascas del techo y base de las mismas. Las fracturas visiblemente afectadas por DNAPL en fase libre no fueron muestreadas.

Las muestras de roca se analizaron en el laboratorio Pirenarium. En la siguiente tabla se resumen los resultados obtenidos del sumatorio de los compuestos (COCs) identificados, con el empleo de una escala de color para definir los tramos más afectados (de naranja a rojo).

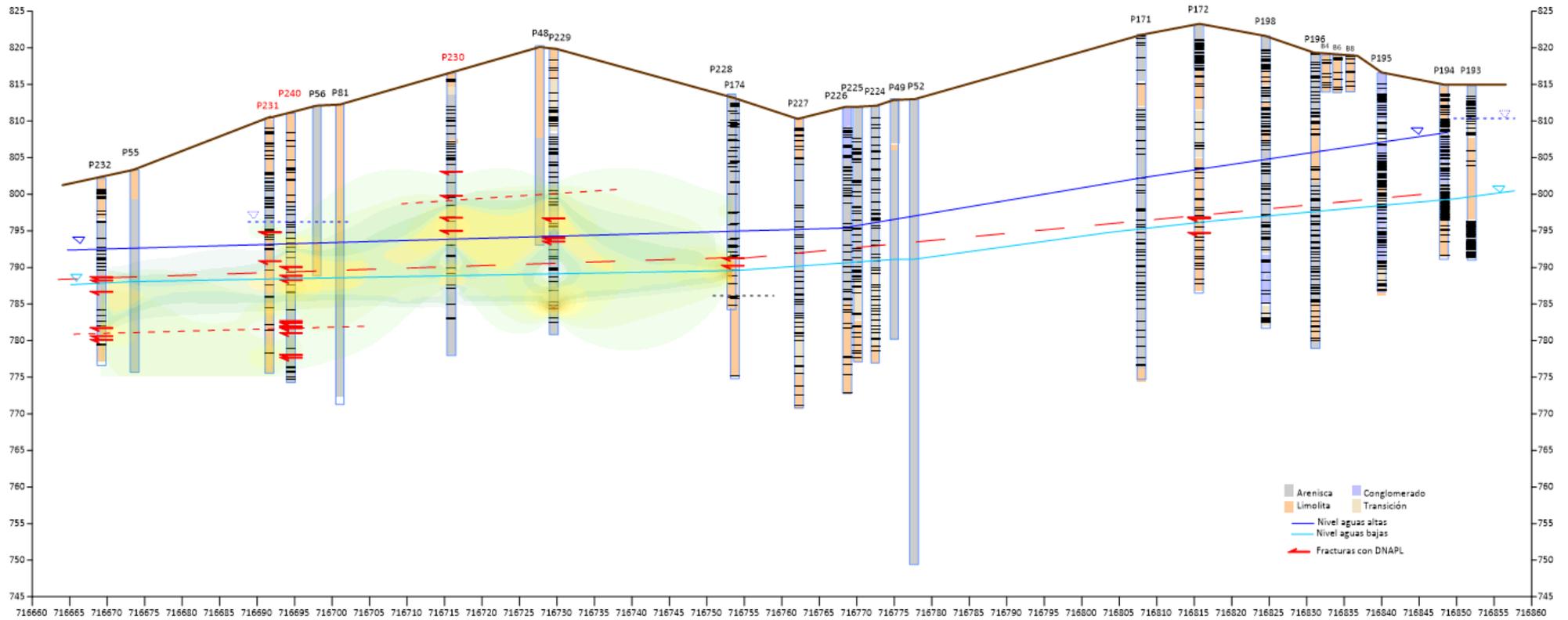
Tabla 26. Suma de COCs (mg/kg) y de techo y base de lasca, por fractura muestreada en los nuevos sondeos de la capa M

P240		P232		P231		P230		P229		P228	
Lasca (m)	Suma [COC]										
16,50	1	9,40	19	10,00	1	12,90	40	17,75	0	13,10	26
17,05	1.684	10,80	7	11,10	0	15,40	222	18,50	7	15,60	536
18,30	23	12,45	45	12,20	0	17,50	47	20,10	534	17,30	10
19,15	372	17,95	439	13,70	1	18,55	500	21,10	203	19,40	3
21,20	62	18,65	152	14,60	105	20,70	581	24,60	1.005	20,10	0
22,90	925	19,45	33	15,35	649	22,70	920	25,90	6	21,75	795
23,75	748	20,40	1.033	16,30	82	23,90	269	26,55	568	22,95	1.226
23,90	719	22,60	202	18,00	0	25,50	19	27,70	358	24,30	1.742
26,20	127			19,60	135	27,00	619	28,60	281	25,40	43
31,60	376			20,90	37	29,45	76	30,15	60	26,80	5.284
34,00	115			22,90	4	32,10	7	31,40	46	27,30	50
35,40	17			24,55	13	33,90	2	33,30	773		
				25,90	557			34,90	666		
				28,25	4			35,70	1.499		
				29,00	1			37,00	26		
				32,10	631						

Los resultados obtenidos se han contrastado con las observaciones organolépticas y se han representado en un perfil de capa M, donde se ha incluido la información disponible desde los sondeos localizados en el barranco oeste del vaso.

Tal y como se puede observar en la figura expuesta a continuación, se puede determinar aproximadamente la zona de circulación preferente del DNAPL a lo largo de la capa M, con algunas zonas secundarias de movilización, como en P230, P240 o P232, como se comentó anteriormente.

Figura 27. Perfil capa M con distribución litológica y de fracturación en profundidad. Vías de circulación preferente del DNAPL



5.1.4 Muestreo post perforación

Una vez estabilizado el nivel freático en los nuevos sondeos, el día 30 de mayo se procedió a realizar un muestreo del agua subterránea en los sondeos de la capa M, con el objetivo de evaluar el grado de contaminación presente, que a su vez es una evidencia del grado de conexión con la capa M. En las siguientes tablas se presentan los valores de los parámetros fisicoquímicos medidos en el muestreo y los resultados analíticos obtenidos.

Tabla 27. Parámetros fisicoquímicos (30 mayo 2024)

Sondeo	Profundidad muestreo (m)	pH	Conductividad (µS/cm)	Potencial redox (mV)
P228	25	7,60	1.741	-35
P229	35	7,08	1.261	-97
P230	32	7,26	1.348	-98
P231	26	7,33	1.250	-14
P232	19	7,11	1.442	-77
P240	30	7,28	1.383	-48

Tabla 28. Concentraciones de benceno, clorobenceno y HCH total (30 mayo 2024)

Sondeo	Profundidad muestreo (m)	Benceno (µg/l)	Monoclorobenceno (µg/l)	HCH total (µg/l)
P228	25	13.590	41.829	19.739
P229	35	7.347	33.117	7.734
P230	32	8.753	43.980	8.006
P231	26	13.877	86.174	12.975
P232	19	13.312	74.977	11.870
P240	30	10.594	58.569	11.407

Tal y como se observa, tanto los parámetros fisicoquímicos como las concentraciones de los principales contaminantes están en concordancia con los datos observados en sondeos ubicados en la capa M en esta zona.

Los sondeos situados en la plataforma de la Zona 0 entre las capas K e I fueron muestreados el 23 de septiembre con el objetivo de evaluar la posible intercepción de la capa K.

Tabla 29. Parámetros fisicoquímicos (23 septiembre 2024)

Sondeo	Profundidad muestreo (m)	pH	Conductividad (µS/cm)	Potencial redox (mV)
P233	15	7,96	1.086	-157
P234	10	7,12	1.486	-182
P235	15	7,12	1.158	-127
P236	15	7,62	973	-194
P237	15	8,00	844	-172
P238	15	7,10	1.745	-140
P239	20	7,59	905	-109

Tabla 30. Concentraciones de benceno, clorobenceno y HCH total (23 septiembre 2024)

Sondeo	Profundidad muestreo (m)	Benceno (µg/l)	Monoclorobenceno (µg/l)	HCH total (µg/l)
P233	15	286	1.545	158
P234	10	1.600	9.097	82
P235	15	1.028	9.384	219
P236	15	459	5.763	380

Sondeo	Profundidad muestreo (m)	Benceno (µg/l)	Monoclorobenceno (µg/l)	HCH total (µg/l)
P237	15	596	7.866	3.309
P238	15	6.956	54.605	8.220
P239	20	3.747	31.781	2.373

De los resultados obtenidos, el sondeo que presentó las concentraciones más elevadas fue P238, con valores similares a los de sondeos ubicados en capas principales en esta zona de foco. Este sondeo presentó un tramo de arenisca entre los 16,4 y los 19,9 m de profundidad, por lo que se podría haber interceptado la capa K a esa profundidad.

Por otro lado, los sondeos P237 y P239 presentaron concentraciones intermedias, pero debido a que no cortaron arenisca durante la perforación, o esta se atravesó someramente, es probable que la afección esté influenciada por un flujo transversal entre capas.

5.2 Sondeos capa M Zona Barranco 3

Entre el día 24 de octubre y 20 de noviembre se llevó a cabo la segunda campaña de perforación de 2024, en el entorno del Barranco 3 (P241, P242, P243 y P244).

Estos sondeos se efectuaron con el objetivo de interceptar la red de fracturación principal en capa M en una zona del Barranco 3 que no ha sido investigada y se encuentra cerca del foco primario y de la zona entre el Barranco 3 y la Zona 0. Por otro lado, se pretende delimitar aguas abajo de P232 (último sondeo con presencia de fase aguas debajo de la Zona 0) la presencia de fase libre en la capa M. A su vez, estos sondeos se han incluido en la red de monitorización.

Para estos sondeos fue necesario, con anterioridad al inicio de los trabajos, la ejecución de accesos adecuados para asegurar el correcto emplazamiento de la maquinaria de perforación y así garantizar la ejecución y la seguridad de los trabajos. Asimismo, de manera previa al inicio de las perforaciones se realizaron tareas de conexión para el suministro de agua.

5.2.1 Ubicación y características de los sondeos

Los sondeos se han perforado en el entorno del Barranco 3 entre los sondeos P232 y P26 (P241, P242 y P243) y a la entrada de la plataforma junto a P57 y P79 (P244), tal y como se muestra en la siguiente figura.

Figura 28. Localización de los nuevos sondeos en el entorno del Barranco 3



Todos los sondeos se han perforado con batería doble de 116 mm de diámetro, con corona de diamante y recuperación de testigo continuo, y posteriormente se han reperforado a 146 mm para una correcta instalación con tubería piezométrica de 4". Los sondeos ubicados aguas arriba del fondo del barranco 3 alcanzaron una profundidad cercana a los 18 m mientras que el sondeo perforado aguas abajo alcanzó los 30 m.

Tabla 31. Características de los sondeos realizados en la campaña de noviembre

Sondeo	Profundidad (m)	Tramo ranurado (m)	Capa	Zona
P241	18,8	De 2,0 a 18,3	M	Zona 0 a Barranco 3
P242	18,2	De 2,0 a 18,0	M	Zona 0 a Barranco 3
P243	19,0	De 2,0 a 19,0	M	Barranco 3
P244	30,4	De 2,0 a 30,0	M	Barranco 3

5.2.2 Testificación de sondeos

Los trabajos de perforación comenzaron el día 24 de octubre con la perforación del sondeo P241 y finalizaron el 20 de noviembre con la perforación del sondeo P244. A continuación, se describe la litología atravesada en cada uno de los sondeos.

Sondeo P241

La perforación comenzó el día 24 de octubre y finalizó el 29 del mismo mes cuando se alcanzó una profundidad de 18,8 m. En la siguiente tabla se detalla la litología atravesada en este sondeo.

Tabla 32. Descripción litológica del sondeo P241

De (m)	A (m)	Litología
0	0,8	Relleno limo arenoso y 20 cm de hormigón de la solera.
0,8	9,6	Limolita roja bioturbada rellena de arenisca de grano grueso y algún canto de arenisca disperso. Fracturas con fase a partir de 6,9 m de profundidad.
9,6	10,3	Contacto de 85° de buzamiento entre la limolita roja y arenisca gris de grano grueso. Fracturas con fase.
10,3	14,4	Arenisca gris de grano grueso con fracturas impregnadas de fase.
14,4	14,8	Inclusión de limolita roja en la arenisca gris.
14,8	18,8	Arenisca gris de grano grueso con fracturas impregnadas de fase.

A la profundidad de 5 m, dentro del primer tramo de limolita, se produjo la pérdida total del agua de perforación, manteniéndose hasta el final del sondeo. A partir de los 9,6 m se interceptó la arenisca de la capa M. El nivel freático apareció a los 5,10 m.

En este sondeo se han contabilizado hasta 10 fracturas con gotículas de fase. La mayoría de ellas se concentran entre los 6,9 m y los 10,8 m. El resto de las fracturas desde los 11 m presentaron fuerte olor, pero no se apreció presencia de DNAPL visualmente.

Se instaló un tramo ranurado desde los 2 m hasta 18 m y los dos metros más superficiales se dejaron con tubería ciega.

Figura 29. Fractura a 8,3 m con gotas de fase



Figura 30. Testigos de 7,1 a 8,8 m. Se señalan las fracturas con presencia de fase



Sondeo P242

La perforación comenzó el día 11 de noviembre y finalizó el día 13 del mismo mes a la profundidad de 18,2 m. El nivel freático se cortó a los 3,5 m. En la siguiente tabla se detalla la litología atravesada en este sondeo.

Tabla 33. Descripción litológica del sondeo P242

De (m)	A (m)	Litología
0	0,35	Relleno de suelo vegetal arcilloso con 15 cm de zahorra.
0,35	15,30	Limolita roja muy meteorizada hasta 1,3 m y hasta 15,3 m bioturbada con relleno de arenisca.
15,30	15,45	Inclusión de arenisca gris de grano grueso en la limolita.
15,45	16,30	Limolita roja con bioturbación rellena por arenisca gris de grano grueso.
16,30	17,20	Zona de contacto interdigitado entre la limolita roja y la arenisca gris.
17,20	18,20	Limolita roja con bioturbación rellena por arenisca gris de grano grueso.

En este sondeo no se logró interceptar la capa de arenisca como se puede ver en el registro litológico. Tampoco se detectaron fracturas con fase ni con signos aparentes de afección. La mayoría de las fracturas tienen un ángulo de inclinación de entre 40-45° y espesores de entre 1 y 2 mm, todas ellas en limolita. La pérdida total del agua se dio a los 3,5 m y el nivel freático apareció a los 5,4 m. Se instaló tubería piezométrica ranurada entre los 2 y los 18 m.

Figura 31. Inclusión de arenisca de grano muy grueso con cantos calcícticos dispersos a 16,5 m de profundidad



Sondeo P243

La perforación comenzó el día 13 de noviembre y finalizó el 14 del mismo mes cuando se alcanzó la profundidad de 19 m. En siguiente tabla se detalla la litología atravesada en este sondeo.

Tabla 34. Descripción litológica del sondeo P243

De (m)	A (m)	Litología
0	0,5	Relleno arenoso con una primera capa de 10 cm de asfalto y 30 cm de bloques de arenisca.
0,5	9,5	Arenisca gris de grano grueso con bioturbación rellena de limolita roja hasta los 8,5 m y presencia de laminaciones de limolita roja y ocre de 3 mm hasta los 9,5 m.
9,5	11,5	Tramo de transición con predominio de la fracción limolítica y arenisca de menor tamaño de grano.
11,5	19,0	Arenisca bioturbada de grano fino de color gris-ocre.

La capa M se interceptó desde el comienzo de la perforación tras el relleno hasta el final del sondeo, a excepción de un tramo entre los 9,5 y los 11,5 m, una zona de transición entre limolita y una arenisca de menor tamaño de grano. La mayoría de las fracturas no presentaron afección, a excepción de una a 9,75 m con relleno arenoso que presentaba un ligero olor.

El nivel freático se cortó a los 3,5 m y la pérdida total del agua se produjo a los 2 m de profundidad. Se instaló tramo ranurado entre los 2 y los 19 m de profundidad.

Figura 32. Fractura a 9,75 m con relleno de arena y materia orgánica con ligero olor



Sondeo P244

La perforación comenzó el día 18 de noviembre y finalizó el día 20 del mismo mes al alcanzar los 30,4 m de profundidad. En la siguiente tabla se detalla la litología atravesada en este sondeo.

Tabla 35. Descripción litológica del sondeo P244

De (m)	A (m)	Litología
0	1,2	Relleno de gravas, arenas y suelo vegetal. Los primeros 20 cm zahorra.
1,2	13,3	Limolita roja con bioturbación rellena de arenisca. Los primeros metros muy meteorizados.
13,3	13,7	Contacto de 80° de buzamiento entre limolita y arenisca gris de grano grueso.
13,7	19,3	Arenisca gris de grano grueso con algún canto calcítico disperso. A partir de 17,5 m arenisca gris bioturbada.
19,3	20,1	Zona de transición con contacto irregular entre limolita roja y arenisca gris de grano grueso.
20,1	22,6	Limolita roja bioturbada rellena de arenisca.
22,6	24,6	Zona de transición con contacto interdigitado de arenisca en limolita roja bioturbada.
24,6	26,3	Limolita roja con bioturbación rellena de arenisca.
26,3	30,4	Zona de transición entre limolita roja y arenisca gris.

En este sondeo solo se cortó un tramo de arenisca de los 13,7 a los 19,3 m. No se detectó afección en ninguna fractura.

Las fracturas testificadas en su mayoría fueron horizontales o subhorizontales y con escasa apertura, de 1 a 2 mm. Hay que señalar que, en dos tramos, uno de 25,2 a 26,8 m y el otro de 29,4 a 29,7 m, todas las fracturas presentaban relleno de materia orgánica.

No se detectó pérdida de agua significativa en esta perforación, encontrándose el nivel freático a los 7,49 m. Este sondeo se dejó instalado con tubería piezométrica ranurada de los 2 a los 30 m.

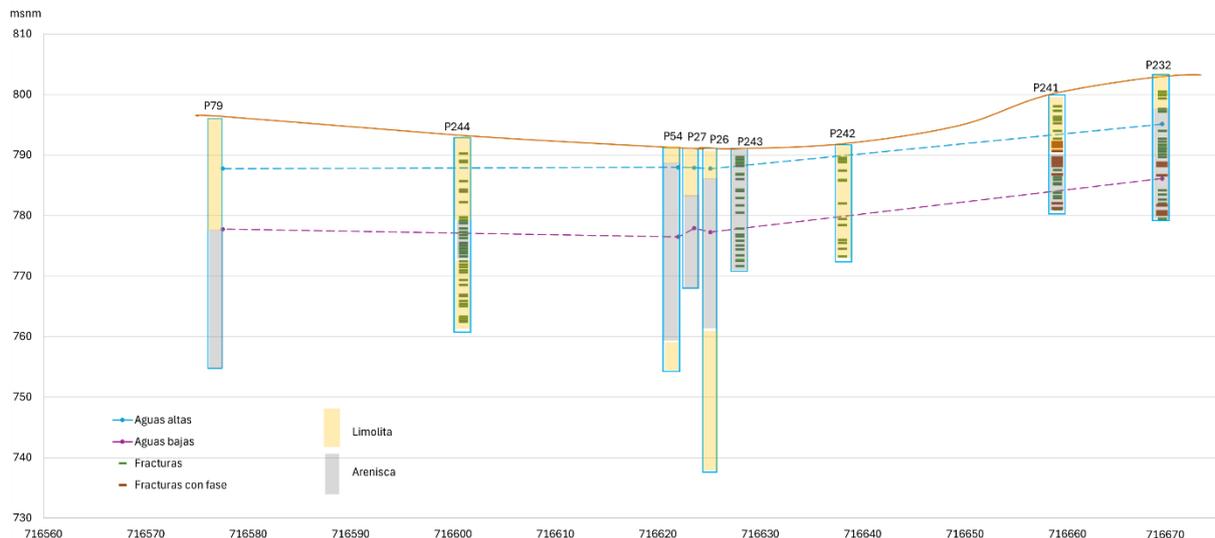
Figura 33. Testigo de 13,8 a 16 m, en su totalidad arenisca, con cantos dispersos de tipo calcítico



Perfil litológico

A través de las litologías descritas se ha representado el perfil litológico de los nuevos sondeos en el entorno del Barranco 3. En función de la aparición de DNAPL, se puede inferir que el límite de la extensión de la afección por DNAPL se sitúa entre los sondeos P241 y P243; potencialmente aguas arriba de P242, aunque al no haber cortado la capa M en esa ubicación no es posible determinarlo con exactitud.

Figura 34. Perfil de los nuevos sondeos en la capa M con distribución litológica y de fracturación en profundidad



5.2.3 Seguimiento hidrogeológico de los nuevos sondeos

Una vez estabilizado el nivel freático en los sondeos, y coincidiendo con la primera campaña trimestral de muestreo de 2025, el día 15 de enero se procedió a realizar un muestreo de control de estos 4 piezómetros (P241, P242, P243 y P244) con el objetivo de evaluar el grado de contaminación presente, que a su vez es una evidencia del grado de conexión con la capa M. En las siguientes tablas se presentan los valores de los parámetros fisicoquímicos medidos en el muestreo y los resultados analíticos obtenidos.

Tabla 36. Parámetros fisicoquímicos (15 enero 2025)

Sondeo	Profundidad muestreo (m)	pH	Conductividad (µS/cm)	Potencial redox (mV)
P241	17,0	6,54	1.062	-55
P242	16,0	7,01	694	21
P243	15,0	6,50	1.062	-64
P244	19,0	6,40	1.696	-64

Tabla 37. Concentraciones de benceno, clorobenceno y HCH total (15 enero 2025)

Sondeo	Profundidad muestreo (m)	Benceno (µg/l)	Monoclorobenceno (µg/l)	HCH total (µg/l)
P241	17,0	10.327	53.439	17.456
P242	16,0	225	1.548	362
P243	15,0	7.316	35.792	18.192
P244	19,0	7.082	37.197	10.559

Tal y como se observa, tanto los parámetros fisicoquímicos como las concentraciones de los principales contaminantes en los sondeos P241, P243 y P244 están en concordancia con los datos históricos observados en sondeos de la zona ubicados en la capa M, demostrando una buena conexión. Sin embargo, y tal y como se observó con el registro litológico, P242 se encuentra desconectado de capa M, al encontrarse perforado completamente en limolita, lo que se refleja en unas concentraciones inferiores a las de la zona preferente de movilización de flujo, la arenisca de la capa M.

5.3 Nivelación topográfica

Una vez finalizadas las campañas de perforación, se realizó una campaña de topografía para dar coordenadas a los nuevos puntos. Estos datos fueron tomados e incluidos en la BBDD del emplazamiento.

Tabla 38. Coordenadas UTM ETRS89 y profundidades de los nuevos sondeos

Sondeo	X	Y	Z (msnm)	Profundidad (m)
P228	716753,47	4707271,84	813,162	28,15
P229	716729,58	4707284,94	820,049	38,20
P230	716715,96	4707290,65	816,961	37,78
P231	716691,67	4707300,66	810,497	30,95
P232	716669,25	4707310,92	802,137	21,66
P233	716783,75	4707292,31	815,673	19,80
P234	716785,00	4707290,00	815,730	15,28
P235	716786,70	4707287,51	815,608	18,40
P236	716787,41	4707285,81	815,615	19,40
P237	716788,75	4707283,73	815,590	19,20
P238	716788,24	4707281,70	815,595	22,05
P239	716785,37	4707283,18	815,657	25,24
P240	716695,73	4707302,39	810,441	34,34
P241	716659,89	4707314,82	798,161	18,80
P242	716634,21	4707326,62	791,824	18,20
P243	716624,95	4707327,97	790,575	19,00
P244	716601,68	4707342,72	792,609	30,40

6. Ensayos hidráulicos

6.1 Ensayo de Bombeo en Zona 0

6.1.1 Parámetros de operación y monitorización del ensayo

Entre el día 6 y 13 de mayo se llevó a cabo un ensayo de bombeo en los sondeos P171 y P227 de la Zona 0 con el objetivo de obtener información hidrogeológica de estos puntos y determinar si la perforación de los nuevos sondeos había podido variar las condiciones hidrogeológicas de la capa M en esta zona y estimar su grado de conexión a la misma.

Con estos ensayos, se han obtenido parámetros hidráulicos tales como la transmisividad, conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento, para tener una mayor comprensión sobre el flujo de agua subterránea. De forma secundaria, la información obtenida va a permitir plantear actuaciones de remediación más rápidas y eficientes, y priorizar o tomar determinadas medidas de descontaminación en la capa M.

El ensayo fue realizado por la empresa NOTIO, que ya contaba con experiencia en este tipo de ensayos en el emplazamiento. El informe completo realizado por NOTIO referente a estos resultados se encuentra en el [Anexo F](#). En la siguiente tabla se indican los sondeos monitorizados durante el ensayo de bombeo y sus características principales.

Tabla 39. Características de los sondeos empleados en el ensayo de bombeo

Piezómetro	Tipo	X (UTM)	Y (UTM)	Z (UTM)	Emboquille	Profundidad (m)	Diámetro (mm)	Ranurado	Tubería
Bombeo en P-171:									
P-171	Bombeo	716807.95	4707253.39	822.13		47.20	116	15.00 a 47.00 m	PVC
P-172	Observación	716815.63	4707248.58	823.51		36.70	116	6.00 a 36.70 m	PVC
P-194	Observación	716848.42	4707235.85	815.17		23.70	116		Sin entubar
P-196	Observación	716831.19	4707242.23	819.44		40.40	116		Sin entubar
P-198	Observación	716824.57	4707245.89	821.86		40.00	116		Sin entubar
Bombeo en P-227:									
P-227	Bombeo	716762.25	4707269.29	810.64		40.10	116		Sin entubar
P-52	Observación	716777.65	4707264.58	813.11		63.80	128	32.00 a 66.00 m	PVC
P-129	Observación	716531.53	4707369.49	793.42		48.00	-	-	
P-174	Observación	716753.77	4707273.03	813.19		38.17	116	6.00 a 38.20 m	PVC
P-224	Observación	716772.49	4707265.54	812.29		40.20	116		Sin entubar
P-228	Observación	716753.41	4707271.84	813.17		39.00	116		Sin entubar
P-229	Observación	716729.52	4707284.93	820.09		39.40	116		Sin entubar
P-230	Observación	716715.87	4707290.54	816.98		39.10	116		Sin entubar
P-231	Observación	716691.69	4707300.71	810.45		35.00	116		Sin entubar
P-232	Observación	716669.21	4707310.83	802.11		25.40	116		Sin entubar
P-11s	Observación	716521.07	4707375.38	793.10		39.90	116		Sin entubar

Figura 35. Unidad móvil para la ejecución del ensayo hidráulico



En cada uno de los puntos de ensayo se extrajo agua subterránea a caudal constante, provocando la depresión del nivel durante el máximo tiempo posible, con el objetivo de intentar afectar a los piezómetros cercanos en capa M.

La extracción de agua se realizó con bomba sumergible, controlando el caudal con una electroválvula digital, y se tomaron medidas en continuo cada 30 segundos. Los niveles de agua se monitorizaron en continuo durante todo el ensayo con *diver*, tanto en los sondeos de actuación como en los de observación.

6.1.2 Resultados del ensayo de bombeo

Según los resultados obtenidos, el bombeo realizado en el piezómetro P171 puso de manifiesto una buena conexión con los puntos ubicados aguas arriba. Sin embargo, no se pudo determinar esta conexión con los puntos ubicados aguas abajo ya que para afectarlos habría sido necesario un descenso superior a 13,2 m (alcanzado un nivel piezométrico por debajo de la cota 795 msnm), mientras que el descenso mínimo generado durante el bombeo fue de 5,14 m, alcanzando la cota piezométrica mínima de 803,60 msnm. Sin embargo, estos puntos sí fueron afectados a partir del ensayo de bombeo efectuado en P227.

Los resultados se calcularon a través del método de Horner por Theis o Jacob mediante el código Ephebo. Estos muestran el mismo orden de magnitud de transmisividad para todos los puntos de observación independientemente del método, lo que implica que a pesar de que la capa M tiene heterogeneidades, se encuentran dentro del mismo orden de magnitud, 1E-06 m²/s.

Los valores de permeabilidad se encuentran entre 1E-07 y 1E-08 (m/s) y el coeficiente de almacenamiento varía entre 1E-04 y 1E-6. Los valores más elevados dentro de la capa M se registran en la zona comprendida entre P229 y P196 y disminuyen hacia el oeste.

Durante los ensayos, se han podido identificar límites correspondientes a zonas con menor permeabilidad en los sondeos P227, P52 y P231.

Figura 36. Resultados del ensayo de bombeo para los diferentes métodos de interpretación

Piezómetro	Litología (1)	Espesor saturado	Método de Horner (Horner, 1951)			
			T (2)		k (3)	
			(m ² /s)	(m ² /día)	(m/s)	(m/día)
Bombeo en P-171						
P-171	Capa M, Arenisca finas	33.27	2.12E-06	1.83E-01	6.37E-08	5.51E-03
P-172	Capa M, Arenisca finas	22.71	3.86E-06	3.34E-01	1.70E-07	1.47E-02
P-194	Capa M, Arenisca finas	19.75	3.50E-06	3.02E-01	1.77E-07	1.53E-02
P-196	Capa M, Arenisca finas	31.26	4.30E-06	3.72E-01	1.38E-07	1.19E-02
P-198	Capa M, Arenisca finas	27.93	3.82E-06	3.30E-01	1.37E-07	1.18E-02
Bombeo en P-227						
P-227	Capa M, Arenisca finas	23.61	3.86E-06	3.34E-01	1.63E-07	1.41E-02
P-52	Capa M, Arenisca finas	45.03	3.51E-06	3.03E-01	7.79E-08	6.73E-03
P-129	Capa M, Arenisca finas	24.58	-	-	-	-
P-174	Capa M, Arenisca finas	19.18	2.82E-06	2.44E-01	1.47E-07	1.27E-02
P-224	Capa M, Arenisca finas	22.54	3.26E-06	2.82E-01	1.45E-07	1.25E-02
P-228	Capa M, Arenisca finas	19.91	3.03E-06	2.62E-01	1.52E-07	1.31E-02
P-229	Capa M, Arenisca finas	13.16	3.18E-06	2.75E-01	2.42E-07	2.09E-02
P-230	Capa M, Arenisca finas	15.92	3.13E-06	2.70E-01	1.97E-07	1.70E-02
P-231	Capa M, Arenisca finas	20.28	2.49E-06	2.15E-01	1.23E-07	1.06E-02
P-232	Capa M, Arenisca finas	16.30	3.29E-06	2.84E-01	2.02E-07	1.74E-02
P-11s	Capa M, Arenisca finas	16.57	-	-	-	-

Piezómetro	Litología (1)	Espesor saturado	Método inverso (EPHEBO 1.1 / MARIAJ_IV)					Método de interpretación	
			T (2)		k (3)		S (4)		Sw (5)
			(m ² /s)	(m ² /día)	(m/s)	(m/día)			
Bombeo en P-171									
P-171	Capa M, Arenisca finas	33.27	1.19E-06	1.03E-01	3.58E-08	3.09E-03	1.04E+00	1.06E-02	Theis
P-172	Capa M, Arenisca finas	22.71	3.45E-06	2.98E-01	1.52E-07	1.31E-02	2.98E-04	-	Theis
P-194	Capa M, Arenisca finas	19.75	3.86E-06	3.34E-01	1.95E-07	1.69E-02	7.73E-05	-	Theis
P-196	Capa M, Arenisca finas	31.26	3.92E-06	3.39E-01	1.25E-07	1.08E-02	2.12E-04	-	Theis
P-198	Capa M, Arenisca finas	27.93	3.40E-06	2.94E-01	1.22E-07	1.05E-02	1.11E-04	-	Theis
Bombeo en P-227									
P-227	Capa M, Arenisca finas	23.61	8.27E-07	7.15E-02	3.50E-08	3.03E-03	1.80E+01	1.06E-02	Jacob-Copper
P-52	Capa M, Arenisca finas	45.03	2.10E-06	1.81E-01	4.66E-08	4.03E-03	6.52E-04	-	Theis
P-129	Capa M, Arenisca finas	24.58	-	-	-	-	-	-	-
P-174	Capa M, Arenisca finas	19.18	1.80E-06	1.56E-01	9.38E-08	8.11E-03	8.42E-04	-	Theis
P-224	Capa M, Arenisca finas	22.54	2.14E-06	1.85E-01	9.49E-08	8.20E-03	6.15E-04	-	Theis
P-228	Capa M, Arenisca finas	19.91	1.85E-06	1.60E-01	9.29E-08	8.03E-03	8.50E-04	-	Theis
P-229	Capa M, Arenisca finas	13.16	1.68E-06	1.45E-01	1.28E-07	1.10E-02	6.80E-05	-	Theis
P-230	Capa M, Arenisca finas	15.92	1.86E-06	1.61E-01	1.17E-07	1.01E-02	2.78E-05	-	Theis
P-231	Capa M, Arenisca finas	20.28	1.15E-06	9.94E-02	5.67E-08	4.90E-03	7.74E-06	-	Theis
P-232	Capa M, Arenisca finas	16.30	2.40E-06	2.07E-01	1.47E-07	1.27E-02	5.48E-06	-	Jacob-Copper
P-11s	Capa M, Arenisca finas	16.57	-	-	-	-	-	-	-

- Notas:
- 1: Areniscas finas a muy finas (Litología)
 - 2: Transmisividad hidráulica (T)
 - 3: Conductividad hidráulica (K)
 - 4: coeficiente de almacenamiento (S)
 - 5: Almacenamiento en el sondeo (Sw)

6.2 Ensayo de inyección de trazadores

6.2.1 Parámetros de operación y monitorización del ensayo

Del 1 al 12 de julio se llevó a cabo un ensayo de trazadores con la asistencia del grupo de investigación INPROQUIMA, del Departamento de Ingeniería Química y de los Materiales de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Complutense de Madrid (UCM). El alcance de estos trabajos se había presentado a la Dirección Facultativa en la **Propuesta para la realización de ensayos hidráulicos y trazadores en Zona 0**, en diciembre de 2023.

Este ensayo se realizó con el objetivo de determinar las condiciones hidrogeológicas existentes de acuerdo con la perforación de los nuevos sondeos en capa M, y evaluar potenciales cambios en las vías de circulación preferentes y otros parámetros hidrogeológicos. El informe completo se puede consultar en el [Anexo G](#).

Para el ensayo, se emplearon bromuro potásico (KBr) y sal común (NaCl) como trazadores conservativos, y fluoresceína como trazador no conservativo. Estos productos se mezclaron en un volumen de agua de 10 m³, de modo que la concentración inicial de cada uno de los trazadores fue de 10 g/l de NaCl, 0,558 g/l de KBr y 0,083 g/l de fluoresceína.

La mezcla de agua con trazador se preparó por tandas en los dos depósitos de 1.000 l con agitación. De estos depósitos, se fue trasvasando el volumen de mezcla a través de una bomba al tanque de 12.000 l. En este depósito, se fue recirculando la mezcla con otra bomba impulsando el agua desde la base del tanque hasta la tapa superior para mantenerla homogénea.

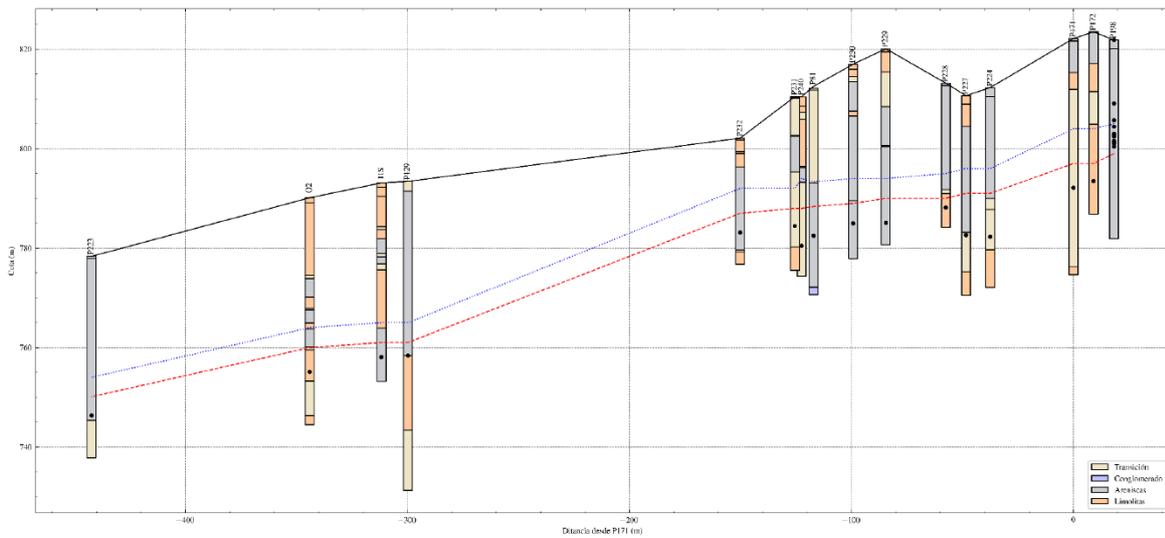
Con el tanque lleno, se procedió a inyectar la mezcla en el pozo P171 por gravedad, a una profundidad de 35 m (cota 787,13 m). Durante el proceso de inyección, se monitoreó el nivel en el pozo P171 con una sonda de nivel, y el caudal de alimentación se reguló mediante una válvula de paso para evitar que el fluido superara la cota de 809 m (un incremento de 7 m respecto a la cota inicial de 802 m). Este valor se estableció con el fin de prevenir la comunicación con capas paralelas a la capa M y asegurar que la disolución inyectada fluyera exclusivamente a través de dicha capa. La inyección se realizó a un caudal inicial de 40 l/min, y se fue bajando en torno a los 5-10 l/min de acuerdo con que el nivel en el sondeo de inyección no superara el límite establecido.

La monitorización del ensayo se realizó mediante la toma y análisis de muestras de agua, medición de conductividad en profundidad y mediciones de nivel a diferentes intervalos de tiempo. Para las medidas de nivel, se emplearon dispositivos de medición en continuo tipo *díver* y LORA, y sonda hidronivel para las mediciones manuales, y los parámetros fisicoquímicos se tomaron mediante sonda TLC.

Tabla 40. Resumen sondeos y parámetros monitorización ensayo

Sondeo	Zona	Capa	Distancia a P171 (m)	Profundidad (m)	Prof. muestreo (m)
P172	Vaso Bco. Oeste	M	-7	36,7	30
P198	Vaso Bco. Oeste	M	-17	39,0	12,8-21,5
P171	Zona 0	M	0	47,2	30
P224	Zona 0	M	35	35,0	30
P227	Zona 0	M	46	40,1	28
P228	Zona 0	M	54	29,0	25
P81	Zona 0 a Barranco 3	M	108	41,0	30
P229	Zona 0 a Barranco 3	M	78	39,4	35
P230	Zona 0 a Barranco 3	M	93	39,1	32
P231	Zona 0 a Barranco 3	M	117	31,0	26
P232	Zona 0 a Barranco 3	M	138	22,0	19
P240	Zona 0 a Barranco 3	M	113	36,1	30
I1S	Zona Barrera	M	309	39,9	35
O2	Zona Barrera	M	341	43,3	35
P129	Zona Barrera	M	298	48,0	35
P223	Barranco 4	M	480	40,0	32

Figura 37. Perfil sondeos zona de ensayo



6.2.2 Resultados y conclusiones del ensayo de trazadores

De forma general, no se observó adsorción de fluoresceína en el subsuelo, por lo que se comportó como un trazador conservativo. Esto puede explicarse por la baja superficie de contacto que suponen las fracturas en comparación con medios y litologías granulares, así como la escasa cantidad de materia (o relleno) adherida a las paredes de las mismas.

A partir de los datos tomados durante el ensayo de trazadores, fue posible determinar los piezómetros que mantienen una buena conexión hidráulica en la capa M, lo cual es una información muy útil a la hora de monitorizar el flujo en futuros ensayos o llevar a cabo acciones de remediación.

Este es el caso de los piezómetros P229, P230, P232, P129, O2 y P81, donde los perfiles de trazadores alcanzan el máximo de concentración. El tiempo para alcanzar este máximo aumentó a medida que los piezómetros se alejan del punto de inyección.

Los piezómetros P224, P227, P228 y P240, en cambio, presentan una conexión limitada con el acuífero. El trazador llega a estos piezómetros, probablemente por la parte superior, se acumula, y la concentración de trazadores se mantiene constante durante todo el ensayo. Esto se explica por la litología de estos piezómetros, donde predominan las capas de limolitas.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de los resultados obtenidos durante el ensayo.

Tabla 41. Llegada de trazadores a los pozos monitorizados y su comunicación hidráulica

Piezómetro	Distancia a P171 (m)	Tiempo de llegada del trazador (h)	Tiempo del máximo (h)	Concentración máxima de fluoresceína (mg/L)	Concentración máxima de bromuro (mg/L)	Comunicación hidráulica
P198	-18.23	Coincide con inyección	Coincide con inyección	N/A	N/A	N/A
P172	-9.06	Antes de 26 h	47	16	84	Limitada
P224	37.48	Antes de 26 h	48.5	33	180	Mala
P227	48.39	Antes de 8 h	48.5	42	220	Mala
P228	57.52	Antes de 8 h	32	50	250	Mala
P229	84.48	27	50-73	37.4	211	Buena
P230	99.25	N/A	50-75	21	145	Buena
P81	117.10	Antes de 30	50-70	21	127	Buena
P240	122.45	Antes de 30	30 h	23	110	Mala
P231*	125.52	Antes de 30	50-70h	16	Sin datos	Buena
P232	150.16	Antes de 30	50-70	25	122	Buena
P129	299.81	Antes de 30	53-77	10	53	Buena
I1S	311.74	Antes de 77 h	77	14	69	Buena
O2	344.05	Antes de 77 h	77	14	69	Buena
P223	442.35	No detectado	No detectado	No detectado	No detectado	N/A

Con estas bases, durante 2024 se han realizado los siguientes trabajos:

- **Ensayos de columna.** Para minimizar la velocidad de infiltración por las fracturas bajo la balsa, se planteó el uso de un espesante para aumentar la viscosidad del surfactante. De este modo, en marzo de 2024 se realizaron varios ensayos de columna en laboratorio, con el objetivo final de estimar la dosis más adecuada para la mezcla de surfactante y espesante para emplear en el ensayo de infiltración.
- **Primer ensayo de infiltración:** del 18 al 21 de junio de 2024 se realizó un primer ensayo de infiltración en campo según las dosificaciones óptimas identificadas en el ensayo de columna.
- **Segundo ensayo de infiltración:** en noviembre de 2024 se llevó a cabo un segundo ensayo de infiltración con un menor volumen con la finalidad de confirmar el grado de efectividad del primer ensayo y seguir actuando para la descontaminación de la zona vadosa.

7.2 Ensayo preliminar de columnas

En el mes de marzo, se realizaron los ensayos de columna con el objetivo de estimar la dosis más adecuada para la mezcla de surfactante (Emulse®) y espesante (goma xantana) que se pretendía emplear en los posteriores ensayos de inyección en la balsa de infiltración.

Para este ensayo, se fabricó una estructura para permitir la realización de un total de 5 pruebas simultáneas (5 columnas) en las que se podía introducir cierta cantidad de gravas con una permeabilidad más o menos elevada. Bajo cada una de las columnas se colocó una rejilla lo suficientemente permeable como para evitar la caída de las gravas, pero no retener el paso del fluido. Así mismo, en la parte inferior se instaló un grifo para controlar el paso del mismo y una jarra aforada para controlar el volumen recuperado.

Figura 39. Estructura fabricada para la realización de los ensayos de columna (a la derecha, con las columnas llenas de grava)



En total, se han llevado a cabo 3 ensayos, cuyo procedimiento y resultados se comentan a continuación.

Antes del comienzo de los ensayos, se efectuó una simple prueba con el objetivo de conocer la porosidad eficaz de las gravas. Para ello, se realizaron cuatro lavados de una columna de gravas introduciendo 300 ml de agua limpia cada vez y se fue midiendo la cantidad de volumen recuperada. En función de la capacidad de cada columna según la altura alcanzada por las gravas, se estimó una porosidad eficaz de en torno al 30%; siendo prácticamente igual que el valor de porosidad real.

7.2.1 Ensayo 1

Preparación del ensayo

El primer ensayo tenía por objetivo seleccionar la dosis óptima de surfactante y espesante. Para ello, se estableció una concentración inicial de 5 g/l de surfactante para preparar cuatro soluciones diferentes de 1 l adicionando entre 1 y 4 g de goma xantana:

Tabla 42. Preparación de 4 condiciones diferentes para el primer ensayo

Componente	C1	C2	C3	C4
Agua		1 l		
Surfactante		5 g		
Goma xantana	1 g	2 g	3 g	4 g

Tras realizar las mezclas, se midió la viscosidad de cada una de ellas con el viscosímetro de laboratorio a 23 °C. Las columnas de ensayo se llenaron con gravas y se lavaron haciendo pasar 4 veces el volumen de poros de agua limpia, iniciando el ensayo el día posterior.

En la siguiente tabla se presentan las viscosidades medidas en cada mezcla. Cabe destacar que la medida de viscosidad (mPa·s) corresponde a la media tomada para las velocidades de rotación de 100 y 200 rpm y temperatura ambiente 25° C.

Tabla 43. Viscosidad de las mezclas (ensayo 1)

Mezcla	Viscosidad (mPa·s)
C1	38,5
C2	66,6
C3	107,9
C4	160,0

Figura 40. Preparación de las mezclas para el ensayo 1



El ensayo consistió en ir vertiendo cada una de las mezclas (C1 a C4) en su columna correspondiente (con el grifo abierto) e ir midiendo los tiempos de recuperación de cada mezcla en las jarras de recogida junto con el volumen recuperado a cada tiempo, así como el volumen final recuperado.

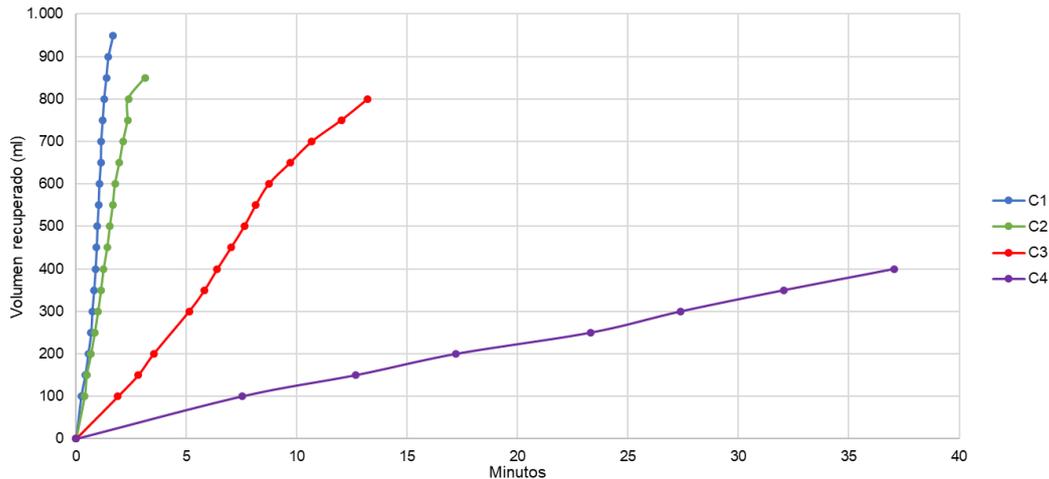
Resultados del ensayo 1

Con los datos que se fueron obteniendo del volumen de cada mezcla recuperado tras su paso por las gravas en su columna correspondiente con el tiempo, se obtuvieron las rectas que se muestran en las siguientes gráficas (en la Gráfica 29 se representa el volumen recuperado vs tiempo y en la Gráfica 30 se incluye la viscosidad).

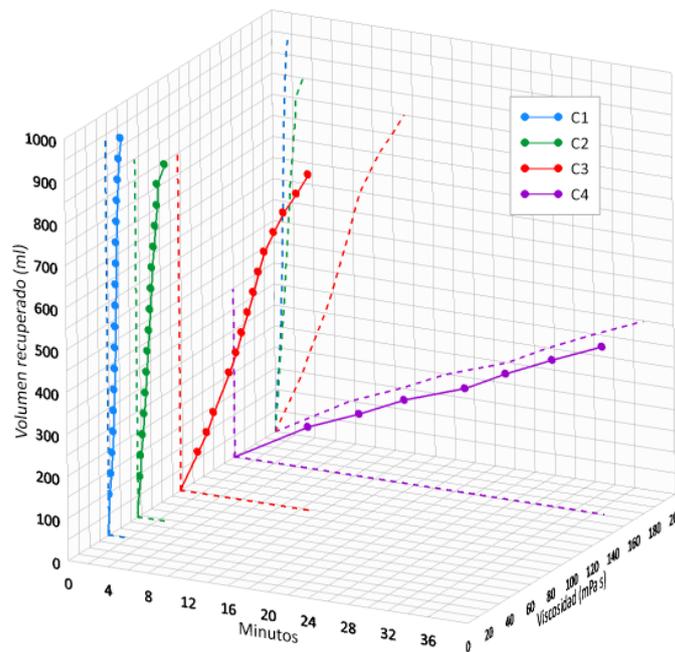
Cabe mencionar que en las gráficas se han representado únicamente los primeros datos, en los cuales la recuperación mantiene una tendencia en línea recta, puesto que después se vuelve curva al aumentar el tiempo de recuperación del volumen residual que retienen las gravas.

Así mismo, indicar que, aproximadamente, durante el primer día de ensayo, se retuvo en las gravas un volumen de unos 50 ml para C1, 150 ml para C2, y 200 ml para C3 y C4.

Gráfica 29. Evolución del volumen de mezcla recuperado en el tiempo (ensayo 1)



Gráfica 30. Evolución del volumen de mezcla recuperado en el tiempo vs viscosidad (ensayo 1)



Tal y como se observa, las dos primeras condiciones (concentraciones de goma xantana de 1 y 2 g) apenas presentaron diferencias significativas en cuanto al tiempo de recuperación, y permanecieron muy poco tiempo retenidas en las gravas. En cambio, se produjo un incremento significativo al aumentar la concentración de goma xantana a 3 g, y entre C3 y C4 (4 g) el incremento es prácticamente el doble que entre C2 y C3.

Con estos resultados, se consideró a priori óptima la mezcla C4, al tener una relación en cuanto volumen recuperado/tiempo de recuperación más lenta pero no ser una mezcla tan viscosa como para retenerse de forma significativa en el medio (cabe considerar que el paso por las fracturas puede ser potencialmente más lento que el ensayado en las columnas, debido a la horizontalidad de las mismas frente a la verticalidad de las columnas).

En cualquier caso, de modo a obtener datos más precisos de la eficacia de las mezclas, en el ensayo 2 se ensayaron las dos condiciones más viscosas, C3 y C4.

7.2.2 Ensayo 2

Preparación del ensayo

El segundo ensayo se realizó en tres columnas con la grava “dopada” con agua contaminada, con el objetivo de comprobar el efecto del arrastre de contaminantes por la acción de las mezclas a su paso a través de la columna.

Para ello, se extrajo agua del sondeo P172, con presencia de una alta carga contaminante, y se dejaron empapar las gravas requeridas para el ensayo durante un día en un recipiente cerrado. Tras permanecer un día en el agua, se escurrieron las gravas, se tomó una muestra del agua escurrida y se rellenaron las columnas de ensayo.

En cuanto a las mezclas a ensayar, se seleccionaron las dos condiciones que presentaron las mejores cualidades tras acabar el primer ensayo, que fueron C3 y C4. Esto es, aquellas para las que se midió un mayor tiempo de paso a través de las columnas, pero a su vez presentaron la suficiente fluidez como para no quedar retenidas en las gravas. Así mismo, se incluyó una tercera condición de control (C0), únicamente con agua limpia.

El procedimiento para efectuar el ensayo fue similar al del primer ensayo:

- Primero, se prepararon las mezclas para un volumen de 1 l y se tomó una muestra inicial para determinar la concentración de limoneno (identificador para el surfactante Emulse).
- Después, se fueron vertiendo las mezclas en cada una de las columnas, y midiendo el tiempo y el volumen de recuperación. Durante este proceso, se fueron tomando muestras del vertido en las jarras cada 200 ml recuperados en C4 y cada 250 ml en C3. Para la condición de control (C0), únicamente se tomó una muestra una vez se hizo pasar todo el volumen de agua (1 l) por la columna y se recuperó en la jarra de recogida.

Las muestras tomadas se llevaron para su análisis al laboratorio de Pirenarium. En la siguiente tabla se muestra la relación de muestras y los análisis efectuados.

Tabla 44. Preparación de 4 condiciones diferentes para el segundo ensayo

Muestra	Analito
Agua escurrida gravilla	COCs
Baseline C3 y C4	Limoneno
C0	COCs
C3 a diferentes tiempos	COCs y limoneno
C4 a diferentes tiempos	COCs y limoneno

Figura 41. Ejecución del segundo ensayo de columnas

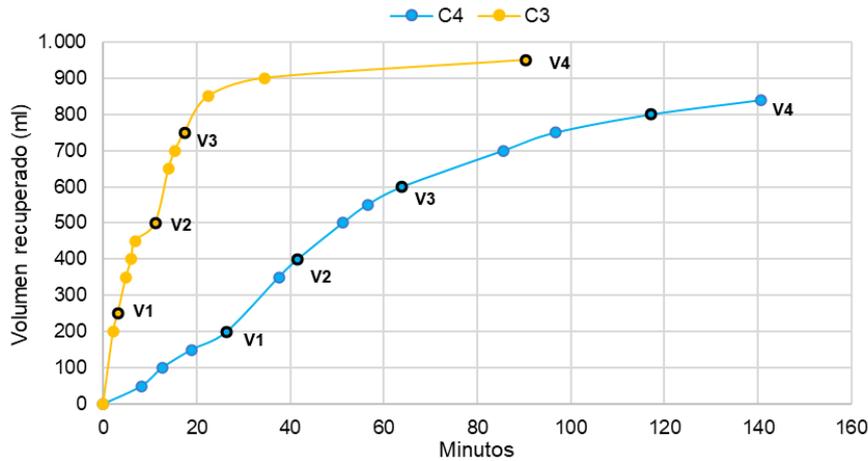


Resultados del ensayo 2

En este ensayo, se consiguieron recuperar 950 ml en total para C3 y 840 ml para C4, por lo que al finalizar el ensayo habían quedado retenidos 50 y 160 ml de mezcla en las gravas respectivamente. El tiempo total de duración del ensayo en C3 fue de 56 min, mientras que en C4 fue de 2 h y 46 min.

En la gráfica siguiente se muestra la evolución del volumen recuperado en función del tiempo de ensayo para cada mezcla y se marcan los diferentes “volúmenes de control” (V1 a V4), que fueron de 250 ml en C3 y de 200 ml en C4, donde se tomaron las muestras para evaluar la eficacia de las mezclas para la retención de los contaminantes.

Gráfica 31. Evolución del volumen de mezcla recuperado en el tiempo (ensayo 2)



En la tabla a continuación se muestran los resultados de los análisis de los principales compuestos del agua de P172 con el que fueron dopadas las gravas de ensayo, y del control C0, realizado dejando pasar agua limpia por una de las columnas.

Tabla 45. Resultados muestreos control C3 ensayo 2

Compuesto	Agua P172 (gravas)	C0
HCH total (µg/l)	16.986	704
Benceno (µg/l)	4.987	26
Monoclorobenceno (µg/l)	36.493	314
Suma clorobencenos (µg/l)	7.822	195

En las siguientes tablas se exponen los resultados de los análisis de los principales compuestos obtenidos para cada volumen de control en cada condición. La concentración de limoneno analizada en C3 en el muestreo de *baseline* fue de 3,83 g/l y en C4 de 4,02 g/l.

Tabla 46. Resultados muestreos control C3 ensayo 2

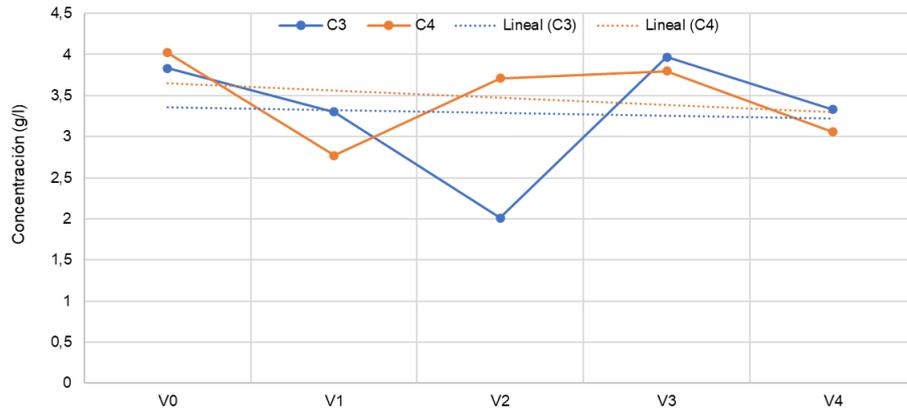
Compuesto	V1 (250 ml a 3 min)	V2 (500 ml a 11 min)	V3 (750 ml a 17 min)	V4 (950 ml a 90 min)
HCH total (µg/l)	3.034	260	167	102
Benceno (µg/l)	44	7	5	<0,1
Monoclorobenceno (µg/l)	805	101	72	64
Suma clorobencenos (µg/l)	1.052	85	74	62
Emulse (g/l)	3,30	2,01	3,97	3,33

Tabla 47. Resultados muestreos control C4 ensayo 2

Compuesto	V1 (200 ml a 26 min)	V2 (400 ml a 42 min)	V3 (600 ml a 64 min)	V4 (800 ml a 117 min)
HCH total (µg/l)	3.191	365	133	104
Benceno (µg/l)	35	11	4	6
Monoclorobenceno (µg/l)	641	148	53	68
Suma clorobencenos (µg/l)	1.007	143	73	73
Emulse (g/l)	2,77	3,71	3,80	3,06

En la siguiente gráfica se muestra la evolución en la concentración de Emulse para cada volumen de control en cada una de las condiciones ensayadas. Cabe recordar que los tanto los volúmenes como los tiempos de recuperación de cada uno son diferentes para cada condición.

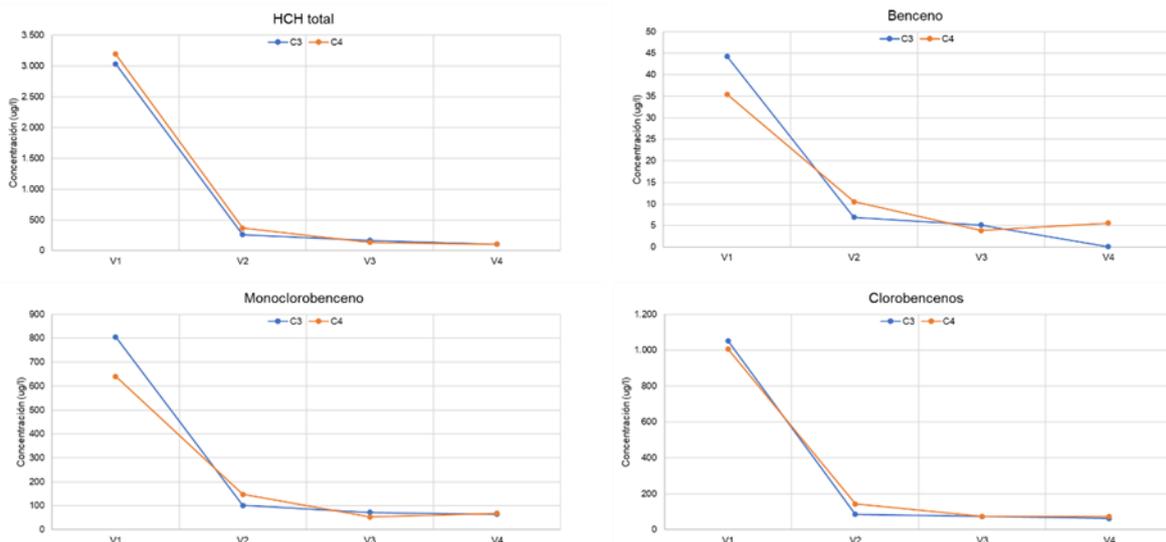
Gráfica 32. Evolución de la concentración de Emulsa (ensayo 2)



Según se observa, pese a la variabilidad obtenida a lo largo del ensayo en cada una de las muestras, en general la concentración se mantuvo bastante homogénea y disminuyó muy poco al final del ensayo, lo que significa que apenas se quedó adsorbido o degradado a su paso a través de la columna.

A continuación, se presenta la evolución de los principales contaminantes analizados para cada volumen de control en cada una de las condiciones ensayadas.

Gráfica 33. Evolución de la concentración de los contaminantes (ensayo 2)



En función de la evolución de los contaminantes, se apreció lo siguiente:

- La concentración “recuperada” de todos los compuestos en el primer volumen de control, además de ser la concentración más alta de la serie, también fue mayor que las concentraciones obtenidas en el muestreo de control con agua C0, lo que indica que el surfactante habría podido facilitar ese mayor arrastre de la carga contaminante.
- La eficacia del surfactante se hace patente especialmente en el caso del HCH, debido a sus propiedades, siendo el contaminante principal objetivo del proceso. Para este compuesto, la concentración analizada en el primer control, V1, llega a suponer entre un 18 y un 22% (en C3 y C4 respectivamente) respecto a la concentración analizada en el agua de P172, con el que se doparon las gravas.

A continuación, son los clorobencenos los que presentan una mayor “recuperación” a V1, entre el 13 y el 17% (en C3 y C4 respectivamente) respecto a la concentración de P172. En el caso del benceno y monoclorobenceno, los valores son despreciables.

- En los tres últimos controles, las concentraciones disminuyeron significativamente respecto a V1, y aunque siguen una tendencia decreciente, son muy similares entre sí. Es por ello que parece lógico apuntar a que la mayor eficacia se produce en el primer paso del surfactante por las gravas.

Esto puede ser debido en parte al disminuir la concentración adsorbida en las gravas tras el paso del primer volumen de surfactante, y en parte a cierto volumen de la mezcla se queda retenida, formando como una película alrededor de las gravas, impidiendo que aumente el contacto del surfactante con los contaminantes.

- La evolución para todos los contaminantes fue prácticamente idéntica en las dos condiciones, C3 y C4, sin apenas diferencias de concentración a lo largo del ensayo, lo que es coherente teniendo en cuenta que la única diferencia entre las mezclas fue la concentración de goma xantana.

Sin embargo, se esperaría que un mayor tiempo de contacto de los contaminantes con el surfactante, facilitado por la mayor viscosidad que le otorga la mayor concentración de goma xantana en C4, consiguiera arrastrar una mayor carga contaminante.

En este aspecto, es probable que el haber realizado el ensayo dopando las gravas con agua pudo ser menos representativo, entre otras cosas porque es difícil discernir si el arrastre de los contaminantes se ha producido desde las propias gravas o desde agua potencialmente retenida en los intersticios de las mismas, así como cuantificar esta concentración adsorbida o retenida respecto al agua con el que fueron dopadas.

Es por ello que se consideró más favorable y representativo del medio donde se pretende actuar (fracturas en zona no saturada con potencial presencia de DNAPL residual) llevar a cabo un tercer ensayo dopando las gravas con DNAPL, tal y como se recoge a continuación.

7.2.3 Ensayo 3

Preparación del ensayo

En el tercer ensayo se replicó el segundo ensayo, pero tal y como se ha comentado, en vez de dopar la gravilla con agua contaminada se hizo con DNAPL.

En este tercer ensayo se empleó únicamente la mezcla con mayor viscosidad (C4), pero se ensayó otra condición adicionando sosa a la mezcla (C4S), con el objetivo de comprobar si, además de conseguir el arrastre de contaminantes, se podría producir cierta degradación del HCH por la acción de la sosa. Adicionalmente, se añadió fluoresceína en las dos condiciones para facilitar la visualización de la mezcla.

La sosa se añadió a la mezcla hasta conseguir un pH de 11,8, con una dosificación de 10 ml 1N (el pH de la mezcla sin sosa era de 8,33).

Figura 42. Preparación del tercer ensayo de columnas



En las gravas de la columna de ensayo se vertió un volumen de 5 ml de DNAPL, que fue también muestreado para analizar en el laboratorio de Pirenarium. El DNAPL fue vertido directamente sobre las gravas y se dejó reposar durante un día.

El procedimiento para efectuar el ensayo fue similar a los dos anteriores, si bien se empleó un volumen de mezcla de 3 l, debido a que el procedimiento ideal para conseguir la mejor eficacia del surfactante en los ensayos en campo es emplear un volumen de 3 veces el volumen de poros del medio:

- Tras la preparación de las mezclas para las dos condiciones, se tomó una muestra inicial para determinar la concentración de limoneno y se midió la viscosidad de cada mezcla.

- En primer lugar, se vertió un litro de agua por cada columna y se tomó una muestra del volumen recuperado.
- Después, se fueron vertiendo las mezclas en cada una de las columnas, y midiendo el tiempo y el volumen de recuperación. Durante este proceso, se fueron tomando muestras del vertido en las jarras cada 260 ml recuperados para las condiciones de ensayo.
- Una vez finalizado el ensayo, se dejó pasar un litro de agua por cada una de las columnas y se tomó una muestra del volumen recuperado.
- A los 7 días de finalizar el ensayo, se volvió a verter un litro de agua por cada columna y a tomar una muestra del volumen recuperado.

Las muestras tomadas se llevaron para su análisis al laboratorio de Pirenarium. En la siguiente tabla se muestra la relación de muestras y los análisis efectuados.

Tabla 48. Preparación de 4 condiciones diferentes para el tercer ensayo

Muestra	Analito
DNAPL	Paquete DNAPL
Baseline C4 y C4S	Limoneno
C4 y C4S agua inicial	Paquete DNAPL (incluye limoneno)
C4 y C4S a diferentes tiempos	COCs y paquete DNAPL (incluye limoneno)
C4 y C4S agua final	Paquete DNAPL (incluye limoneno)
C4 y C4S agua a 7 días del final	Paquete DNAPL (incluye limoneno)

Figura 43. Ejecución del tercer ensayo de columnas



Las viscosidades medidas en cada una de las muestras se exponen en la siguiente tabla. Cabe destacar que la medida de viscosidad (mPa·s) corresponde a la media tomada para las velocidades de rotación de 100 y 200 rpm y temperatura ambiente 25° C.

Tabla 49. Viscosidad de las mezclas (ensayo 3)

Mezcla	Viscosidad (mPa·s)
C4	153,9
C4S	136,5

Tal y como se observa, la viscosidad de la mezcla con sosa disminuyó ligeramente respecto a la mezcla sin sosa. No obstante, los valores obtenidos fueron similares a los medidos en la mezcla C4 en el primer ensayo.

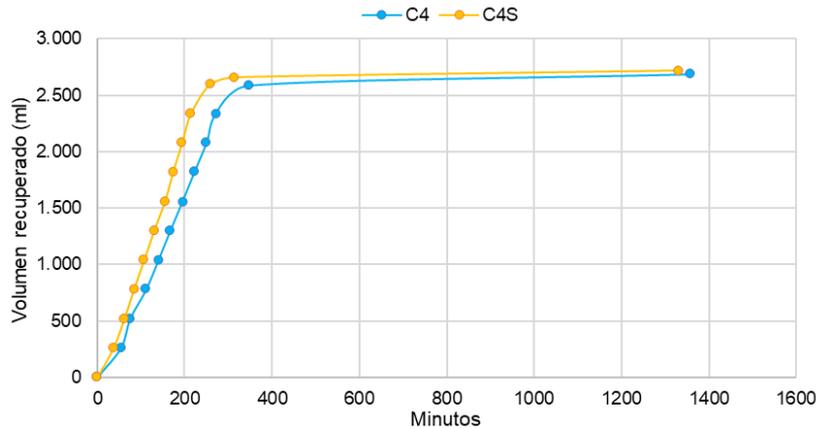
Resultados del ensayo 3

En este ensayo, se recuperaron un total de 2.690 ml para C4 y 2.720 ml para C4S, por lo que al final del ensayo se habían quedado retenidos 310 y 280 ml de mezcla en las gravas respectivamente. El tiempo total de duración del ensayo en C4 fue de algo más de 22 h en ambos casos.

En la gráfica siguiente se muestra la evolución del volumen recuperado en función del tiempo de ensayo para cada mezcla. Cada uno de los puntos que se marcan corresponden al volumen de 260 ml, para el que se fueron tomando las muestras para evaluar la eficacia de las mezclas para la retención de los contaminantes en ambas columnas.

La evolución de ambas muestras fue muy similar. La muestra C4S presenta una pendiente ligeramente mayor en la gráfica de evolución, debido a que en ella se midió una viscosidad ligeramente menor, quizá debido a la adición de la sosa. Por este motivo, también presentó al final del ensayo un menor volumen retenido.

Gráfica 34. Evolución del volumen de mezcla recuperado en el tiempo (ensayo 3)



En la siguiente tabla se exponen los resultados del análisis inicial de DNAPL.

Tabla 50. Resultados muestreo DNAPL

Compuesto	Concentración (mg/kg)
Monoclorobenceno	33.625
Suma clorobencenos	169.455
Suma pentaclorociclohexanos	187.327
Suma hexaclorociclohexanos	70.217
Suma heptaclorociclohexanos	302.254
HCH total	317.808
Limoneno	<0,01

La concentración de limoneno analizada en C4 en el muestreo de baseline fue de 3,26 g/l y en C4S de 2,45 g/l. Estos datos podrían sugerir que se ha producido cierta degradación del Emulso con la adición de sosa, aunque, tal y como se observa en la siguiente gráfica de evolución en la concentración de Emulso en cada una de las condiciones ensayadas, la diferencia se reduce a lo largo del ensayo, a excepción de algunos eventos de muestreo (V5 y V10 en C4).

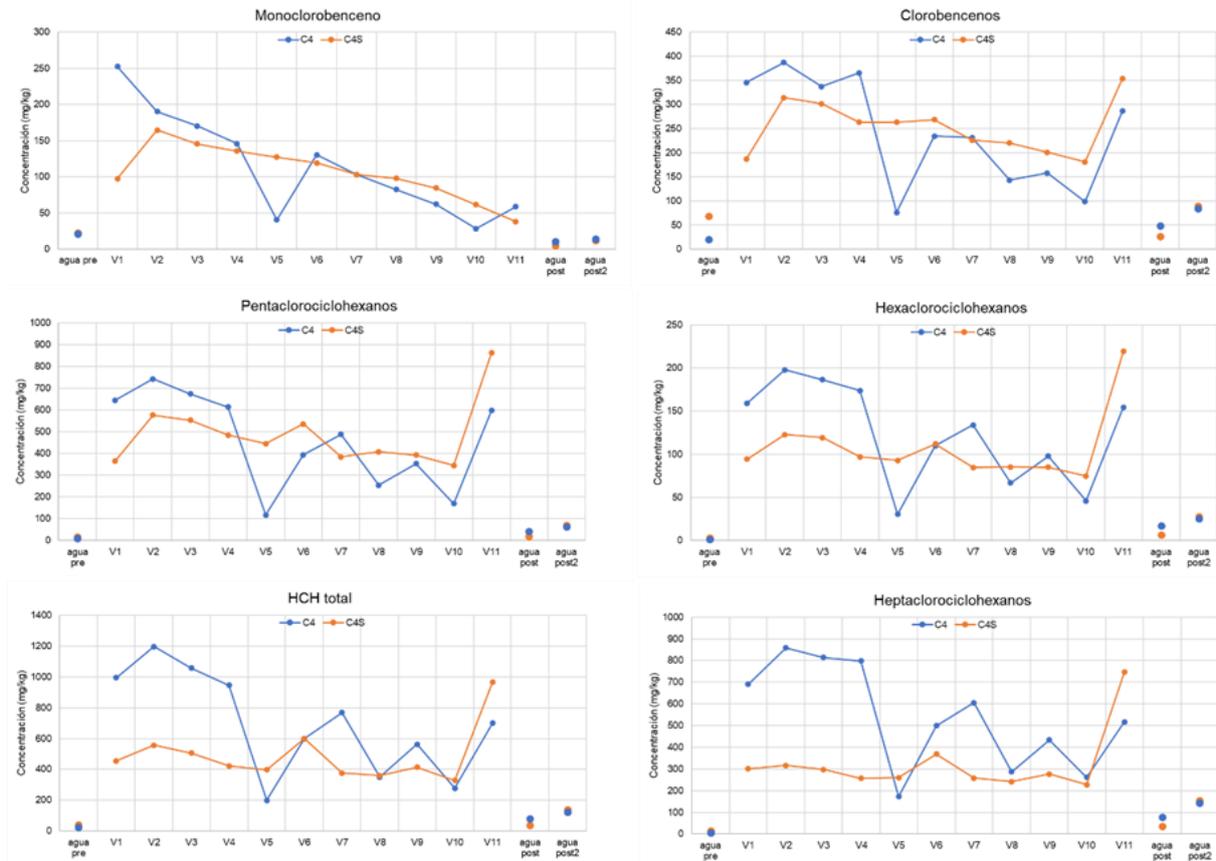
Gráfica 35. Evolución de la concentración de Emulso (ensayo 3)



También se observa cierta incertidumbre relativa al análisis de una mayor concentración respecto a la inicial en varios momentos del ensayo, y con una tendencia al inicio que parece aumentar, aunque la diferencia no es significativa y puede deberse a la propia variabilidad de las muestras.

En las gráficas a continuación se presenta la evolución de las concentraciones a cada volumen de control (260 ml). Los datos correspondientes a “agua pre” son los analizados para el agua que se escurrió por las gravas en cada columna antes del comienzo del ensayo, y “agua post” y “agua post2” equivaldrían a los analizados para el agua que se hizo pasar por cada columna al finalizar el ensayo y una semana después de finalizar el ensayo respectivamente.

Gráfica 36. Evolución de la concentración de los contaminantes (ensayo 3)



En función de la evolución de los contaminantes, se apreció lo siguiente:

- Las concentraciones analizadas en cada uno de los controles en ambas columnas son muy inferiores a la concentración que presentó el DNAPL para cada compuesto analizado. Los porcentajes de recuperación total en función de las concentraciones totales se situarían entre el 2 y el 4% dependiendo de los compuestos, siendo una cifra muy baja.
- Sin embargo, esta concentración es superior a la que presentó el agua que se hizo pasar por cada columna, por solubilidad del DNAPL, lo que indicaría que se produce cierto arrastre de carga contaminante. Así mismo, teniendo en cuenta que estos ensayos se han realizado con un volumen de mezcla muy reducido según el volumen de DNAPL empleado para dopar las gravas, se considera que se trabajará con un amplio margen de confianza para el ensayo de infiltración en campo, ya que se utilizarán grandes volúmenes de mezcla.
- La evolución en la recuperación de los compuestos sigue una tendencia decreciente en la mayoría de los casos, aunque para los heptaclorociclohexanos y el HCH total en el caso de la condición con sosa es más mantenida a lo largo del ensayo.
- A V5 en C4 se detecta un pico de menor concentración, como ya se vio en la evolución de la concentración de Emulse, que podría deberse a un dato anómalo.

- En todos los casos, a excepción de para el monoclorobenceno en ambas condiciones, se registra un aumento significativo de la concentración en el último control (V11). No obstante, esta muestra se tomó para el volumen residual que consiguió recuperarse al final del ensayo, siendo bastante menor al de control (260 ml): 100 ml en C4 y 120 ml en C4S; y el tiempo que pasó escurriendo fue significativamente mayor al que pasó entre los anteriores controles: entre V10 y V11 pasaron más de 16 h.

Esto demostraría que cuanto mayor tiempo pase la mezcla en contacto con el DNAPL, mejores resultados se obtendrían.

- Las muestras de la condición que no llevaba sosa, C4, muestran mayores concentraciones en general, y en especial al inicio del ensayo, sobre todo para los HCH, hexa y heptaclorociclohexanos. Es posible que se deba a que la sosa ha hecho efecto y ha provocado una degradación de estos compuestos por deshalohidrogenación en las muestras, si bien es algo que se no puede comprobar de forma inequívoca.

7.2.4 Conclusión de los ensayos de columnas

En función de los datos recopilados en los tres ensayos realizados, se decidió emplear para el ensayo de infiltración en el vaso una mezcla de surfactante con goma xantana con una concentración de 5 g/l de Emulse y 4 g/l de goma xantana.

7.3 Ensayos de infiltración

7.3.1 Metodología

El procedimiento de ensayo ha consistido en infiltrar una mezcla de reactivos (goma xantana y surfactante) y bromuro como trazador, para distribuir en la zona vadosa a partir de los sondeos (0 a 5 m) perforados en el interior de la balsa. Para medir la eficacia del ensayo, se han tomado muestras de control en los sondeos ubicados en el entorno más próximo a la balsa (P196, en el interior pero de mayor profundidad), P195 (aguas arriba) y P198 (aguas abajo). Otros trabajos de monitorización han consistido en analizar concentraciones de bromuro y contaminantes en sondeos de observación aguas abajo. Por último, para evitar la movilización de la mezcla aguas abajo, y con ello, una potencial movilización de la carga contaminante, se ha llevado a cabo un bombeo en continuo alternando entre el sondeo P171 y P225, para conseguir recuperar la mayor parte del volumen de mezcla infiltrado posible.

Como medida de contingencia, se instaló un sistema de inyección de sosa en P81 para actuar en el caso de que se detectara surfactante aguas abajo y evitar así una movilización de la carga contaminante.

Para preparar la mezcla de reactivos se emplearon dos depósitos de 1.000 l de capacidad cada uno (tan solo uno en el caso del segundo ensayo) con agitadores conectados mediante una red de tuberías, que inyectaban directamente por gravedad la mezcla a los sondeos. Estas tuberías disponían de una llave de paso para controlar la entrada de los reactivos.

En los sondeos P196 (situado dentro de la balsa) y P198 (situado inmediatamente aguas arriba de la balsa) se instalaron *packers* a la cota del fondo de los sondeos de la balsa, de 5 m cada uno. El objetivo de instalar los *packers* era, por un lado, evitar que los reactivos se introdujeran preferentemente por la columna de estos sondeos hasta el nivel freático, ya que se encuentran perforados en profundidad, y por otro, poder tomar muestras de la mezcla tras su paso por la zona vadosa y evaluar la eficacia del tratamiento.

Los días previos al inicio del ensayo se prepararon los reactivos a infiltrar, que consistían en una mezcla de surfactante (Emulse), para movilizar la carga contaminante de las paredes de las fracturas; goma xantana, para espesar la mezcla; y bromuro, como agente trazador de monitorización de una posible movilización del surfactante aguas abajo.

Para el primer ensayo de infiltración el volumen de mezcla se estimó a partir de las pruebas previas realizadas, ya que, según se determinó, era conveniente utilizar un volumen significativamente menor que el de la capacidad de la balsa para evitar pérdidas por el talud y favorecer la recuperación hidráulica de la mayor cantidad posible de mezcla infiltrada.

En base a ello, se ajustó el volumen de infiltración al recomendado para aplicar como método de remediación en el área de actuación, siendo 3 veces el "volumen de poros" disponible, y se calcularon las dosis de surfactante y goma xantana óptimas para aumentar la eficacia del ensayo. De este modo, se preparó una mezcla de 2.000 l de agua con 5 g/l de surfactante, 4 g/l de goma xantana y 400 mg/l de bromuro.

Para el segundo ensayo se decidió reducir el volumen de mezcla utilizado a 1000 l en función de los resultados obtenidos en el primer ensayo. Previo a la ejecución de los ensayos se procedió a realizar las siguientes tareas:

- Incorporación del sondeo P225, ubicado en Zona 0, a la red de bombeo.
- Instalación de cuadro dosificador de sosa en P81 como medida de contingencia.
- Instalación de *packers* en los sondeos P195, P196 y P198 para el control del ensayo.
- Instalación de los depósitos de mezcla dentro de la balsa y conexión de equipos.
- Muestreo de condiciones iniciales (*baseline*).

Figura 44. Preparativos para el ensayo de la balsa de infiltración



7.3.2 Ejecución de los ensayos

Primer ensayo de infiltración

El día 18 de junio a las 9:25 comenzó el ensayo tras casi 24 h de mezclado de los reactivos en los depósitos. Los grifos de los sondeos se fueron abriendo a medida que se iba infiltrando la mezcla en los sondeos y se cerraban cuando éstos se saturaban de producto.

Los depósitos tardaron 3 días en vaciarse por completo por la viscosidad de la mezcla, y porque tuvo que interrumpirse el ensayo por la tormenta del día 20 de junio. La viscosidad, medida en el laboratorio el mismo día de la inyección, fue de 113,2 mPa·s a 100 rpm (76,1 mPa·s a 200 rpm).

Los caudales de infiltración estimados fueron de 1,5 l/min para los sondeos situados más hacia el oeste de la balsa, y de 1,7 l/min para los situados más al este.

El sondeo de extracción aguas abajo fue variando en función de la evolución de los niveles de agua. Si uno se iba secando, se activaba el segundo, y así sucesivamente, de forma que se mantuvo en todo momento un bombeo activo. Al finalizar el ensayo se habían bombeado un total de 3.373 l de agua.

En la tabla a continuación se resume la evolución del ensayo.

Tabla 51. Evolución del ensayo de infiltración

Fecha	Hora	Hito
18 jun	9:25	Inicio del ensayo. Apertura de grifos y activación del bombeo en P171
18 jun	17:35	Se corta la infiltración. Total infiltrado 905 l
19 jun	7:55	Se reinicia la infiltración
19 jun	16:30	Se corta la infiltración. Total infiltrado 1.375 l
20 jun	7:30	Se reinicia la infiltración
20 jun	11:13	Se para el ensayo debido a una fuerte tormenta. Total infiltrado 1.845 l
21 jun	8:00	Se infiltran los últimos 155 l

El día 19 a las 15:13 se detectó un poco de mezcla rezumando por el talud de la plataforma donde se ubica el sondeo situado aguas arriba P195, si bien el volumen era muy escaso.

Figura 45. Rezume de mezcla por el talud de la plataforma del sondeo P195



Para el control del ensayo se llevaron a cabo muestreos de agua para determinar bromuro, surfactante y contaminantes de interés, y perfiles de conductividad.

El bromuro se fue determinando por un lado con la sonda de detección disponible en el laboratorio de Bailín, y por otro en el laboratorio de Pirenarium, junto a los contaminantes y el surfactante.

Las mediciones de bromuro con sonda se fueron realizando en los sondeos P198 (en la balsa), P171 (bombeo), P81 e IS1 (aguas abajo en Zona 0-Barranco 3 y Zona de Barrera) cada 2 h desde el inicio de la infiltración diariamente. El viernes 21 de junio, ya finalizada la infiltración, se llevaron a cabo dos muestreos de bromuro en los cuatro sondeos de control. A la semana siguiente, se mantuvo la monitorización de P81 e IS1.

Los perfiles de conductividad se llevaron a cabo en los sondeos P227 y P229 (Zona 0), P232 y P81 (Zona 0 a Barranco 3) y P130 e IS1 (Zona de Barrera).

Las analíticas de bromuro y surfactante por parte de Pirenarium se realizaron en los mismos sondeos, y adicionalmente, en P198 (aguas abajo junto a la balsa) y P171 (bombeo).

Para evaluar la eficacia del tratamiento, se tomaron muestras de la mezcla de reactivos que se fue acumulando en el sondeo P196, dentro de la balsa, en el tramo por encima del *packer*. En el sondeo P198 no se llegó a acumular nada de mezcla por encima del *packer*.

Segundo ensayo de infiltración

El día 12 de noviembre comenzó el ensayo a las 6:50 horas y a las 5 horas y 50 minutos ya se había infiltrado por completo la mezcla, quedando en el depósito un volumen de 50 l que no se pudo vaciar. A las 10:20, con un volumen infiltrado de unos 150 l, la mezcla comenzó a rezumar por varios puntos de la plataforma de P195, lo que indica que se produjo una buena distribución de la misma horizontalmente.

Figura 46. Puntos por donde filtró la mezcla en la plataforma del P195 bajo la balsa



En P171 se estuvo bombeando en continuo hasta el final del ensayo, extrayéndose un total de 3.800 l.

Para el control del ensayo se llevaron a cabo muestreos de agua para determinar bromuro, surfactante y contaminantes de interés, y se efectuaron perfiles de conductividad en profundidad en los sondeos de monitorización. El bromuro se fue determinando por un lado con la sonda de detección disponible en el laboratorio de Bailín, y por otro en el laboratorio de Pirenarium, junto a los contaminantes y el surfactante.

Las mediciones de bromuro se ampliaron respecto al primer ensayo, monitorizándose en P198 (aguas abajo balsa), P171 (bombeo), P224 y P227 (Zona 0), P229, P232 y P240 (Zona 0 a Barranco 3), P27 (Barranco 3), I1S y O2 (Zona Barrera), P223 (Barranco 4) y P140 (Zona Descarga). Se realizaron entre 1 y 2 mediciones al día en cada punto durante la duración del ensayo, entre los días 12 a 18 de noviembre, con un primer muestreo a las 2 h de comenzar el ensayo.

Los perfiles de conductividad se llevaron a cabo en todos los sondeos monitorizados, salvo en P198.

Para evaluar la eficacia del tratamiento, se tomaron muestras de la mezcla que se fue acumulando en el tramo por encima del *packer* en los sondeos P196 (dentro de la balsa) y P195 (aguas arriba de la balsa). En el sondeo P198, situado inmediatamente aguas debajo de la balsa, no se llegó a acumular nada de mezcla por encima del *packer*.

7.3.3 Resultados del primer ensayo de infiltración

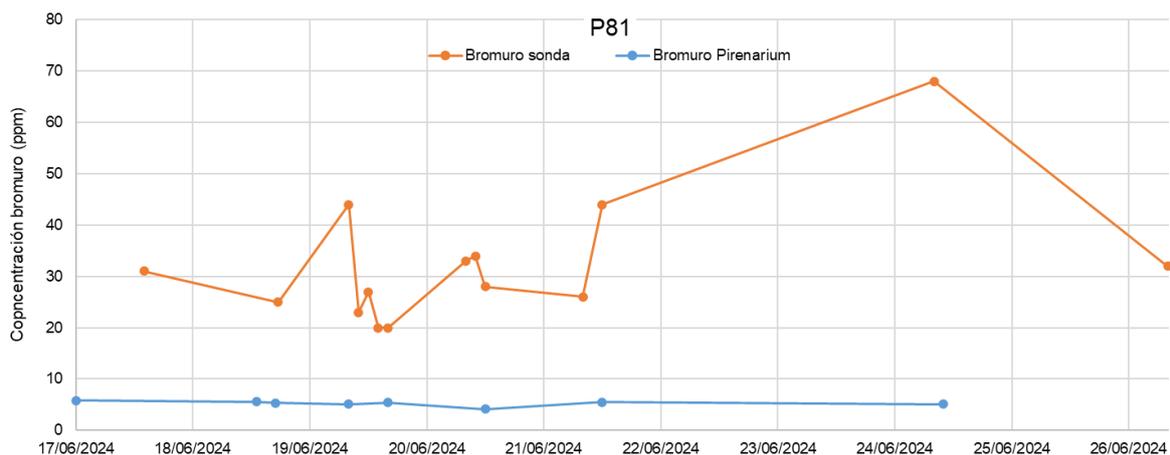
Evolución del bromuro y del surfactante aguas abajo de la zona de ensayo

En los sondeos aguas abajo del punto de bombeo principal, P171, no se llegó a detectar bromuro ni surfactante, lo que puede interpretarse como que no se produjo ninguna pérdida o movilización aguas abajo, y que o bien consiguió extraerse todo el volumen infiltrado o bien se produjo una degradación de los reactivos en la zona de ensayo.

En las mediciones de bromuro en campo con la sonda arrojaron datos variables debido a interferencias que se producen con algunos compuestos, como cloruros, pero siempre se encontraban dentro del mismo rango. Para ilustrar este hecho, se muestra la gráfica a continuación, que contrasta las mediciones realizadas en P81 con la sonda del laboratorio y las obtenidas en el laboratorio de Pirenarium.

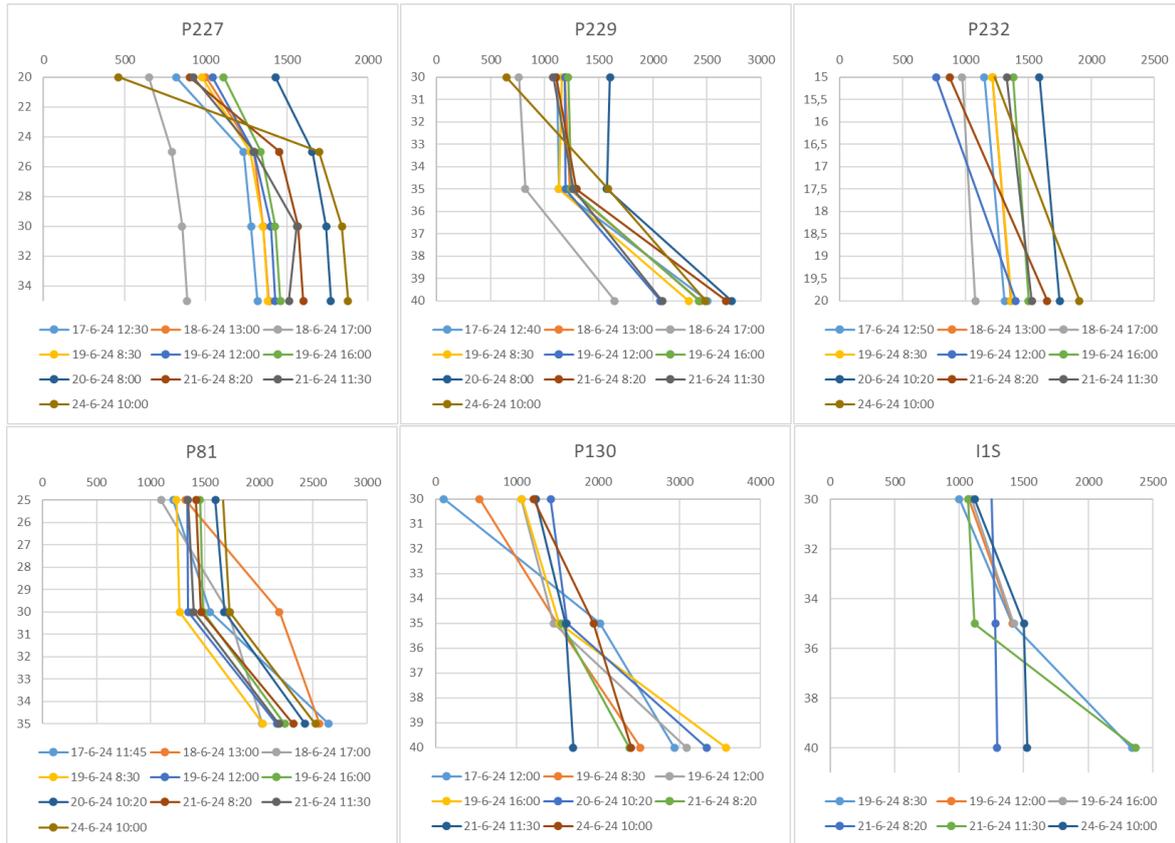
Como se puede observar, la concentración en bromuro analizada en Pirenarium no sufrió variaciones, manteniéndose en torno a los 5 mg/l en todo momento.

Gráfica 37. Evolución de la concentración de bromuro en P81 (sonda vs Pirenarium)



Respecto a las mediciones de conductividad realizadas con los perfiles en los sondeos de monitorización, tampoco se observaron variaciones significativas en las medidas que pudieran hacer suponer una influencia de la concentración de bromuro infiltrada, lo cual concuerda con los análisis de bromuro efectuados en el laboratorio de Pirenarium.

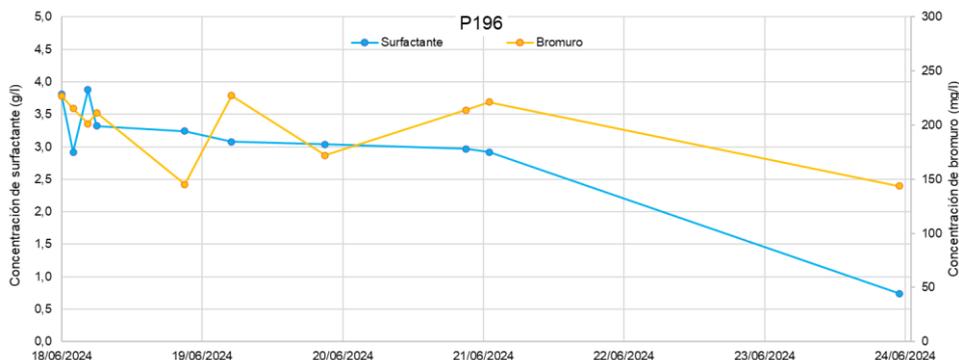
Gráfica 38. Evolución de la conductividad en profundidad en los sondeos de monitorización



En los análisis con Pirenarium tampoco se detectó el surfactante en ninguno de los controles de los sondeos aguas abajo, siendo en todo caso las concentraciones <0,1 g/l.

Únicamente se detectó surfactante en el sondeo de la balsa P196, donde se fueron tomando muestras de la mezcla antes de su llegada a la zona saturada. La evolución del surfactante en este punto se representa en la siguiente gráfica.

Gráfica 39. Evolución de la concentración de surfactante en P196



Tal y como se observa, la concentración de surfactante en la mezcla inyectada en los sondeos de la balsa y recogida en el tramo no saturado del sondeo P196 fue ligeramente inferior a la de la mezcla (5 g/l) durante el primer día de infiltración (quitando el dato anómalo de la segunda muestra tomada, se situó en torno a los 3,67 g/l), y luego fue descendiendo muy levemente hasta el último día de la inyección, para después disminuir hasta acabar el último día de monitorización, el 24 de junio, sobre los 0,74 g/l.

Análisis de contaminantes

El análisis de contaminantes se realizó en el sondeo P196, sobre la mezcla de reactivos recogida tras su infiltración desde los sondeos de la balsa y su paso por la zona vadosa. Al estar P196 dentro de la balsa, este volumen de mezcla se habrá distribuido por una parte del área total de actuación, sin poder discriminar qué fracturas ha podido limpiar a su paso.

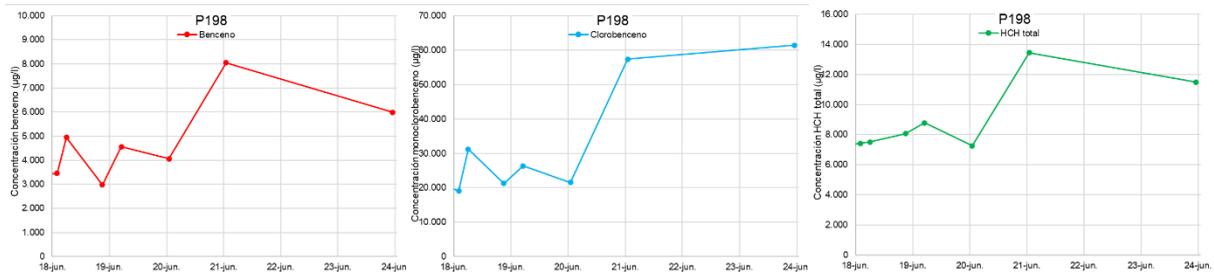
Al no acumularse nada de mezcla en el sondeo contiguo P198, es posible que la mezcla se haya ido perdiendo por las fracturas verticales, o una vez alcanzada la profundidad por debajo del packer de P196, se haya desplazado preferentemente por la columna del sondeo hasta alcanzar la zona saturada.

En cualquier caso, sí se observó parte de mezcla rezumando por el talud de P195 a casi 3 m de profundidad bajo la balsa, lo que demuestra que se produjo una distribución horizontal por la zona de actuación.

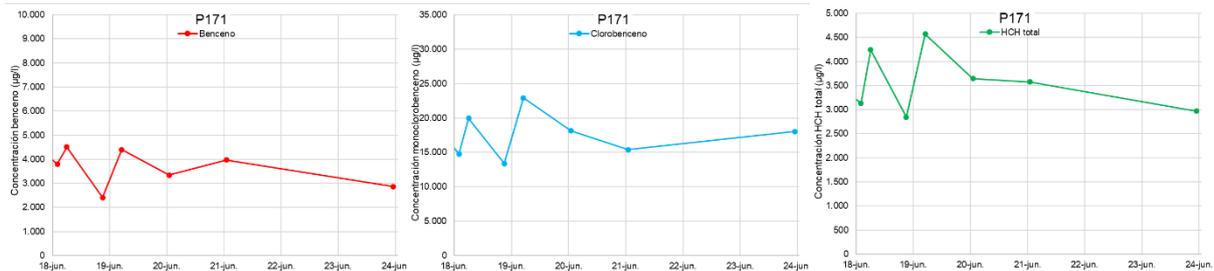
Además de este análisis, también se determinó la concentración de contaminantes en la zona saturada de los sondeos de monitorización, a la profundidad de muestreo preferente, si bien es muy difícil discernir si la variabilidad de las concentraciones se debe a la actuación del surfactante. No obstante, no se han llegado a detectar concentraciones de surfactante en ninguno de los sondeos fuera de la balsa.

En las gráficas a continuación se expone la evolución de las concentraciones de los compuestos principales en el sondeo contiguo situado aguas abajo, P198, y en el sondeo de bombeo P171.

Gráfica 40. Evolución de la concentración de contaminantes en P198



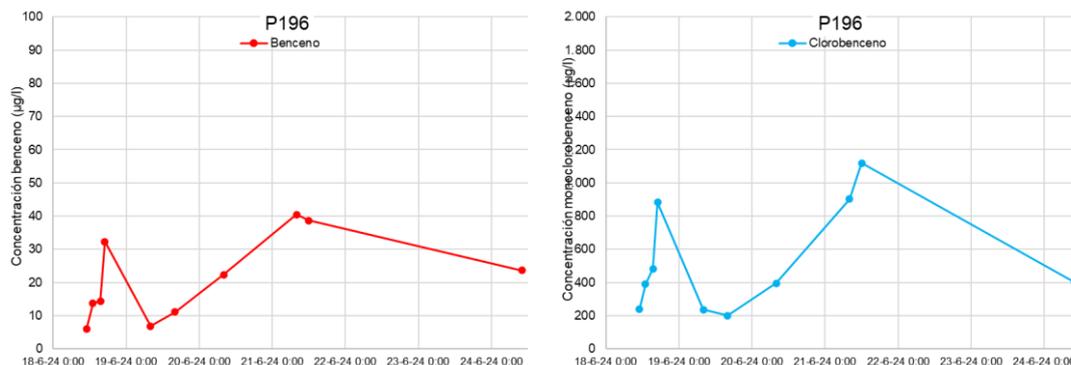
Gráfica 41. Evolución de la concentración de contaminantes en P171



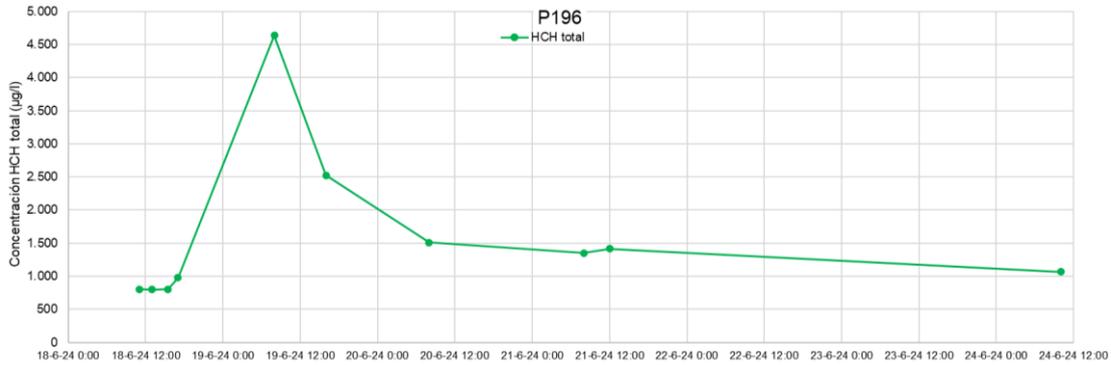
En P198, se detecta un incremento en las concentraciones en los tres compuestos el último día de infiltración, que podría estar relacionado con una potencial movilización de carga contaminante. No obstante, como se ha comentado anteriormente, no se detectó surfactante en este punto, lo cual hace complicado concluir que este incremento se debe a este efecto. En P171, las concentraciones se han mantenido bastante constantes durante todo el ensayo.

En las gráficas a continuación se muestra la evolución de las concentraciones en la mezcla acumulada en P196, dentro de la balsa, en la zona no saturada. La mezcla comenzó a acumularse el primer día de la infiltración a las 11:00, es decir, una hora y media después del inicio del ensayo. La muestra se tomó con bomba peristáltica en el interior del sondeo, por encima del packer.

Gráfica 42. Evolución de benceno y monoclorobenceno en P196



Gráfica 43. Evolución de HCH total en P196



Según se pudo observar en la evolución de concentraciones, teniendo en cuenta la concentración de HCH total, en las primeras muestras se obtuvieron valores similares de unos 900 µg/l, que a primera hora del segundo día de ensayo habían alcanzado los 4.600 µg/l, siendo la concentración más elevada analizada en todo el ensayo. A continuación, el HCH total fue disminuyendo hasta mantenerse en torno a los 1.000 µg/l.

Las concentraciones de benceno y monoclorobenceno fueron más variables, con un máximo el último día de ensayo en torno a los 40 µg/l para el benceno y 1.100 µg/l para el monoclorobenceno, valores bajos que concuerdan con la naturaleza de los contaminantes y su presencia en zona no saturada.

Teniendo en cuenta los resultados del HCH total, parece que sí se produjo una movilización de este compuesto desde las fracturas situadas en zona vadosa, especialmente teniendo en cuenta el valor elevado de 4,6 mg/l analizado el día 19 de junio a las 8:00, después de haber infiltrado alrededor de 905 l de mezcla de surfactante y espesante y tras 24 h de actuación.

La evolución de las concentraciones analizada concuerda con el efecto esperado del surfactante, obteniéndose el pico de “concentración recuperada” tras un día de actuación; y la viscosidad obtenida con la mezcla de la goma xantana ha demostrado ser efectiva para el tratamiento.

Después del 24 de junio no se pudo monitorizar más debido a la infiltración de la mezcla en profundidad. De este modo, con el objetivo de verificar la eficacia del tratamiento, se propuso realizar la segunda prueba empleando un volumen menor (unos 1.000 l) para determinar si se detectaban las mismas concentraciones o bien gracias a la “limpieza” de las fracturas en zona vadosa las concentraciones de HCH máximas podrían situarse por debajo de los 1.000 µg/l.

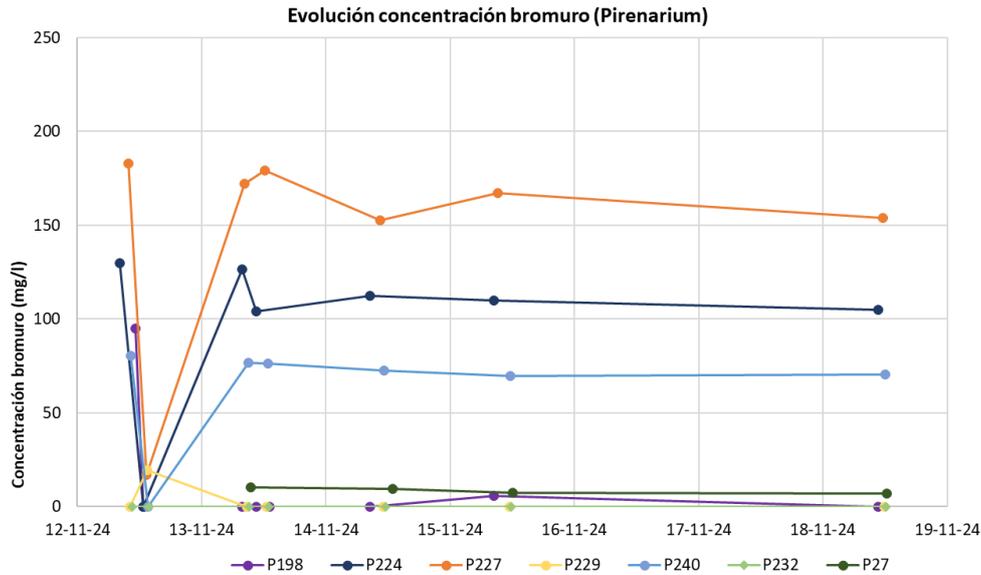
7.3.4 Resultados del segundo ensayo de infiltración

Evolución del bromuro y del surfactante aguas abajo de la zona de ensayo

Durante el ensayo, se tomaron fueron tomando muestras para analizar la evolución del surfactante y del bromuro en los puntos de monitorización aguas abajo. En el caso del surfactante, al igual que durante el primer ensayo, no se detectó en ningún sondeo aguas abajo en ninguno de los controles.

En el caso del bromuro, se observó una evolución más o menos regular, interrumpida por un resultado aparentemente anómalo tomado en uno de los controles a las 6 horas del inicio del ensayo, donde, tal y como se ve en la gráfica a continuación, las concentraciones de bromuro cayeron en picado hasta prácticamente no detectarse.

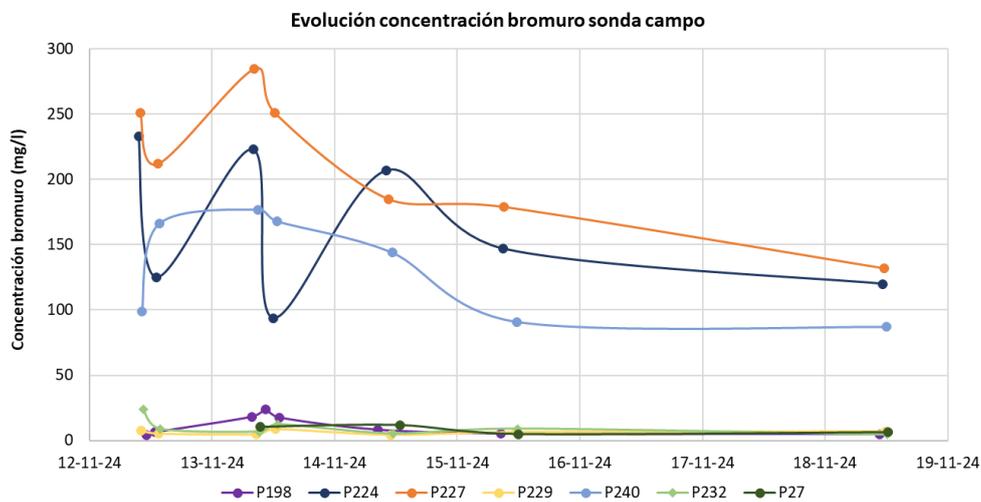
Gráfica 44. Evolución de la concentración de bromuro (Pirenarium)



No obstante, que las concentraciones analizadas se encuentren sin variaciones hasta el control del día 19 de noviembre da una idea de que la medida pueda estar influenciada por la presencia de otros compuestos en el agua subterránea, como cloruros, debido a las características del método de análisis (ión selectivo).

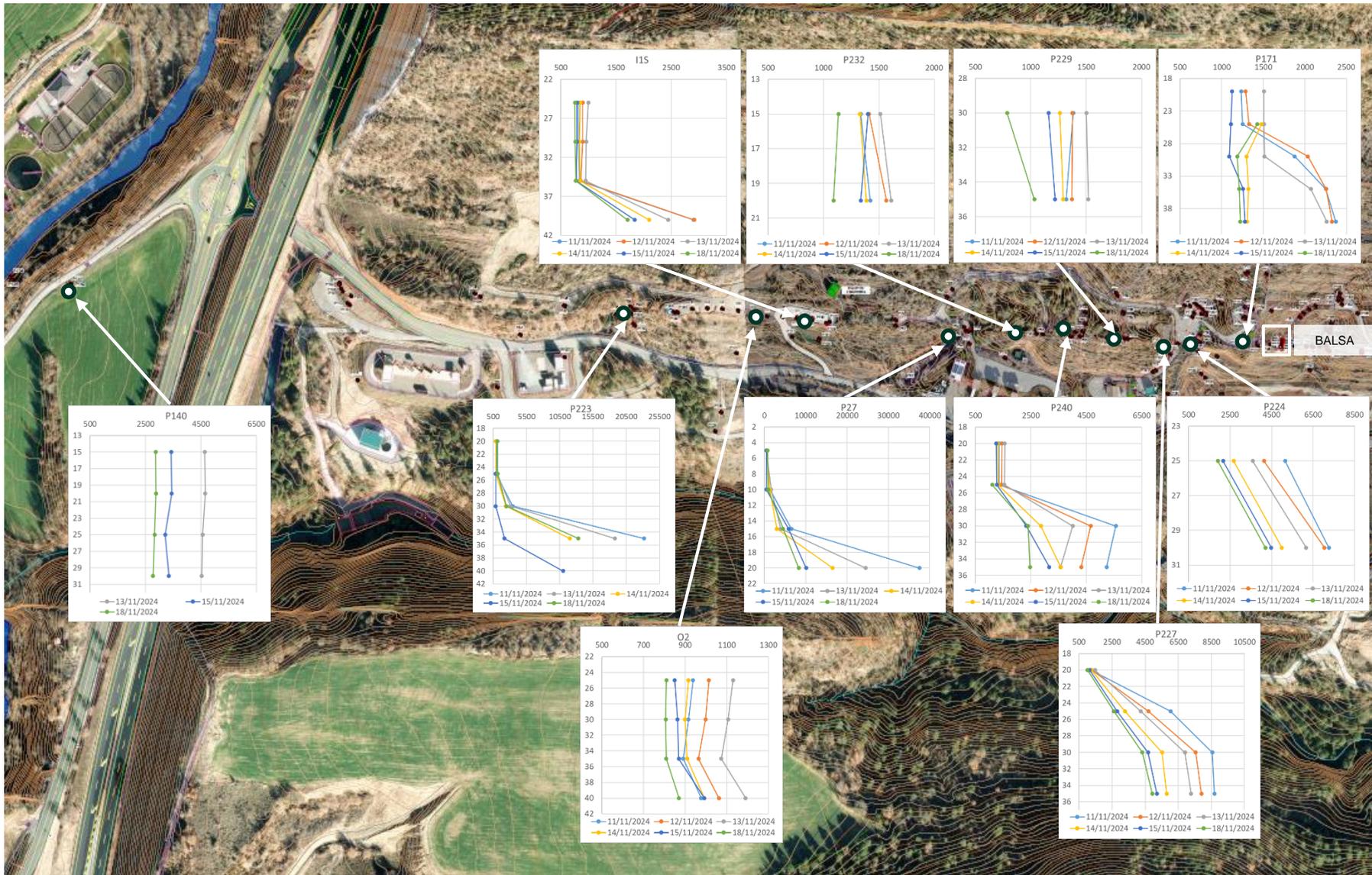
La evolución del bromuro tomada en las mediciones con la sonda de campo fue muy similar a la obtenida en Pirenarium, como se presenta en la figura a continuación, aunque en esta ocasión no se detectó ningún dato anómalo. Lo que sí se visualiza rápidamente es la variabilidad de las concentraciones que se detectan según los eventos de muestreo, como ocurre en el sondeo P224.

Gráfica 45. Evolución de la concentración de bromuro (sonda campo)



Respecto a las mediciones de conductividad realizadas en los sondeos de monitorización, no se observaron variaciones significativas en las medidas que pudieran hacer suponer una influencia de la concentración de bromuro infiltrada respecto a la medida inicial del día 11 de noviembre tomada como *baseline*, tal y como se muestra en la figura a continuación.

Gráfica 46. Evolución de la conductividad en profundidad en los sondeos de monitorización



Análisis de contaminantes

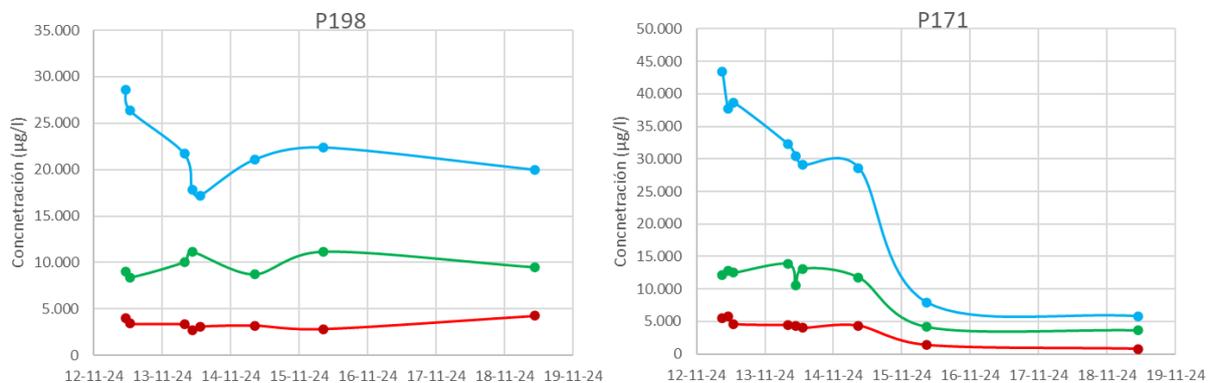
Para evaluar la eficacia del tratamiento, se tomaron muestras de la mezcla que se fue acumulando en el tramo por encima del packer de los sondeos P196, dentro de la balsa, y P195, aguas arriba de la balsa. En el sondeo P198 no se llegó a acumular mezcla, al igual que ocurrió durante el primer ensayo realizado en junio.

Por otro lado, también se analizó la concentración de contaminantes en la zona saturada de los sondeos de monitorización situados inmediatamente aguas debajo de la balsa, P198 y P171. Los muestreos en P198 se efectuaron a nivel, con el objetivo de observar si se producía un aumento de la carga contaminante en zona saturada a consecuencia de la actuación. En P171, sondeo de bombeo, se tomó la muestra del agua extraída. En ninguno de los puntos se detectaron concentraciones de surfactante.

Cabe mencionar que se intentó instalar una bomba para tomar muestra del nivel freático bajo el packer en el sondeo de la balsa P196 pero no pudo ser posible.

En las gráficas a continuación se expone la evolución de las concentraciones de los compuestos principales en P198 y P171 durante el ensayo.

Gráfica 47. Evolución de la concentración de contaminantes en P198 y P171

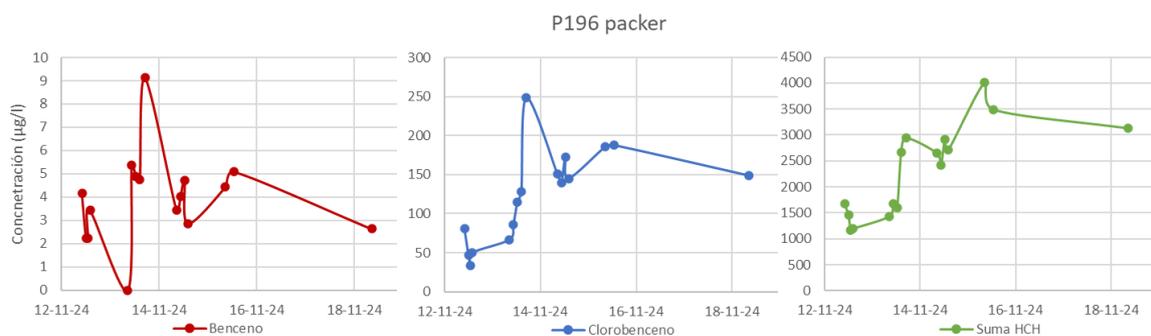


Tal y como se observa, en P198 la tendencia es más mantenida y homogénea a lo largo del ensayo, mientras que en P171 se observa una disminución significativa en los últimos eventos de muestreo. En función de esta evolución, no parece que se haya producido ninguna movilización de carga contaminante a consecuencia de la infiltración de la mezcla.

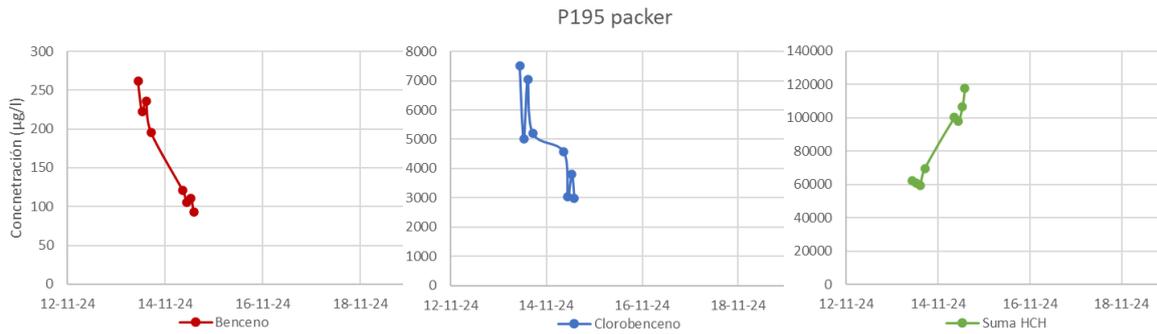
En P171, el hecho de que se produjera una cierta reducción de la concentración de los tres compuestos en P171 parece deberse más bien a que, al ir extrayendo el agua subterránea, al principio se muestreó más cantidad de material particulado, donde se retiene parte importante de la carga contaminante, mientras que al ir "limpiando" la columna de agua del sondeo, las concentraciones se estabilizaron.

En las gráficas a continuación se muestra la evolución de las concentraciones en la mezcla acumulada en P196, en P195 y en uno de los rezumes del talud de la plataforma de P195, que filtró un volumen suficiente como para tomar una muestra.

Gráfica 48. Evolución de la concentración de contaminantes en P196



Gráfica 49. Evolución de la concentración de contaminantes en P195



Gráfica 50. Evolución de la concentración de contaminantes en el talud de P195



A las 10:00 del 12 de noviembre, tres horas y 10 minutos después del inicio del ensayo, se empezó a acumular la mezcla en el packer del sondeo P196 y se mantuvo hasta el final del seguimiento.

La filtración en la plataforma de P195 comenzó también el día 12 de noviembre, a las 10:20, y se muestreó hasta que el volumen filtrado fuera suficiente para el análisis. En función de la distancia respecto a la balsa y el transcurso entre el inicio de la infiltración y la filtración por el talud, se estima una velocidad de desplazamiento horizontal de la mezcla de 3,5 cm/min.

En el caso del interior del sondeo P195, la mezcla no se empezó a acumular hasta el día 13, un día después del inicio, y cesó un día después.

Por otro lado, también se analizó la concentración de contaminantes en la zona saturada de los sondeos de monitorización, a la profundidad de muestreo preferente, si bien es muy difícil discernir si la variabilidad de las concentraciones se debe a la actuación del surfactante. No obstante, no se han llegado a detectar concentraciones de surfactante en ninguno de los sondeos.

Respecto a la evolución de las concentraciones, se han observado varios aspectos interesantes, que pasan a comentarse a continuación.

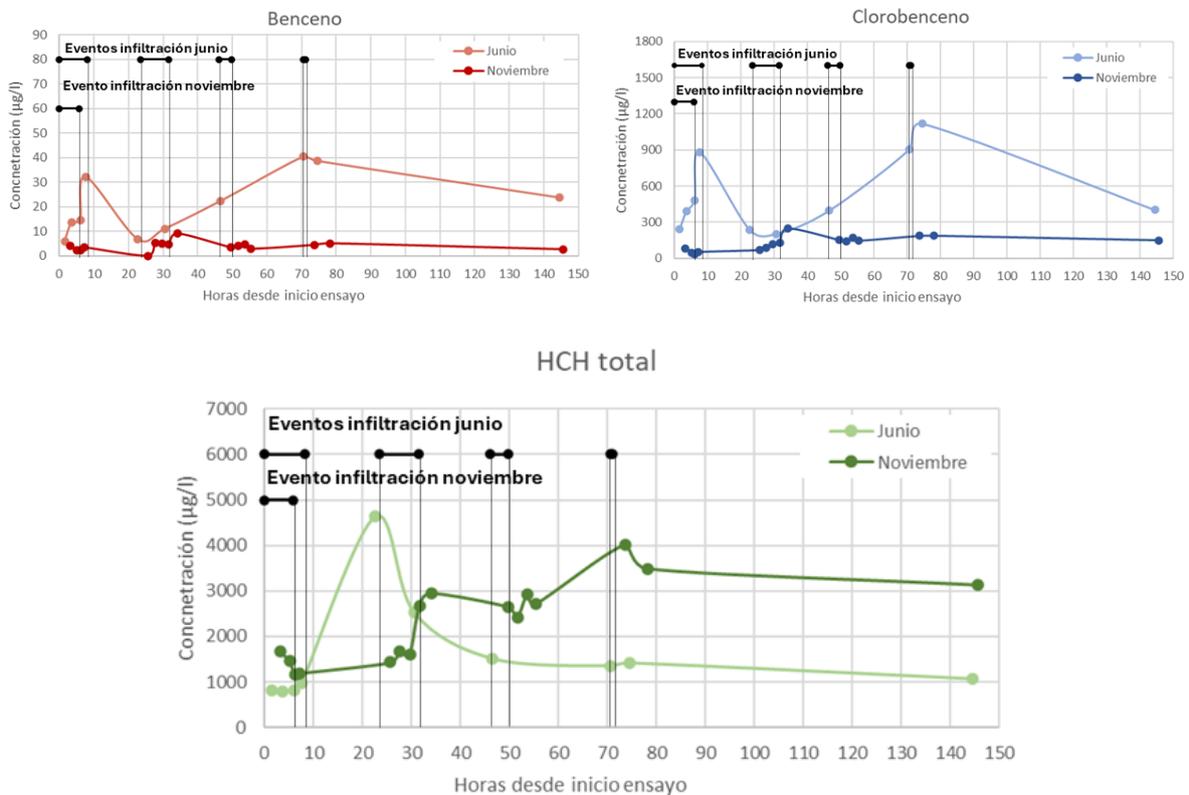
En el sondeo P196,

- Las concentraciones de benceno y monoclorobenceno a lo largo del ensayo son significativamente menores que las de HCH total, acorde a la naturaleza de los compuestos y su presencia en las fracturas en zona vadosa.
- En cuanto al HCH total, al inicio del ensayo se empezaron a registrar concentraciones en torno a 1,7 mg/l, que fueron aumentando hasta alcanzar su máximo el día 16 de noviembre, 4 días después del inicio, llegando a los 4 mg/l. Posteriormente, estas concentraciones se fueron reduciendo, si bien no se pudo identificar si la concentración "remanente" pudo haber sido inferior al último valor analizado al dejar de acumularse mezcla tras el día 18 de noviembre.
- Si se comparan los resultados obtenidos en ambos ensayos (ver gráfica debajo), se puede observar lo siguiente:

- Las concentraciones máximas de benceno y monoclorobenceno analizadas fueron menores en este segundo ensayo (9 $\mu\text{g/l}$ frente a 40 $\mu\text{g/l}$ de benceno en el primer ensayo, y 1.100 $\mu\text{g/l}$ frente a 250 $\mu\text{g/l}$ de monoclorobenceno).
- La concentración máxima de HCH también disminuyó, aunque en menor diferencia (4 mg/l frente a los 4,5 mg/l analizados en el primer ensayo). Esto era una de las situaciones esperables según el objetivo de este segundo ensayo, que era comprobar si se había producido una cierta “limpieza” de la zona vadosa en el área de actuación, lo que a priori, sí que podría afirmarse, aunque haya sido a pequeña escala.
- Una de las diferencias más significativas de la evolución del HCH en ambos ensayos es el tiempo transcurrido desde el inicio hasta que se alcanza el máximo de concentración. En el ensayo de junio, el pico de HCH se produjo tras el inicio del segundo día de ensayo, tras haberse infiltrado unos 900 l. En cambio, en el ensayo de noviembre, la concentración fue aumentando hasta alcanzar el pico una vez transcurridas unas 60 horas tras el único evento de infiltración.

Según esta evolución, parece confirmarse la efectividad del tratamiento sin la necesidad de aumentar el volumen de actuación por encima de los 1.000 l. Por otro lado, podría ser que durante el segundo ensayo se haya producido una distribución más homogénea de la mezcla en zona vadosa, con una recuperación de la carga contaminante más gradual, y se haya favorecido un mayor tiempo de contacto.

Gráfica 51. Comparación de la evolución de contaminantes en P196 ensayo junio vs noviembre



En el sondeo P195,

- La mezcla alcanzó la zona no saturada del sondeo P195 un día después de la infiltración, casi un día después también de que se produjera la filtración por el talud de la plataforma donde se sitúa el sondeo, y se mantuvo durante un día, tomándose la última muestra posible el día 14 a las 14:00.
- La evolución de las concentraciones de benceno y monoclorobenceno mostró una tendencia descendente, mientras que la de HCH total fue ascendente. En el caso de benceno y monoclorobenceno, las concentraciones iniciales (las máximas) fueron de 250 y 7.500 $\mu\text{g/l}$ respectivamente, siendo más elevadas que las analizadas en P196 en los dos ensayos realizados. Sin embargo, lo más llamativo es la concentración de HCH total analizada, entre los 60 mg/l del inicio hasta los 120 mg/l al final. Las muestras tomadas en el talud también mostraron concentraciones similares (entre los 30 y los 40 mg/l).

En base a estos resultados, se hace patente la existencia de DNAPL residual en fracturas de zona vadosa entre la balsa y el sondeo P195, que puede estar retenido en un volumen no tan elevado como para fluir y acumularse en los sondeos de la zona, pero suficiente como para actuar como foco primario de afección a las aguas subterráneas al solubilizarse en eventos de infiltración (precipitación). Este DNAPL se habría degradado hasta empobrecerse en los compuestos más solubles y degradables (como benceno y clorobenzenos), quedando únicamente el HCH como producto recalcitrante.

Debido a que no se siguió acumulando mezcla en este punto más allá del día 14, no pudo ser posible ver si las concentraciones habrían aumentado más, o el momento de cambio de tendencia.

7.3.5 Conclusiones del ensayo de infiltración

- Se han llevado a cabo dos ensayos de infiltración en 2024, uno en junio y otro en noviembre, a partir de la inyección de una mezcla de surfactante, goma xantana y bromuro en sondeos situados en la balsa de infiltración construida en la zona del Barranco Oeste del vaso para su distribución en un área concreta de actuación en zona vadosa.
- En el primer ensayo se inyectaron un total de 2.000 l de mezcla en varios días de actuación, y en el segundo se inyectaron 1.000 l de mezcla en un solo día de actuación. Gracias a la goma xantana, la mezcla se ha podido infiltrar lentamente por las fracturas, facilitando la actuación del surfactante al permanecer un tiempo prolongado en contacto con los contaminantes alojados en las paredes de las fracturas de la zona vadosa.
- En ambos ensayos se ha podido comprobar la distribución horizontal de la mezcla en la zona de ensayo al detectarse un pequeño rezume por el talud situado sobre la plataforma del sondeo P195, a unos 3 m por debajo de la cota de la balsa.
- No se han detectado concentraciones de surfactante ni bromuro atribuibles a los ensayos en sondeos aguas abajo, lo que significa que o bien se ha conseguido recuperar lo infiltrado a partir del bombeo aguas abajo o bien los productos se han degradado tras su actuación.
- Se han tomado muestras de la mezcla acumulada sobre los *packers* instalados en los sondeos P196, situado en la balsa, en ambos ensayos, y en P195 y el rezume ocurrido en el talud de la plataforma de este mismo sondeo, en el segundo ensayo.
- De forma general, en función de la evolución de las concentraciones de HCH total, los ensayos han sido efectivos en cuanto a movilización de carga contaminante en zona vadosa:
 - En P196, en el primer ensayo se alcanzó un máximo de 4,6 mg/l tras 900 l infiltrados y 24 horas de actuación. En el segundo, se alcanzó un máximo de 4 mg/l tras 950 l infiltrados y 70 horas de actuación.
 - En el segundo ensayo, donde pudieron tomarse muestras en P195, se alcanzaron concentraciones máximas de HCH de hasta 100 mg/l, lo que indica la presencia de DNAPL residual en las fracturas de la zona vadosa bajo la balsa, al menos hacia el lado oeste. Los muestreos en el rezume del talud de la balsa confirmaron la presencia de afección, con valores de hasta 40 mg/l.
- En vista de los resultados en el segundo ensayo, se considera recomendable continuar con la ejecución de este tipo de ensayos de infiltración, manteniendo las proporciones de reactivos en la mezcla en un volumen suficiente de 1.000 l, y monitorizar la evolución de la concentración de HCH con el objetivo de seguir limpiando la zona vadosa y corroborar la eficacia de la actuación.

8. Ensayos de biorremediación

En 2024 se ha seguido la línea de trabajos para la biorremediación comenzada en los años anteriores en el emplazamiento, con el objetivo de continuar caracterizando el acuífero desde el punto de vista microbiológico, de cara a evaluar la aplicación de diferentes tratamientos de biorremediación.

Desde el año 2017, se ha venido construyendo un modelo conceptual microbiológico del emplazamiento mediante el empleo de herramientas biológicas moleculares y análisis isotópicos, que, en conjunto, engloban una serie de técnicas que permiten obtener múltiples líneas de evidencia para entender los mecanismos degradativos existentes en el acuífero.

Este tipo de estudios ha demostrado la existencia de procesos de biodegradación de los contaminantes de interés en diferentes zonas con elevados potenciales asociados a diferentes mecanismos de degradación, o la presencia de comunidades microbianas diversas bajo las condiciones reales existentes en el acuífero.

De manera paralela a la caracterización microbiológica in situ, desde el año 2020 se ha estudiado la viabilidad de implantación de sistemas de biorremediación desarrollados a partir de recursos autóctonos, como un biorreactor. La evidencia es que este tipo de sistema puede ser viable en zonas del acuífero menos impactadas y con baja conexión hidráulica, y servir como punto de partida para ir tratando progresivamente otras zonas del acuífero.

Para ello, se han ido escalando los trabajos desde el laboratorio y proponiendo nuevos ensayos que permitan sentar las bases para el desarrollo de un sistema de biorremediación en campo eficaz y adaptado a las condiciones del medio. A continuación, se detallan los principales trabajos de biorremediación desarrollados en 2024 en laboratorio y en campo.

8.1 Trabajos de biorremediación desarrollados en laboratorio

8.1.1 Introducción y antecedentes

En conjunto con la Dirección Facultativa, en marzo de 2023 se valoró la posibilidad de reubicar la implantación del biorreactor de campo directamente sobre la capa M. Debido a este nuevo planteamiento, fue necesario llevar a cabo una caracterización previa de muestras de posibles puntos con características adecuadas para poder seleccionar qué punto podía resultar el mejor candidato para continuar con los estudios de biorremediación planteados.

Para ello, se propuso como nueva ubicación alguno de los sondeos ubicados en capa M en el Barranco Este del vaso desmantelado, debido principalmente a dos aspectos:

- Son puntos aguas arriba de los principales focos de afección (Barranco Oeste y Zona 0) y, por tanto, con concentraciones moderadas de contaminantes en los que sería viable plantear procesos de biorremediación.
- La zona del Barranco Este se encuentra aguas arriba de las principales zonas donde se han concentrado la mayoría de los trabajos de remediación en los últimos años, teniendo unas condiciones más estables a lo largo del tiempo. Este hecho se considera de vital importancia para la implantación de tratamientos de biorremediación que requieren tiempos elevados de actuación.

Cumpliendo los requisitos anteriores, se seleccionaron 6 sondeos ubicados sobre la capa M en el Barranco Este del vaso desmantelado: P217, P178, P218, P219, P177 y P220. Para estos sondeos, el P177 se mostró como el más favorable para llevar a cabo la instalación del biorreactor aeróbico, por lo que se seleccionó para iniciar nuevos ensayos de laboratorio.

En el marco de esta actuación, en 2024 se han llevado a cabo una serie de ensayos de laboratorio:

1. Ensayo de viabilidad microbiológica y variabilidad entre muestras de agua del sondeo P177
2. Ensayos aeróbicos en el mini-biorreactor de laboratorio.
3. Ensayos anaeróbicos en el mini-biorreactor de laboratorio.
4. Ensayos de secuencia aeróbico-anaeróbico en el mini-biorreactor de laboratorio.
5. Estudio de secuenciación masiva y aislamiento de microorganismos.

8.1.2 Ensayo de viabilidad microbiológica y variabilidad entre muestras con agua de P177

El ensayo de viabilidad microbiológica y variabilidad entre muestras se llevó a cabo entre diciembre de 2023 y enero de 2024. El objetivo era corroborar si es posible utilizar una misma muestra para varios ensayos conservándose en la nevera durante varias semanas sin que se produjesen alteraciones microbiológicas significativas.

Metodología

Para el ensayo, se tomaron 2 muestras de 2 l en frascos esterilizados del sondeo P177, una el 18 de diciembre de 2023 (M1), y otra el 19 de diciembre de 2023 (M2). Las muestras se conservaron en la nevera a 4°C para evaluar la posible variabilidad de las características químicas y microbiológicas en días posteriores.

Con este objetivo, se analizaron los principales contaminantes en el laboratorio de Pirenarium y se realizaron siembras microbiológicas durante las siguientes semanas. De forma paralela, se fueron tomando muestras con periodicidad semanal en el agua del propio sondeo (M3 a M10) para estudiar la variación en la concentración de contaminantes y parámetros fisicoquímicos in situ. La duración total de la prueba fue de un mes.

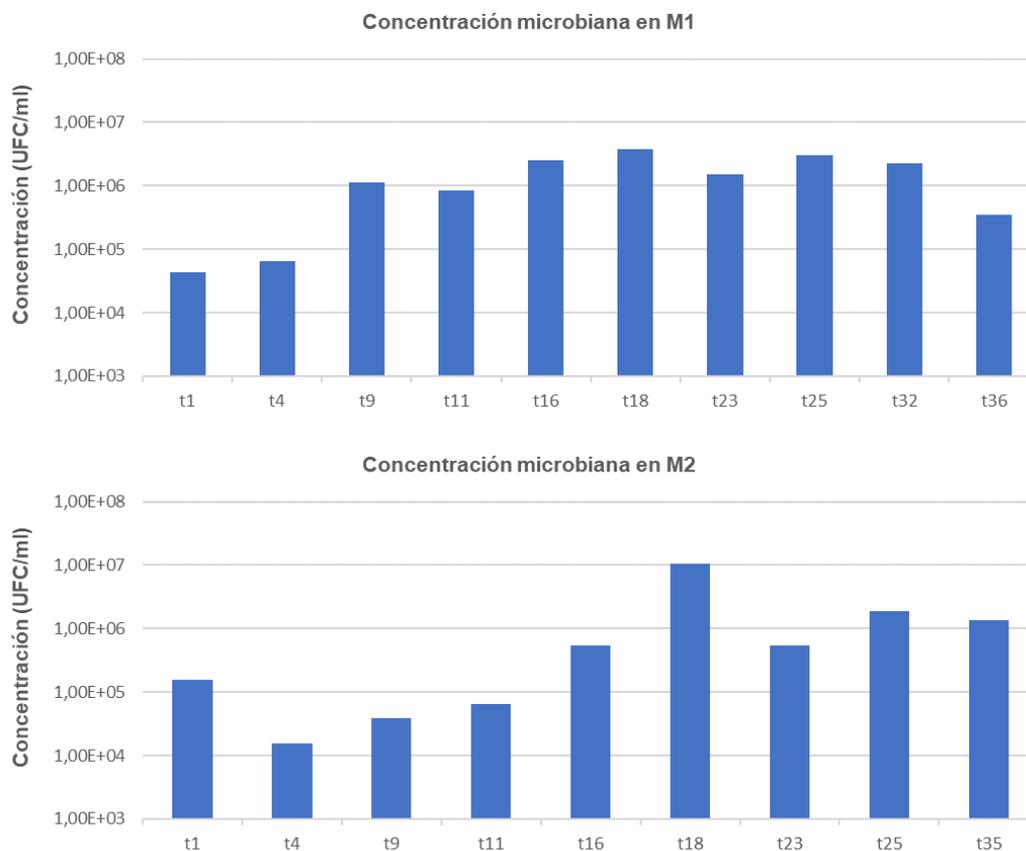
Resultados

Los resultados de las siembras microbiológicas de las muestras M1 y M2, conservadas en nevera a 4°C durante varias semanas, parecieron apuntar que, en un periodo de tiempo corto, las comunidades microbianas de las muestras son capaces de proliferar en la nevera utilizando como nutrientes la composición de la misma muestra.

El día de toma de muestra (t1), la concentración microbiana era menor de 10^5 UFC/ml en la muestra M1 y sobre los 10^5 UFC/ml en la muestra M2. Pasados 10 días, la concentración microbiana había aumentado hasta 10^6 UFC/ml en M1, y en M2 parecía haber descendido levemente. No obstante, tras 20 días, en M1 la concentración microbiana había aumentado ligeramente (menos de un orden de magnitud) y en M2 se vio un aumento de casi dos órdenes de magnitud, llegando a ver concentraciones de 10^7 UFC/ml.

En general, la actividad microbiana mostró una tendencia ascendente en ambas muestras hasta los 18 días en ambas muestras, como se refleja en las siguientes figuras.

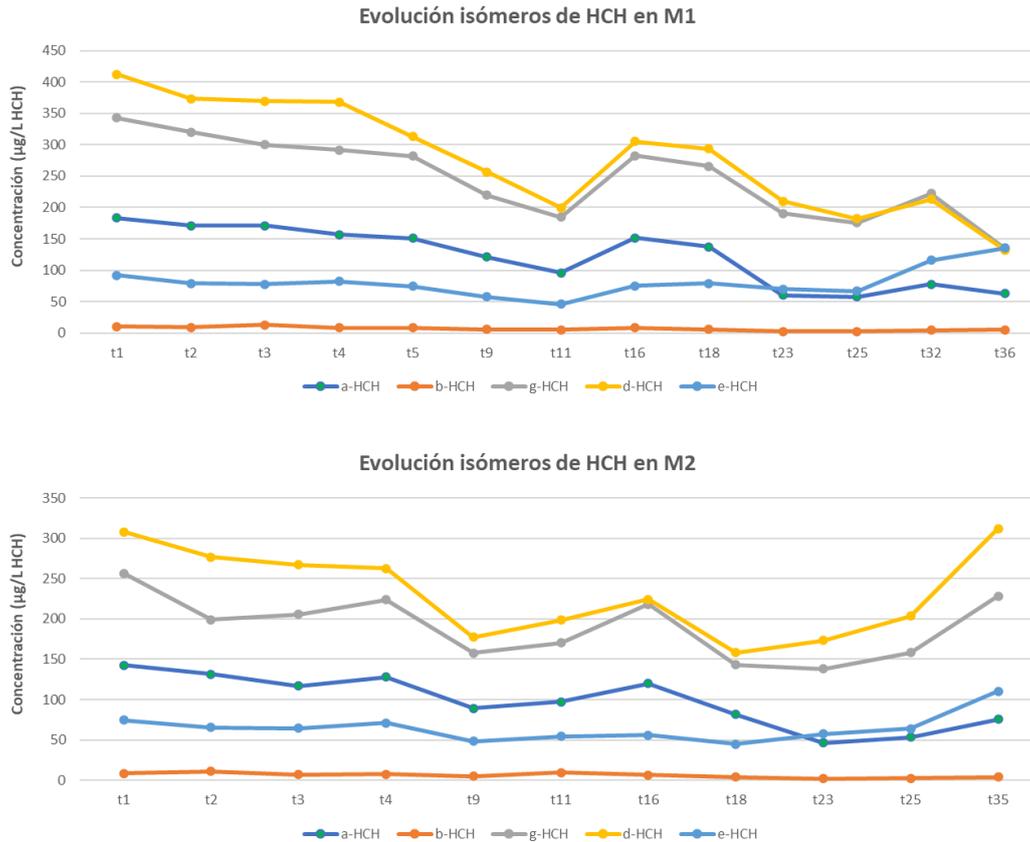
Gráfica 52. Evolución de la concentración microbiana en las muestras M1 y M2



Pasadas las cuatro semanas de la prueba, la concentración de microorganismos, aunque descendió ligeramente, no llegó a desaparecer, por lo que parece viable utilizar una misma muestra conservada en la nevera para realizar diferentes ensayos consecutivos que sirvan para comparar en condiciones de partida microbiológicas similares.

En la figura a continuación se muestra la variabilidad en la concentración de los diferentes isómeros de HCH a lo largo de la prueba.

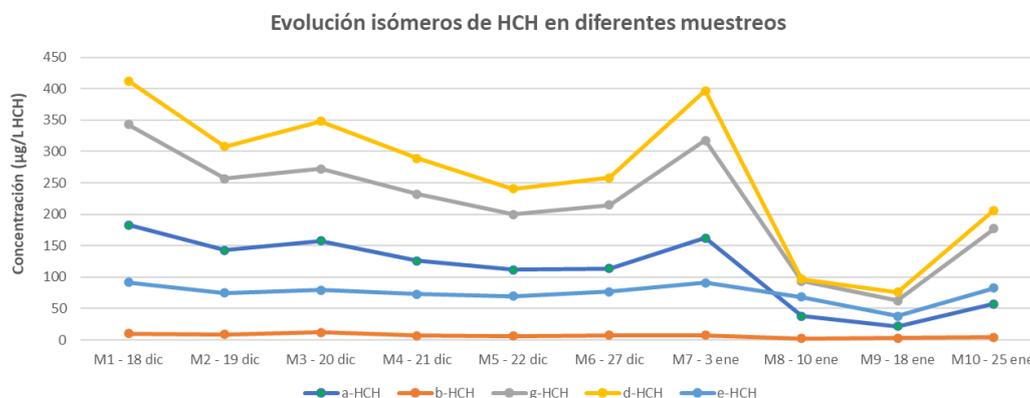
Gráfica 53. Evolución de las concentraciones de los isómeros de HCH en M1 y M2



En función de la evolución de los principales contaminantes, se detectaron variaciones en las concentraciones de a lo largo del mes que se ha guardado la muestra refrigerada. En M1 se registró una tendencia descendente más marcada cuanto mayor es la concentración inicial y el potencial de biodegradación del isómero, con aumentos puntuales. En M2, la concentración inicial y final fue similar, detectándose variaciones a lo largo de la prueba, más marcadas cuanto mayor concentración inicial.

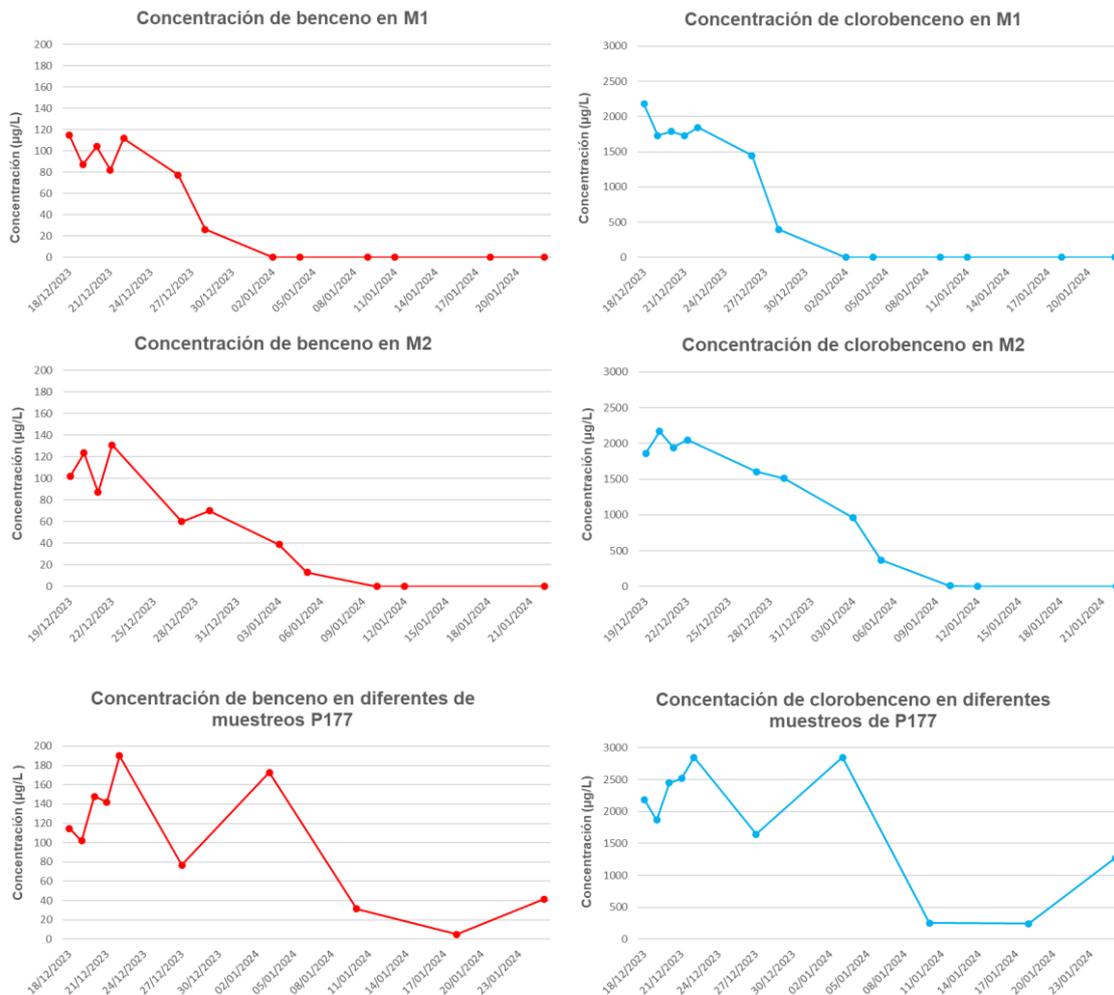
Las concentraciones de las muestras tomadas en el propio sondeo a diferentes tiempos mostraron una evolución similar a la registrada en M2, aunque con una diferencia algo mayor entre las concentraciones máximas y mínimas analizadas a lo largo de la prueba.

Gráfica 54. Evolución de las concentraciones de los isómeros de HCH en diferentes muestreos de P177



Respecto a la evolución de los compuestos más volátiles, como el benceno y el clorobenceno, se registró un claro decrecimiento en las muestras M1 y M2 debido al espacio de cabeza que se iba formando en los recipientes de almacenamiento tras los eventos de muestreo para el análisis. En el caso de las muestras en el propio sondeo, también se registraron variaciones significativas a lo largo de la prueba.

Gráfica 55. Evolución de las concentraciones de benceno y clorobenceno en la prueba de viabilidad y en la prueba de variabilidad



A la vista de los resultados, de acuerdo a la variación tan significativa que se produce en las concentraciones de los principales contaminantes en muestras tomadas en días diferentes en un mismo sondeo, ya que están sujetas a múltiples parámetros difíciles de predecir y/o controlar (presencia de restos de reactivos, presencia de finos y/o material particulado al que se pueden adherir los contaminantes, presencia de gotículas de DNAPL, influencia de la infiltración de la precipitación, variación de las condiciones físico-químicas, la propia variabilidad del método de análisis, etc.), y habiendo demostrado que la actividad microbiana no se ve deteriorada con el almacenaje de la muestra en nevera durante varias semanas, se decidió que para los siguientes ensayos aeróbicos en el biorreactor de laboratorio se tomaría una muestra de al menos 5 l para utilizar en las distintas fases del ensayo, llevando a cabo un muestreo previo a cada una de condiciones iniciales.

8.1.3 Ensayos aeróbicos en el biorreactor de laboratorio

Los ensayos aeróbicos en el miniBio se desarrollaron los meses de enero y febrero de 2024. El objetivo principal era mejorar el rendimiento en la degradación biológica del HCH, optimizando la disponibilidad de nutrientes.

Metodología

El ensayo se dividió en cuatro fases:

1. Control biótico en agua del sondeo P177.
2. Agua del sondeo P177 con ajuste de fósforo utilizando fosfato diamónico.
3. Agua del sondeo P177 con ajuste de fósforo, nitrógeno y carbono, utilizando fosfato diamónico, urea y glucosa, sin entrada de aire.

4. Agua del sondeo P177 con ajuste de fósforo, nitrógeno y carbono, utilizando fosfato diamónico, urea y glucosa, con entrada de aire.

El día 29 de enero de 2024 se tomó una muestra del sondeo P177 con una botella previamente esterilizada en autoclave, con una capacidad de 5 l para los 4 ensayos. De ese volumen, se tomó una submuestra para analizar los principales contaminantes, el carbono orgánico total (TOC), el nitrógeno total (TN) y el fosfato.

Los resultados obtenidos fueron de TOC 2,8 mg/l, TN 0,62 mg/l y fosfato <0,1 mg/l (relación 100:22:0). Con estos resultados, se calculó la dosificación necesaria para los ensayos 2 a 4. En la tabla a continuación se resumen las dosificaciones de nutrientes empleadas y las relaciones de C:N:P ajustadas. En el caso del ensayo 1 no se agregó ningún aditivo, ya que se ensayó un control biótico.

Tabla 52. Dosificaciones para los ensayos aeróbicos del MiniBio

Ensayo	Relación C:N:P	Nutriente
1	100:22:0	-
2	100:23:1	0,12 mg de fosfato diamónico
3 y 4*	100:10:1	725 mg de glucosa 56 mg de urea 12 mg de fosfato diamónico

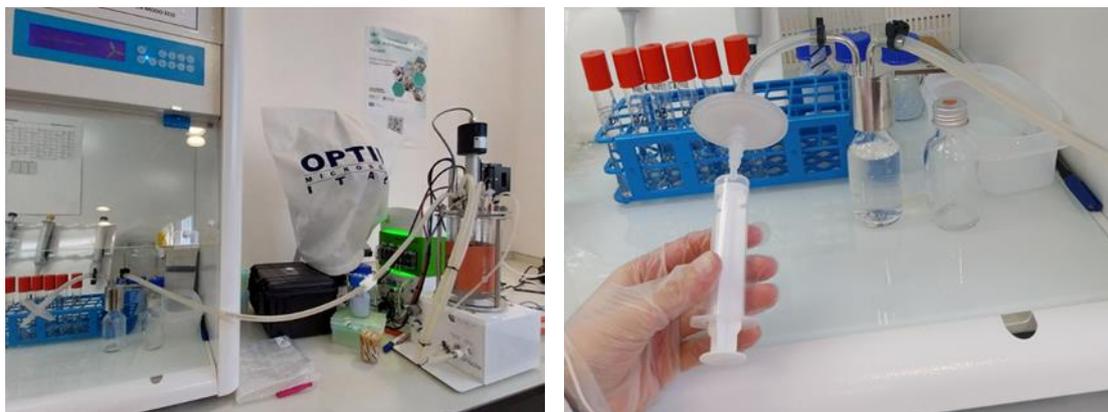
Nota: Ensayo 4* repetición del ensayo 3 con entrada de aire

Para los ensayos, se intentó alcanzar una concentración de oxígeno del 50% mediante agitación, sin entrada de aire. En el caso de la condición del ensayo 3 (con glucosa), la agitación no pareció ser suficiente y en uno de los muestreos de control intermedio se detectó cierto olor a azufre y ennegrecimiento, lo cual pudo deberse a que la condición se tornó a anaeróbica, hecho que ya había ocurrido en ensayos previos efectuados en 2023 en Erlenmeyer. Por ese motivo, para evitar la falta de oxígeno, se decidió repetir el ensayo 3 con entrada de aire (ensayo 4).

Todos los ensayos aeróbicos duraron 8 días y antes de comenzar cada ensayo se tomó una muestra inicial para analizar las posibles variaciones en la concentración microbiológica y de contaminantes. Los muestreos de control se efectuaron a los 4 y 8 días con el tomamuestras del biorreactor, para no contaminar la muestra y poder preservar las condiciones de esterilidad. El muestreo inicial, en el caso de los ensayos 2, 3 y 4 con aditivos, se efectuó antes de añadirlos.

Para todas las muestras se analizaron los contaminantes en el laboratorio de Pirenarium y se realizaron siembras en medio mínimo (MM), con Bushnell Haas Agar y una dilución de los contaminantes del emplazamiento, y medio genérico (MG), con Plate Count Agar.

Figura 47. Procedimiento para la toma de muestras en los ensayos aeróbicos en el MiniBio

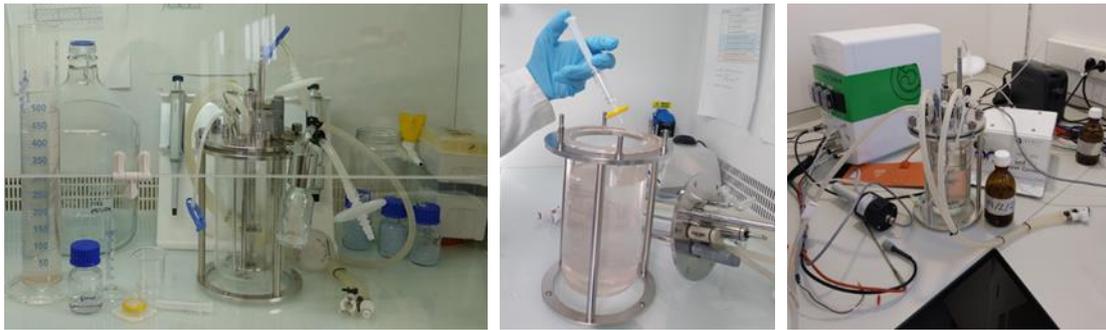


En todos los ensayos se llevó a cabo el mismo procedimiento:

- Calibración de la sonda de pH del MiniBio.
- Esterilización del MiniBio mediante autoclave, con el mismo vacío, las salidas cerradas y pinzas en los tubos.
- Introducción en campana del MiniBio autoclavado, adición de 1 l de la muestra de agua de P177 y toma de muestra inicial.

- En los ensayos 2, 3 y 4, con aditivos, preparación de la solución y adición de la dosificación para el ajuste de nutrientes en la campana, pasando la dilución por un filtro con jeringa para evitar contaminación cruzada y mantener condiciones de esterilidad.
- Inicio del ensayo. Colocación del MiniBio en su soporte, monitorización del proceso mediante el software para controlar los parámetros del sistema y el programa Luculus del ordenador para el registro de datos.
- Para los ensayos 1, 2 y 3, establecimiento de una temperatura de 25° C, un porcentaje de oxígeno disuelto del 50% y una agitación de 600 rpm para evitar la ruptura de microorganismos y mantener una eficiencia del condensador del 100%. Monitorización del resto de parámetros. En el caso del ensayo 4, con entrada de aire y agitación a 100 rpm.

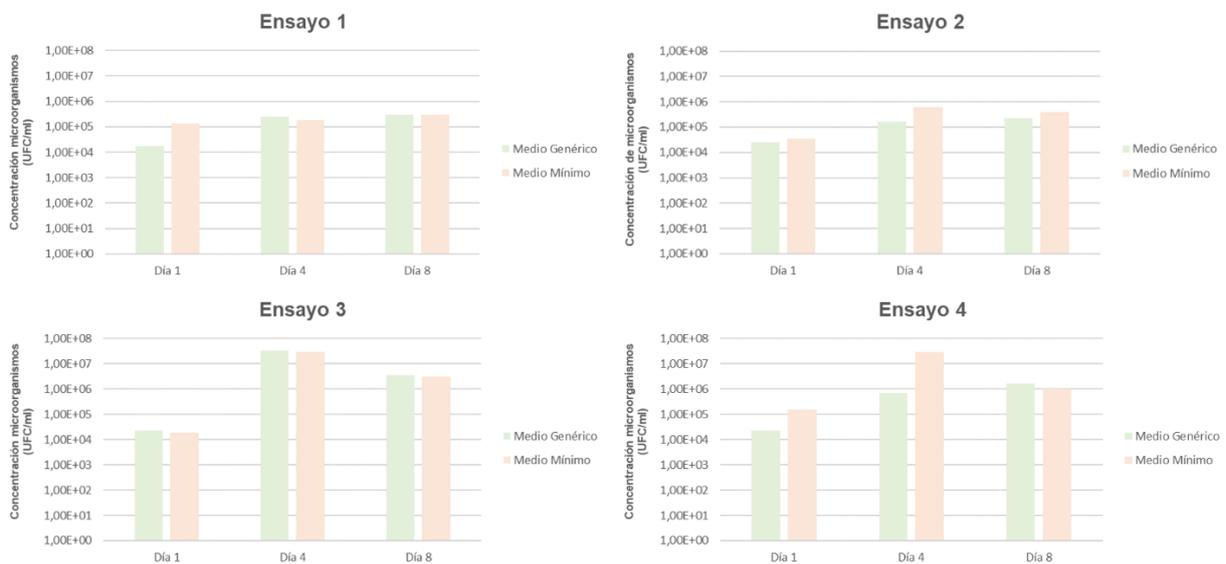
Figura 48. Trabajos de preparación de los ensayos aeróbicos del MiniBio



Resultados

Los resultados de las siembras microbiológicas realizadas en el laboratorio de Bailín durante los diferentes ensayos se exponen en siguiente figura.

Figura 49. Evolución de las concentraciones microbiológicas en los diferentes ensayos



Como se puede observar, en la condición del control biótico (ensayo 1) las concentraciones de microorganismos se mantuvieron entre 10⁴ y 10⁵ UFC/ml durante todo el ensayo.

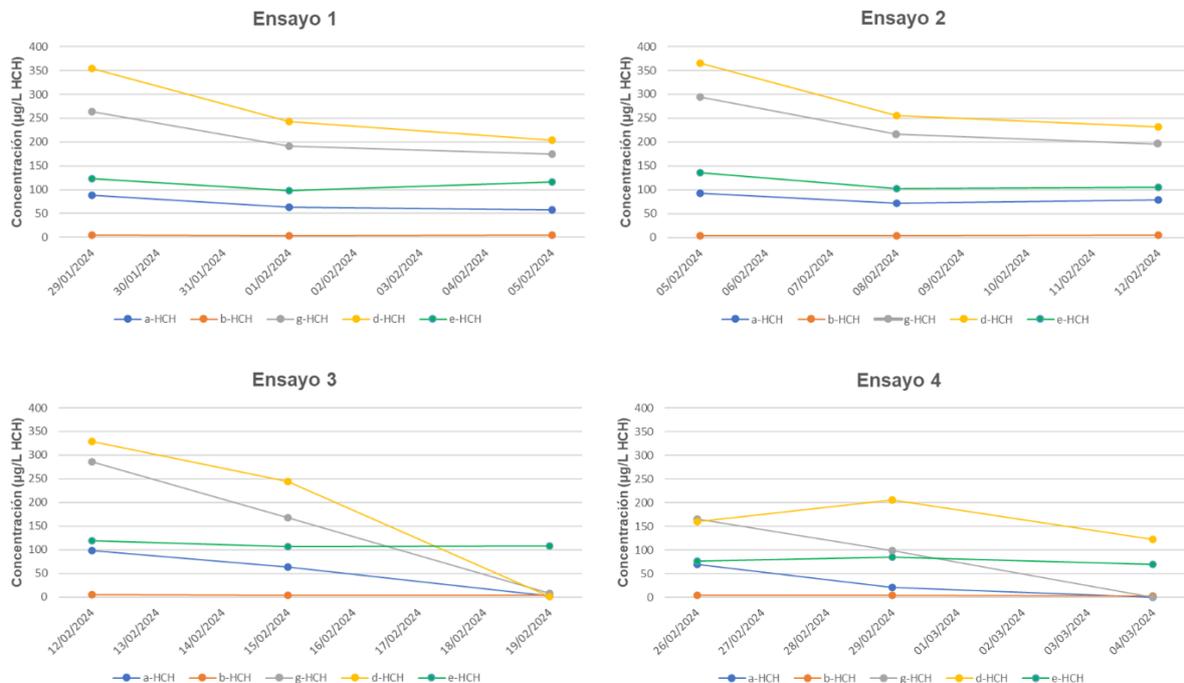
En el ensayo 2 (ajuste de nitrógeno y fósforo), las concentraciones de microorganismos fueron ligeramente más altas que en el control biótico, pero no llegaron a 10⁶ UFC/ml, por lo que podría no haber sido suficiente el ajuste de los dos nutrientes para mejorar la actividad microbiana en este tipo de ensayos.

Por último, como se había visto en los experimentos en Erlenmeyer anteriores a esta etapa, las condiciones con ajuste de los tres nutrientes principales (carbono, nitrógeno y fósforo), como en los ensayos 3 y 4, presentaron un aumento significativo de la actividad microbiana, pasando de 10⁴ UFC/ml a 10⁷ UFC/ml en solo 4 días. Tras 8 días, la actividad microbiana volvió a caer un orden de magnitud, posiblemente por agotamiento de algún nutriente.

Cabe destacar que, generalmente, en todos los muestreos la actividad microbiana fue similar tanto en medio genérico como en medio mínimo, lo cual refleja que los microorganismos del acuífero de Bailín están muy especializados en el medio en el que se encuentran.

En la figura a continuación se exponen los resultados de la evolución de los isómeros de HCH. No se muestra la evolución de los compuestos volátiles debido a que en este tipo de ensayos es difícil discernir si la reducción de estos se debe a la actividad microbiana o a la volatilización, ya que, compuestos como el benceno, clorobenceno, fenoles, y clorofenoles han presentado concentraciones nulas desde el primer muestreo intermedio.

Figura 50. Evolución de las concentraciones de los isómeros de HCH en los diferentes ensayos



Como se puede observar, todas las condiciones ensayadas presentaron una disminución en la concentración de algunos de los isómeros del HCH desde el día 4.

En el caso de los ensayos 3 y 4, en los cuales se había añadido glucosa además de urea y fosfato diamónico, se llegó a concentraciones menores que los ensayos 1 (control biótico) y 2 (adición de fosfato diamónico). No obstante, las concentraciones iniciales de HCH fueron muy bajas.

En el ensayo 3, en el cual se observó la mayor disminución de las concentraciones de los isómeros biodegradables (alfa, gamma y delta), éstos disminuyeron un 100%; y de forma similar en el ensayo 4 para los isómeros alfa y gamma.

Del mismo modo, el hecho de que las concentraciones de los isómeros biodegradables hayan finalizado por debajo de los no biodegradables (beta y épsilon), parece demostrar la existencia de procesos biodegradativos, circunstancia que se ha ido analizando en los siguientes ensayos realizados.

En vista de los resultados microbiológicos y de la evolución de las concentraciones de contaminantes obtenidos en los ensayos aeróbicos de biorreactor de laboratorio, parece corroborarse la hipótesis de los ensayos en Erlenmeyer, siendo la mejor enmienda a aplicar para estimular el crecimiento de los microorganismos y la biodegradación de los compuestos la mezcla de los tres compuestos estudiada en los ensayos 3 y 4: glucosa, fosfato diamónico y urea.

Por otro lado, cabe destacar que durante los ensayos se detectó un problema con la sonda de oxígeno, la cual regula la entrada de aire según el valor registrado. De este modo, es posible que se hubiera obtenido un mejor rendimiento microbiano y de disminución de contaminantes si la sonda hubiera funcionado correctamente, ya que se habrían asegurado las condiciones aeróbicas en todo momento.

8.1.4 Ensayos anaeróbicos en el biorreactor de laboratorio

Los ensayos anaeróbicos en el miniBio de laboratorio se desarrollaron entre los meses de marzo y agosto de 2024. El objetivo principal de los ensayos era probar diferentes compuestos dadores de electrones para compararlos en cuanto a estimulación de la actividad microbiana y degradación de contaminantes.

Metodología

En un inicio, se planteó desarrollar 4 ensayos en condiciones anaeróbicas: uno para el control biótico y otro por cada dador de electrones a probar (lactato sódico, ABCOLé y HRC). No obstante, conforme se fueron desarrollando los ensayos, aparecieron diferentes limitantes, por los que se decidió repetir alguno de ellos:

- El ensayo con lactato sódico se repitió debido a que la muestra utilizada en un inicio tenía una carga contaminante demasiado baja.
- El ensayo con ABCOLé se repitió ya que los resultados analíticos de la muestra del tiempo final reflejaban un aumento de las concentraciones de contaminantes incoherente.
- El ensayo con adición de HRC se repitió debido a que durante unos días se paró la inyección de nitrógeno, por lo que tuvo que finalizarse antes de tiempo.

De este modo, los ensayos anaeróbicos realizados fueron los siguientes:

1. Control biótico anaeróbico (con agua de P186).
2. Adición de lactato sódico 20% (con agua de P186).
3. Repetición del ensayo 2; adición de lactato sódico 20% (con agua de P179N).
4. Adición de ABCOLé (con agua de P179N).
5. Adición de HRC (con agua de P179N).
6. Repetición del ensayo 9; adición HRC (con agua de P179N).
7. Repetición del ensayo 8; adición de ABCOLé (con agua de P179N).

Para estos ensayos, se pretendía utilizar agua del sondeo P186 (donde se había desarrollado el ensayo anaeróbico de campo ISBR), pero se observó que las concentraciones contaminantes de la muestra eran demasiado bajas, por lo que se decidió emplear agua del sondeo P179N, el cual se había utilizado como punto de observación de dicho ensayo.

Como los procesos anaeróbicos son más lentos que los aeróbicos, cada uno de los ensayos se programó con una duración de 15 días, realizando 3 muestreos de control: uno el día 1 (t1), otro el día 8 (t8) y otro el día 15 (t15). En dichos muestreos se analizaron los principales contaminantes en el laboratorio de Pirenarium y la actividad microbiana mediante siembras microbiológicas en condiciones anaeróbicas en el laboratorio de Bailín.

Las siembras se efectuaron en un medio genérico (Plate Count Agar), donde crecen generalmente la gran mayoría de microorganismos, y en un medio mínimo (Bushnell Haas Agar con una dilución de los contaminantes del acuífero de Bailín), en el cual solo son capaces de crecer los microorganismos más especializados. El muestreo t1 se realizó antes de la adición de los dadores de electrones.

Figura 51. Configuración de los ensayos anaeróbicos en el MiniBio



En todos los ensayos anaeróbicos el procedimiento ha sido el siguiente:

- Toma de muestras mediante bomba *bladder* en recipiente esterilizado.
- Calibración de la sonda de pH del MiniBio.
- Esterilización del MiniBio mediante autoclave; vacío, con las salidas cerradas y pinzas en los tubos.
- Introducción del MiniBio autoclavado en la campana de flujo laminar y adición de 1-1,2 l de la muestra de agua.
- Toma de 250 ml de muestra para analizar contaminantes en el laboratorio de Pirenarium, y toma de 1 ml de muestra a un tubo de MRD (*Maximum Recovery Diluent*) para la siembra microbiológica posterior.
- Preparación de la solución con la masa necesaria de cada compuesto (lactato sódico, ABCOIé o HRC) y adición de la dosificación requerida previamente calculada; todo ello en campana, pasando la dilución por un filtro con jeringa para evitar contaminación cruzada y mantener la esterilidad.
- Inicio del ensayo. Colocación del MiniBio en su soporte, inyección de nitrógeno hasta que el valor de oxígeno disuelto no pueda bajar más, y en ese momento, calibración de la sonda de oxígeno disuelto. Monitorización del proceso mediante el software para controlar los parámetros del sistema y el programa Luculus del ordenador para el registro de datos. Establecimiento de una temperatura de 25 °C, porcentaje de oxígeno disuelto del 0 %, sin agitación para evitar la oxigenación, y una eficiencia del condensador del 100%.

Figura 52. Siembras microbiológicas en medio anaeróbico realizadas en los ensayos



Resultados

Como ya se ha comentado, se detectaron diferentes problemas que comprometieron los resultados de los primeros ensayos realizados con lactato sódico, ABCOIé y HRC. El control biótico se desarrolló sin problemas, aunque al realizarse con agua del sondeo P186 las concentraciones contaminantes fueron inferiores al resto de ensayos.

En el ensayo desarrollado con lactato sódico, la muestra utilizada (agua de P186) presentó concentraciones contaminantes muy bajas, lo cual dificultó el estudio del comportamiento de los contaminantes, además de observarse aumentos de concentración en muestreos intermedios, que podían deberse a la variabilidad analítica relacionada con la sensibilidad de los métodos de análisis del laboratorio. Por ello, se decidió emplear una nueva muestra para los ensayos, seleccionándose el sondeo P179N por su empleo como punto de observación en el ensayo en campo de ISBR.

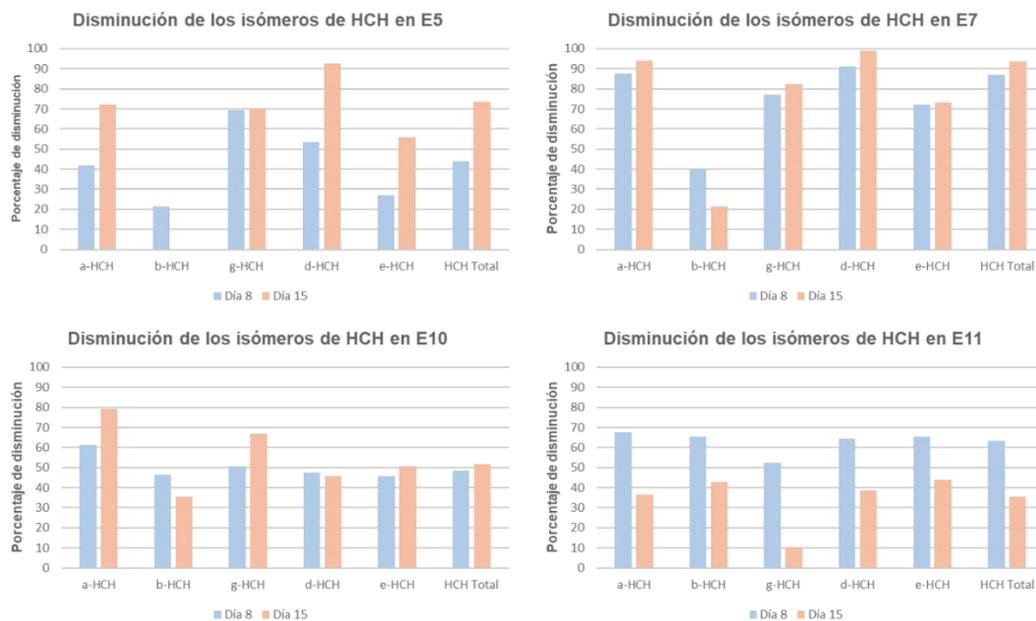
En el ensayo con ABCOIé, se detectó un aumento de la concentración de contaminantes entre los días 8 y 15 de ensayo, comprometiendo los resultados a 15 días. Aunque el ensayo se repitió posteriormente, se volvieron a suceder los mismos resultados, sin obtenerse una conclusión clara a este suceso.

Por último, el ensayo de HRC se repitió debido a que inicialmente no se pudieron mantener las condiciones anaeróbicas. Tras investigar la situación, se llegó a la conclusión de que la sensibilidad de la sonda de oxígeno hacía que variara el valor, lo que ocasionaba que se inyectase nitrógeno constantemente. El problema se solucionó fijando el valor de oxígeno disuelto en 1,2%, lo que permitía mantener las condiciones anaeróbicas sin desperdiciar nitrógeno.

Sin embargo, también se detectó durante el ensayo que en las muestras sembradas con HRC desaparecía la actividad microbiana. Cuando se repitió el ensayo, se sembró la muestra antes del tratamiento con HRC y después, en condiciones aeróbicas y anaeróbicas. En las placas sembradas antes del tratamiento aparecieron microorganismos mientras que tras el tratamiento y en todos los muestreos del ensayo volvían a desaparecer. Esta circunstancia se considera un impedimento para el uso de este producto en este tipo de tratamientos.

En las siguientes figuras se exponen los resultados obtenidos en el control biótico y en la repetición de los ensayos con dadores de electrones, siendo E5 control biótico, E7 adición de lactato sódico al 20%, E10 adición de HRC y E11 adición de ABCOIé.

Gráfica 56. Resultados de disminución de los isómeros de HCH en los ensayos anaeróbicos



Como se puede observar en la anterior figura, en el caso del control biótico (E5) se detectó una disminución de los isómeros de HCH solo con el mantenimiento de condiciones anaeróbicas mediante inyección de nitrógeno, aunque las concentraciones de partida eran mucho menores que en el resto de ensayos.

En el ensayo con lactato sódico 20% (E7) se apreció una mayor disminución de los isómeros, siendo de más del 70% para el día 8 en todos los isómeros excepto beta, y casi del 100% a los 15 días para alfa y delta, estando por encima del 80% en gamma y por encima del 70% en épsilon.

El isómero beta parece ser el menos afectado en este proceso de biodegradación, al tratarse del isómero más recalcitrante, aunque el porcentaje de disminución del mismo es mayor que en el caso del control biótico. En los ensayos con ABCOIé y HRC, el isómero beta presentó un mayor porcentaje de disminución, de más del 60% y más del 45% respectivamente para el día 8 de ensayo.

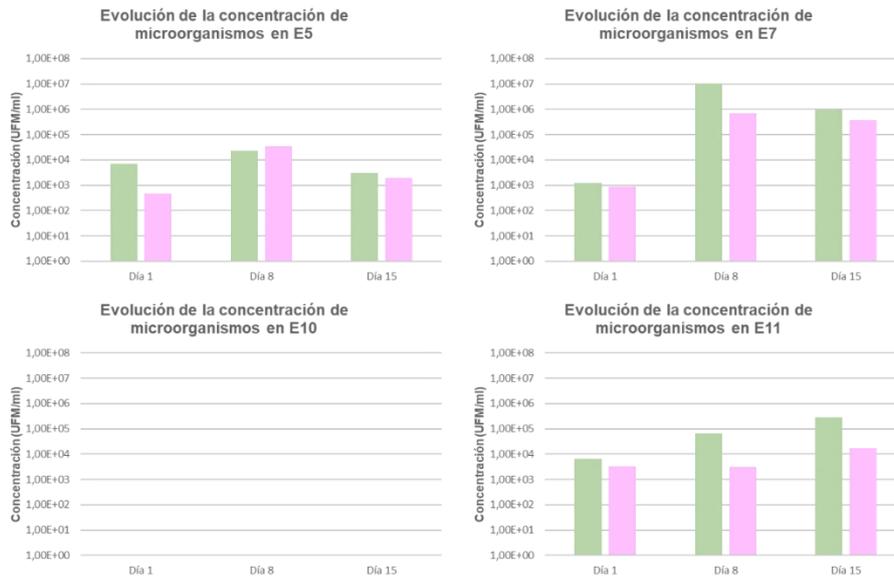
A pesar de que se observó cierta degradación de los contaminantes en el ensayo con HRC (E10), no se pudo afirmar que fuera debido a la actuación de la población microbiana, ya que no se pudo detectar actividad en ninguna de las siembras realizadas.

Atendiendo al gráfico del ensayo con ABCOIé (E11), hubo un repunte de la concentración de contaminantes, ya que los porcentajes de disminución fueron mayores en el día 8 que en el día 15.

Respecto a los resultados que se obtuvieron en los ensayos aeróbicos, cabe destacar que en todos los ensayos anaeróbicos aparece cierta degradación del isómero épsilon, en menor o mayor medida, destacando el caso de E7, que presentó un porcentaje de disminución de más del 70%, mientras que en los aeróbicos no se detectó esa disminución en ningún momento.

En las gráficas a continuación se presentan los resultados de evolución de las concentraciones microbiológicas a lo largo de los ensayos

Figura 53. Evolución de la concentración de microorganismos durante los ensayos anaeróbicos



La estimulación de la actividad microbiana sin la adición de dadores de electrones (E5) fue limitada. En cambio, en el caso de la aplicación de lactato sódico (E7) se observó un aumento de 4 órdenes de magnitud en medio genérico del día 1 al 8, detectándose hasta 10⁷ UFC/ml. En medio mínimo, la concentración aumentó 3 órdenes de magnitud, hasta alcanzar 10⁶ UFC/ml. Estas concentraciones parecen reflejar la eficacia de este tratamiento en cuanto la actividad microbiana.

La ligera disminución detectada en ambos casos siendo el último muestreo pudo deberse a que no hubo más aporte de lactato durante el ensayo.

En el ensayo con ABCOLé (E11) se pudo apreciar el aumento de un orden de magnitud en medio genérico entre los días 1 y 8, llegando a concentraciones de casi 10⁵ UFC/ml. Sin embargo, en medio mínimo no se observaron cambios. El día 15 se detectó un aumento de la concentración en medio genérico, superando el valor de 10⁵ UFC/ml, y en el caso del medio mínimo a 10⁴ UFC/ml.

A la vista de los resultados, el dador de electrones que parece más eficiente en la estimulación de actividad microbiana es el lactato sódico al 20%.

8.1.5 Ensayos de secuenciación aeróbico-anaeróbico

Atendiendo a los resultados observados en los ensayos anteriores, se planteó la realización de ensayos que alternaran las vías de degradación aeróbica y anaeróbica en el MiniBio, empleando muestras diferentes en función de la vía inicial. El objetivo de estos ensayos era fomentar la biodegradación de los diferentes isómeros de HCH, intentando mejorar la degradación de los más recalcitrantes, intentado encontrar la secuencia más idónea. Los trabajos se desarrollaron entre octubre de 2024 y enero de 2025.

Metodología

Para cada una de las partes de la secuencia, se emplearon las condiciones que mejor resultado mostraron en los ensayos realizados para cada una de las vías:

- Para la parte aeróbica, se realizó un ajuste de C:N:P para obtener una relación de 100:10:1 mediante la adición de fosfato diamónico, urea y glucosa con inyección de aire para mantener un porcentaje de oxígeno óptimo para el proceso.
- Para la parte anaeróbica, se utilizó nitrógeno para mantener las condiciones anaeróbicas y se adicionó lactato sódico al 20% como dador de electrones.

En ambos procesos, las concentraciones de cada enmienda se calcularon en base a los análisis de nutrientes sobre las muestras de agua.

A lo largo de cada ensayo, se fueron analizando las concentraciones de contaminantes y el crecimiento microbiano. Las diferentes etapas del ensayo de secuencia se describen a continuación.

1. Prueba inicial (anaeróbica/aeróbica): etapa de 15 días de duración, con 7 en condiciones anaeróbicas y 7 en condiciones anaeróbicas. El propósito de esta prueba era ajustar la metodología para los siguientes ensayos. Para ello se empleó una muestra de agua del sondeo P179N.
2. Secuencia 2 anaeróbica/aeróbica: con etapas variables según lo observado en la prueba inicial, con agua del sondeo P179N.
3. Secuencia 3 aeróbica/anaeróbica: con etapas variables según lo observado en la prueba inicial, con agua del sondeo P177.

Al inicio del ensayo, se tomó una muestra de 2 l de agua subterránea del sondeo (P179N para el ensayo 1 y 2, y P177 para el ensayo 3) en recipiente estéril.

Para iniciar la etapa anaeróbica se adicionó lactato sódico al 20%, tomándose una muestra inicial de *baseline*. De este volumen, 1,2 l se introdujeron en el MiniBio previamente autoclavado, y se inició la inyección de nitrógeno para conseguir un porcentaje de oxígeno menor de 1, fijándose valores de 25°C de temperatura y 100% de condensación.

Para iniciar la etapa aeróbica se indujeron las condiciones necesarias estableciendo un valor de 60% de oxígeno disuelto con entrada de aire, y se ajustó la relación C:N:P a 100:10:1, adicionando una solución de fosfato diamónico, urea y glucosa.

Figura 54. Trabajos de preparación de los ensayos de secuencia en el MiniBio en el laboratorio



Por otro lado, 250 ml de la muestra se destinaron al análisis de contaminantes en el laboratorio de Pirenarium, y, 1 ml se destinó a siembras en el laboratorio de microbiología de Bailín en medio mínimo (MM) con Bushnell Haas Agar y una dilución de los contaminantes del emplazamiento y medio genérico (MG) con Plate Count Agar. Ambos medios se sembraron en condiciones anaeróbicas y aeróbicas por separado.

La prueba inicial tuvo una duración de 15 días, 7 en condiciones anaeróbicas y 7 en condiciones anaeróbicas. Los días 1 (t0), 7 (t1) y 15 (t2) se realizaron los muestreos para siembra microbiológica y control de contaminantes.

Según los resultados obtenidos, se decidió que los ensayos 2 y 3 tuviesen 24 días de duración, ensayando 17 días en condiciones anaeróbicas y 7 días en condiciones aeróbicas, independientemente del orden, con 4 muestreos de control los días 1 (t0), 8 (t1), 17(t2) y 24 (t3) de ensayo para siembra microbiológica y análisis de contaminantes.

Resultados

A continuación, se expone la correspondencia de los ensayos de secuenciación aeróbico-anaeróbico realizados junto con los ensayos base aeróbico y anaeróbicos en los que se basan. Estos ensayos base son aquellos identificados con mejor desempeño aeróbico y anaeróbico y servirán a modo de referencia y comparación en el análisis de resultados.

Tabla 53. Ensayos de secuencia y correspondencia con los ensayos anteriores realizados

Ensayo	Correspondencia
P177 + Ajuste CNP (glucosa, urea y DAP) (aeróbica)	E4
P179N + Lactato sódico 20% (anaeróbica)	E7
P179N + Lactato sódico 20% (anaeróbica) + Ajuste CNP (aeróbica)	Secuencia inicial
P179N + Lactato sódico 20% (anaeróbica) + Ajuste CNP (aeróbica)	Secuencia 2
P177 + Ajuste CNP (aeróbica) + Lactato sódico 20% (anaeróbica)	Secuencia 3

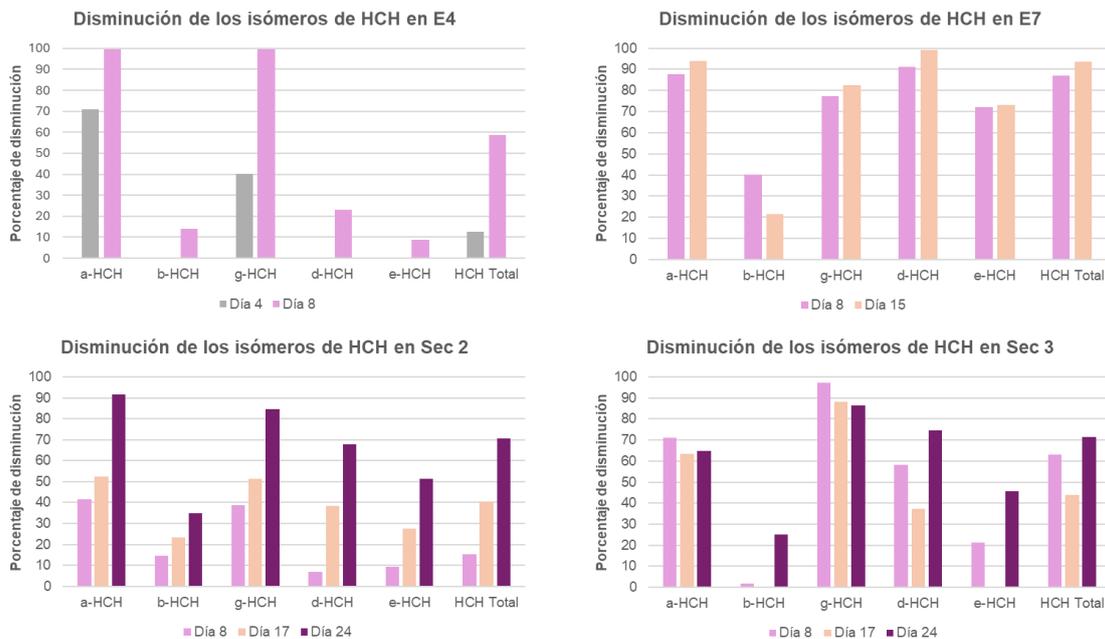
Cabe destacar que las muestras iniciales de E7 y Secuencia 2 tuvieron una mayor carga contaminante inicial (4.049 y 7.811 µg/l de HCH total respectivamente) que las de E4 y Secuencia 3 (474 y 316 µg/l de HCH total respectivamente). Por ello, la comparación de sus resultados no es del todo equitativa y se ha realizado con cautela.

Por otro lado, en los cuatro ensayos la concentración inicial de beta-HCH fue muy baja (entre 1 y 27 µg/l), por lo que la evolución de dicho isómero fue difícil de estudiar.

También hay que tener en cuenta que los tiempos de muestreo y de duración total de los ensayos varía de uno a otro, según se trata de condiciones aeróbicas o anaeróbicas.

En la siguiente gráfica se exponen los resultados de la evolución de los isómeros de HCH en los cuatro ensayos efectuados.

Gráfica 57. Evolución de los isómeros de HCH en los ensayos E4, E7, Secuencia 2 y Secuencia 3



Respecto a la evolución observada en la evolución de los isómeros de HCH en cada ensayo se apreció lo siguiente:

- La concentración de los isómeros beta y épsilon sufrió un aumento en E4 y Secuencia 3, y de delta-HCH en E4. que podría deberse a la incertidumbre analítica.
- En el caso de E4 (aeróbico) la degradación de alfa y gamma el día 8 fue del 100%. En cambio, los isómeros beta, delta y épsilon sufrieron un porcentaje de degradación menor del 22%, aunque la baja concentración de los isómeros desde el inicio del ensayo dificultó el seguimiento de su evolución. El porcentaje de degradación final de HCH total fue de menor del 60%.
- Los resultados de degradación fueron mejores en la condición anaeróbica (E7), donde el porcentaje de disminución de todos los isómeros (excepto beta) a día 8 de ensayo estuvo por encima del 70%, alcanzando en el caso de alfa y delta valores cercanos al 90%.

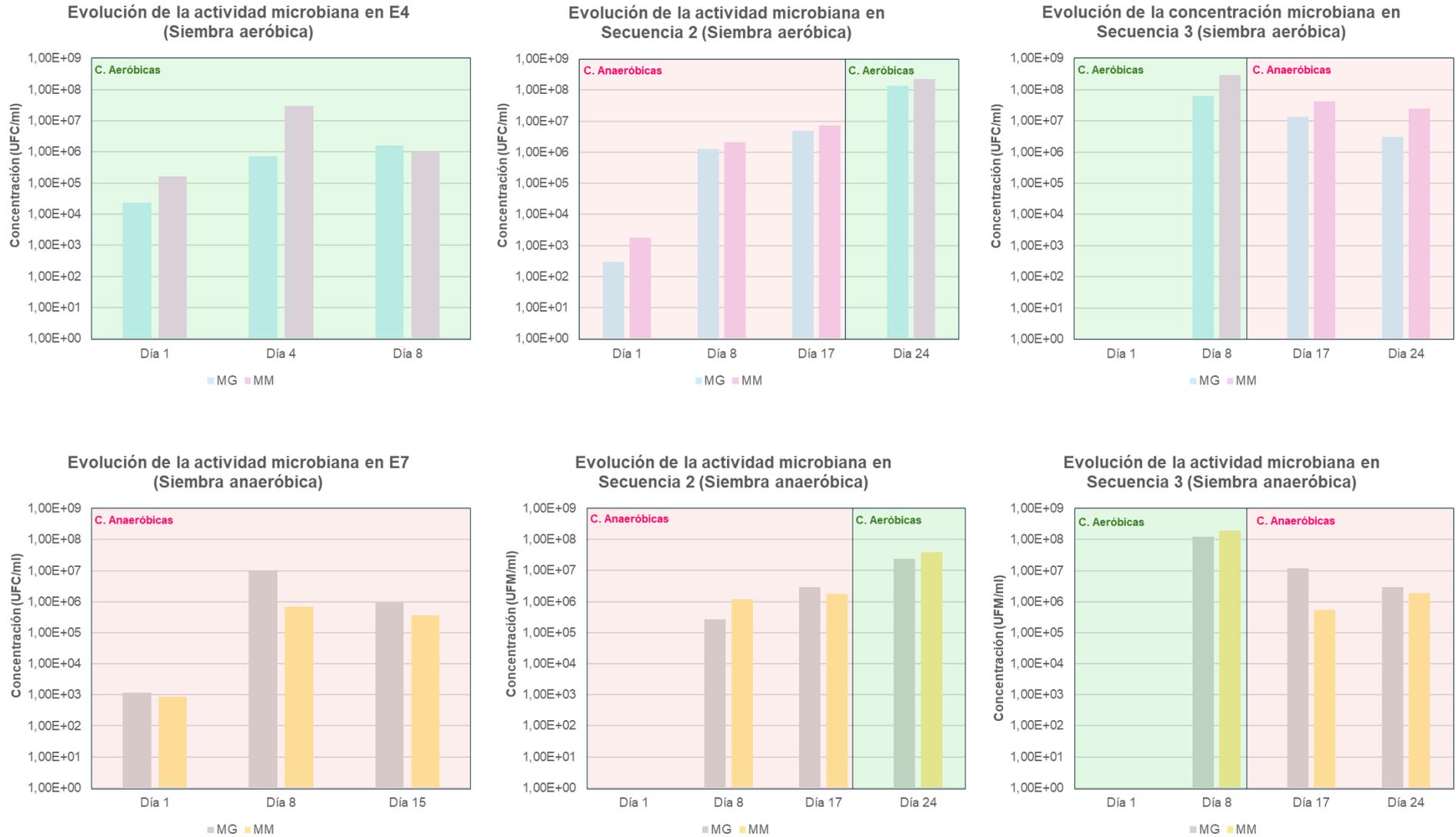
Cabe destacar el alto porcentaje de degradación de épsilon en condiciones anaeróbicas. Este isómero es, junto a beta, el más recalcitrante y difícil de degradar, por lo que el hecho de alcanzar un valor del 70% es muy positivo, y no se había visto en condiciones aeróbicas. Finalmente, se obtuvo alrededor de un 90% de degradación de HCH total tanto a día 8 como el día 15 de ensayo.

De este modo, respecto a la comparación de las secuencias con los resultados obtenidos en los ensayos individualmente por cada vía:

- La unión de fases aeróbica y anaeróbica, independientemente del orden, no supuso ningún beneficio extra.
- La secuencia 2 (anaeróbica hasta el día 17 y a partir de ahí, aeróbica) no presentó valores altos de degradación durante la fase anaeróbica. Tras el cambio a condiciones aeróbicas, el día 24 se observó un aumento de la degradación de los isómeros, de alrededor del 90% en alfa y gamma, del 70% en delta, del 50% en épsilon y del 35% en beta. El resultado de degradación final de HCH total fue del 70%, inferior al 90% obtenido en E7 en condiciones anaeróbicas.
- En el caso de la secuencia 3 (aeróbica hasta el día 8 y a partir de ahí, anaeróbica) se observó un aumento de la degradación durante la fase aeróbica, con valores del 70% en el caso de alfa, casi 100% en gamma y alrededor del 60% en delta, aunque los valores de concentración iniciales fueron muy bajos, dificultando la comparación con el resto de los ensayos. El porcentaje final de degradación de HCH total fue de alrededor del 70%.

En la gráfica a continuación se muestra la evolución de la concentración de microorganismos en los ensayos. Debido a sus características, para las secuencias se realizaron siembras en condiciones aeróbicas y anaeróbicas.

Gráfica 58. Evolución de la concentración de microorganismos en los diferentes ensayos comparados en condiciones de siembra aeróbica y anaeróbica



Los resultados de concentración microbiológica fueron mejores en las dos secuencias, aunque podrían estar influenciadas por los valores de concentración de HCH iniciales, diferentes en los cuatro casos.

- Tanto en E4 como en E7, las concentraciones máximas se detectaron a la mitad del ensayo, alcanzando valores de 10^6 y 10^7 UFC/ml, no siendo excesivamente altos para este tipo de ensayos. Al finalizar los ensayos las concentraciones presentaron un pequeño descenso (10^6 UFC/ml en E4 y E7). Esto pudo deberse a que únicamente se añadieron los nutrientes al inicio del ensayo.
- En el caso de la secuencia 2, los valores más altos de concentración microbiana se obtuvieron en el último muestreo, coincidiendo con un aporte de solución CNP y cambio a condiciones aeróbicas. Se consiguieron valores de concentración microbiana mayores a 10^8 UFC/ml en las siembras aeróbicas y mayores a 10^7 UFC/ml en las siembras anaeróbicas, lo cual podría indicar que las bacterias cultivadas en dicho ensayo fueran anaeróbicas facultativas, hipótesis que ya se barajaba por resultados anteriores.
- Por su parte, la secuencia 3 alcanzó el pico de actividad microbiana en el primer muestreo (al igual que en la secuencia 2, coincidiendo con la inyección de solución CNP), y las concentraciones fueron muy similares en las siembras aeróbicas y anaeróbicas durante todo el ensayo. Los mejores valores obtenidos fueron de alrededor de 10^8 UFC/ml en ambos medios el día 8 de ensayo.

Conclusiones

La combinación de las fases aeróbica y anaeróbica no mostró mejores resultados de degradación de HCH que las mismas fases de forma independiente, obteniendo los mejores resultados en la condición anaeróbica E7 (con adición de lactato sódico 20%) con más del 90% de degradación del HCH total el día 15 de ensayo y valores de degradación altos en todos los isómeros (excepto beta). Ninguna de las secuencias consiguió valores tan altos de degradación aun habiendo tenido una duración mayor (24 días).

En cuanto a la actividad microbiana, se obtuvieron mejores resultados en las secuencias que en E4 y E7, alcanzando en los primeros valores de 10^8 UFC/ml, si bien estuvieron condicionados por la inyección de nutriente. En los casos de E4 y E7 se obtuvieron valores de concentración microbiana de un orden de magnitud menor (10^7 UFC/ml), aunque la duración de dichos ensayos fue menor al de las secuencias.

Debido también a la variabilidad de las concentraciones en las muestras iniciales, se plantearán próximos ensayos estandarizando la muestra de partida, repitiendo las mejores condiciones para poder comparar con un mayor grado de certidumbre.

8.1.6 Secuenciación masiva y aislamiento de ADN

En noviembre de 2024, se llevó a cabo un muestreo de agua subterránea para hacer un estudio de la diversidad de la población microbiana presente en diferentes zonas del emplazamiento, con diferentes condiciones físico-químicas y grados de contaminación, e intentar aislar microorganismos autóctonos, con el objetivo mejorar el conocimiento acerca del modelo conceptual microbiológico del acuífero y poder potenciar la bioaugmentación en futuras aplicaciones de biorremediación.

Las muestras fueron enviadas al laboratorio especializado en microbiología de GAIKER, en sus instalaciones de Zamudio, en País Vasco, para su estudio.

El muestreo se efectuó en 23 sondeos localizados por todo el emplazamiento, con diversas características físico-químicas. En algunos puntos se tomaron muestras a varias profundidades en función del nivel de agua y profundidad del sondeo. En la siguiente tabla se resumen los puntos de muestreo y sus características.

Tabla 54. Características de sondeos y profundidades muestreadas

Sondeo	Capa	Zona	Fondo (m)	Prof. muestreo (m)	Litología	DNAPL	Actuaciones y ensayos relevantes realizados en los sondeos
P87	M	Aguas arriba Vaso	72,7	34	Arenisca	No	-
				60	Lutita		
P168	Otras	Vaso Bco. Este	19,84	2	Lutita	No	-
				15	Arenisca		
P177	M	Vaso Bco. Este	32,1	3	Conglomerado	No	Inyección oxidantes (2022)
				15-20	Arenisca		
P179N	M	Vaso Bco. Oeste	26,6	18	Arenisca	No	Inyección oxidantes (2022)
				25	Arenisca		
P93	I	Zona 0	43,2	10	Lutita	Sí	-

Sondeo	Capa	Zona	Fondo (m)	Prof. muestreo (m)	Litología	DNAPL	Actuaciones y ensayos relevantes realizados en los sondeos
				30	Arenisca		
P171	M	Zona 0	47,2	20	Arenisca	Sí	-
				35	Arenisca		
P227	M	Zona 0	40,1	27	Arenisca	No	-
P86	O	Zona 0	30,72	6	Lutita	No	-
				20	Arenisca		
P81	M	Zona 0 a B3	40,96	22	Arenisca	Sí	-
				35	Arenisca		
P232	M	Zona 0 a B3	25,4	12	Arenisca	Sí	-
				23	Lutita		
P77	IU	Zona 0 a B3	19	15	Lutita	No	-
P54	M	Barranco 3	35,5	12	Arenisca	No	-
				25	Arenisca		
P79	M	Barranco 3	40,5	18	Lutita	No	Inyección oxidantes (2019-2020)
				35	Arenisca		
P132	O	Zona Barrera	60,8	28	Lutita	No	-
				40	Lutita		
I1S	M	Zona Barrera	39,9	28	Lutita	No	Biorreactor aeróbico ZB (2023-2024)
				35	Arenisca		
P120	IU	Zona Barrera	38,2	16	Lutita	No	-
				37	Lutita		
I4	Otras	Zona Barrera	44,8	30	Lutita	No	-
P98	Otras	Zona Barrera	38,3	27	Arenisca	No	Ensayo aireación (mayo 2019). Inyección oxidantes (2019-2020)
P143	M	Zona Barrera	56,25	38	Arenisca	No	Ensayo aireación (mayo 2019)
				35	Arenisca		Inyección oxidantes (junio 2019)
P106	M	Aguas abajo B4	55,8	22	Lutita	No	-
				40	Arenisca		
P222	M	Aguas abajo B4	38,75	37	Arenisca	No	Liberadores pasivos de oxígeno instalados (2024)
P142	M	Zona Descarga	50	16	Arenisca	No	Liberadores pasivos de oxígeno instalados (2024)
				40-45	Arenisca		
P126	M	Zona Descarga	8,5	4	Lutita	No	-

Durante la toma de las muestras se midieron los parámetros físicoquímicos in situ. Las muestras se tomaron por duplicado, llevándose una de ellas al laboratorio de Pirenarium donde se analizaron los principales contaminantes.

Figura 55. Trabajos de muestreo en el emplazamiento para el análisis de secuenciación de ADN



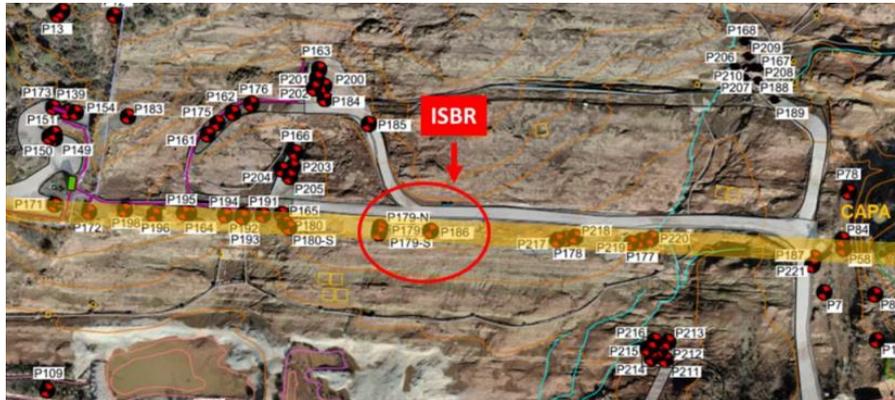
Los resultados de este ensayo se presentarán una vez se haya llevado a cabo el análisis, la interpretación e integración de todos los resultados; previsiblemente en el primer trimestre de 2025.

8.2 Ensayos piloto de biorremediación en campo

8.2.1 Biorreactor anaeróbico en campo (ISBR)

El día 28 de agosto de 2023 se instaló un sistema de biorremediación por vía anaeróbica (biorreactor *in situ*, ISBR, por sus siglas en inglés), en el sondeo del vaso P186, sobre la capa M, utilizando el sondeo próximo P179N como punto de observación. Este sistema estuvo en funcionamiento hasta febrero de 2024.

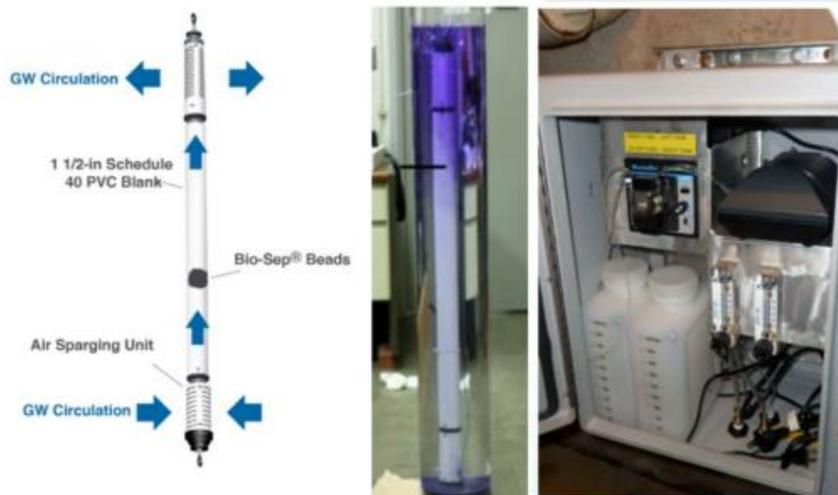
Figura 56. Ubicación del sondeo P186 para el ensayo ISBR



Objetivo y metodología

El objetivo del ensayo era intentar bioestimular el metabolismo microbiano por vía anaeróbica en esta zona del acuífero y favorecer la degradación de los contaminantes de interés. Para ello, se instaló un dispositivo que permitía inducir unas condiciones anaeróbicas controladas mediante la inyección de nitrógeno y lactato sódico al 20% como dador de electrones.

Figura 57. Esquema y fotografías del sistema ISBR



El funcionamiento del sistema se basa en que, una vez el dispositivo es introducido en el acuífero, el crecimiento de los microorganismos se va produciendo sobre unas celdas de carbón activo contenidas dentro del equipo que sirven como soporte para su proliferación. El agua del acuífero se recircula a través del interior del biorreactor y permite que los microorganismos activos migren y sean liberados al acuífero progresivamente.

Como último fin, si se consigue incentivar el crecimiento bacteriano y desarrollar una comunidad microbiana adaptada, el sistema podría ser reubicado en otro sondeo.

El sistema ISBR fue adquirido a la empresa *Microbial Insights*, un laboratorio especializado en microbiología aplicada al campo de la biorremediación, con una experiencia de más de 25 años y con la que se ha venido trabajando en los últimos años.

El ISBR estuvo en funcionamiento hasta el 6 de febrero de 2024, aunque, debido a problemas técnicos, el suministro de nitrógeno se cortó el día 9 de enero, por lo que el último mes el ensayo se estuvo realizando únicamente con inyección de lactato sódico.

Ejecución del ensayo

Antes de la instalación del sistema en el sondeo de ensayo, se llevaron a cabo trabajos asociados previos que incluyeron el desarrollo del sondeo, un muestreo de condiciones iniciales (*baseline*) en P186 y P179N, pruebas de funcionamiento del sistema y adaptación del cuadro de control.

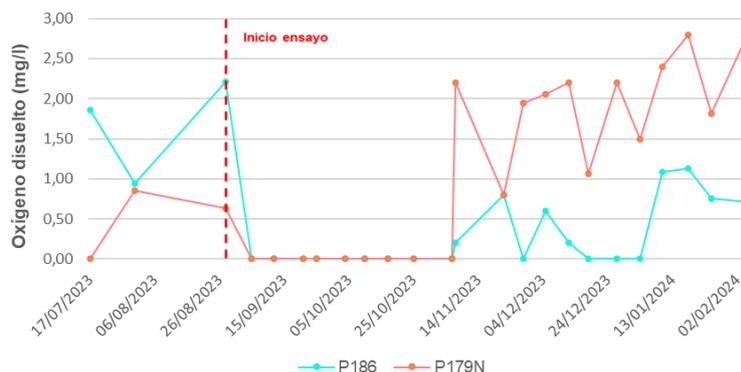
Figura 58. Trabajos previos asociados al ensayo ISBR



A lo largo del ensayo, se realizaron muestreos de control tanto en P186 (actuación) como en P179N (observación) para el análisis de parámetros físico-químicos, análisis de contaminantes en el laboratorio de Pirenarium, análisis de la actividad microbiana mediante siembras microbiológicas en condiciones anaeróbicas en el laboratorio de Bailín en medio genérico (MG) con Columbia Agar y Sheep Blood Plus, y medio mínimo (MM) formado por Bushnell Haas Agar (BHA) con una dilución de los contaminantes del acuífero, y análisis de genes funcionales en el laboratorio de *Microbial Insights*. Adicionalmente, al finalizar el ensayo se analizaron los genes funcionales en las celdas de carbón activo que permanecían en el dispositivo.

Cabe destacar que, en P186, entre el 7 de noviembre y el 12 de diciembre de 2023, así como a partir del 9 de enero de 2024, cuando dejó de suministrarse el nitrógeno en el sondeo, el oxígeno disuelto fue superior a 0 mg/l, por lo que no se pudo afirmar que se mantuvieran las condiciones anaeróbicas durante todo el ensayo.

Gráfica 59. Evolución de la concentración de oxígeno disuelto durante el ensayo



Evolución de la concentración de microorganismos

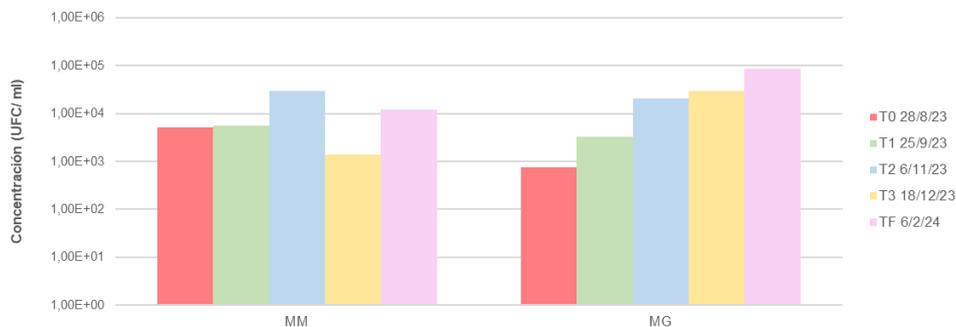
Tanto en P186 (actuación) como en P179N (observación) se llevaron a cabo siembras microbiológicas en medio genérico (MG) y medio mínimo (MM). Tras las siembras, las placas se colocaron en recipientes herméticos con un producto desplazador del oxígeno (Anaerogen) y un indicador de anaerobiosis, para asegurar las condiciones anaeróbicas.

Figura 59. Siembras microbiológicas realizadas en el ensayo ISBR

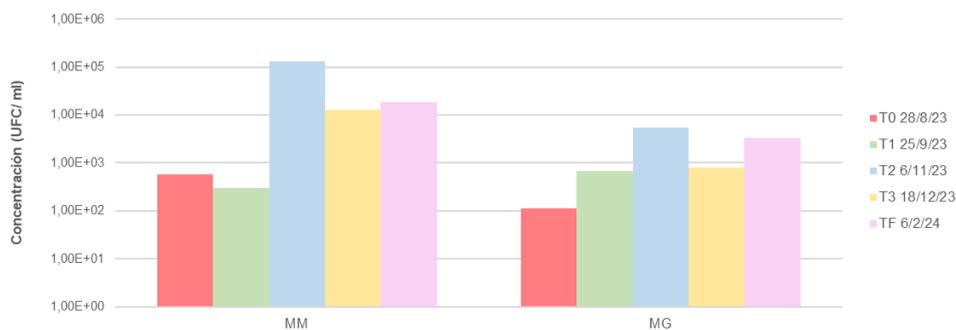


Los resultados de las siembras se muestran en las siguientes gráficas.

Gráfica 60. Evolución de las concentraciones de microorganismos durante el ensayo ISBR en P186



Gráfica 61. Evolución de las concentraciones de microorganismos durante el ensayo ISBR en P179N



Las concentraciones iniciales de microorganismos fueron bajas (10^3 UFC/ml en P186 y 10^2 UFC/ml en P179N, en medio genérico), y, en general, las concentraciones alcanzadas no fueron muy elevadas, teniendo en cuenta los resultados que se suelen obtener en tratamientos aeróbicos en el emplazamiento, si bien cabe destacar que los procesos anaeróbicos son más lentos que los aeróbicos.

En cualquier caso, se apreció una tendencia al aumento de la concentración de microorganismos, más clara en el sondeo P186 en medio genérico, con un aumento de dos órdenes de magnitud entre el inicio y el final del ensayo, pasando de algo menos de 10^3 UFC/ml a 10^5 UFC/ml.

En el caso del sondeo de observación P179N, en el medio genérico se observó un aumento de un orden de magnitud, pasando de 10^2 UFC/ml a 10^3 UFC/ml al final del ensayo.

En medio mínimo, se detectó un aumento de la concentración de casi un orden de magnitud en P186 (siendo mayor de 10^4 UFC/ml) y de dos órdenes en P179N (alcanzando valores de 10^5 UFC/ml) en el muestreo del día 6 de noviembre de 2023, aunque en los siguientes muestreos se obtuvieron concentraciones inferiores.

Esto podría deberse a que, durante los últimos días de noviembre, y algunos días de primeros de diciembre, se detectó algo de oxígeno disuelto en el agua del sondeo, lo que pudo interferir en el crecimiento de los microorganismos al alterarse las condiciones anaeróbicas.

No obstante, es positivo destacar que las concentraciones en medio genérico no fueron muy superiores a las del medio mínimo, y en el caso del sondeo P179N las del medio mínimo fueron incluso mayores. Esto parece apuntar a que los microorganismos parecen estar especializados.

Por otro lado, según la bibliografía, las concentraciones de microorganismos recomendables para aplicar tratamientos de bioestimulación son de entre 10^3 - 10^5 UFC/ml, por lo que, en función de los resultados obtenidos, se encontraría en el límite de aplicabilidad para considerarlo un tratamiento óptimo en este sondeo.

Evolución de la concentración de genes funcionales

A lo largo del ensayo se llevaron a cabo muestreos de agua en P186 para el análisis de ADN para determinar la concentración de genes funcionales con potencial de degradación de los contaminantes existentes.

Figura 60. Muestreo microbiológico para el análisis de ADN



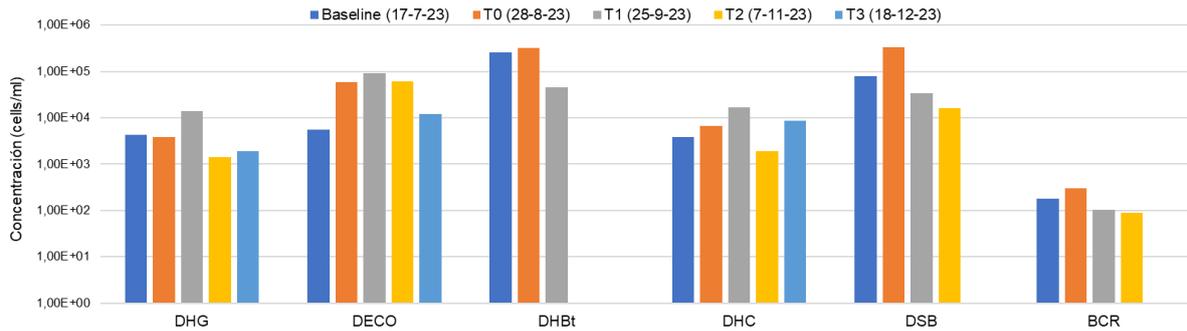
Estos análisis se efectuaron mediante herramientas biológicas moleculares (MBT, de sus siglas en inglés) en el laboratorio especializado de Microbial Insights, en EE.UU. Los paquetes analíticos seleccionados fueron *QuantArray* y *CENSUS*, que comprenden diferentes genes y microorganismos relacionados con la degradación del benceno, clorobencenos, clorofenoles y HCH tanto por vía aeróbica y anaeróbica.

En la siguiente tabla se exponen los resultados de los análisis para aquellos genes o microorganismos relacionados con la vía de degradación anaeróbica, cuya evolución se plasma a continuación en una gráfica. Se muestran en las tablas únicamente aquellos genes o microorganismos cuya concentración analizada en alguno de los muestreos se ha encontrado por encima de 0 células/ml.

Tabla 55. Genes funcionales y microorganismos relacionados con vías de degradación anaeróbica para los principales contaminantes presentes en el acuífero de Bailín

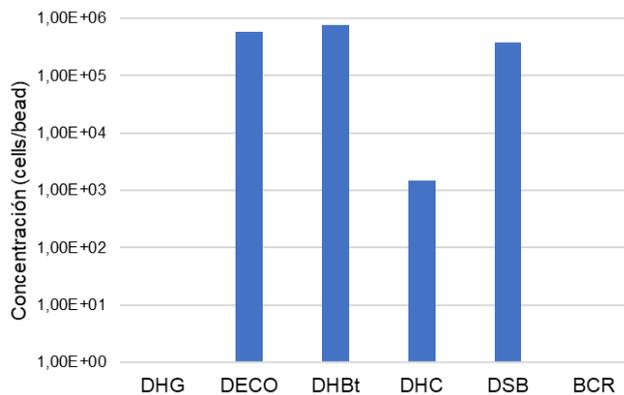
Gen funcional o microorganismo	Abreviación	Contaminante objetivo	Baseline (17-7-23)	T0 (28-8-23)	T1 (25-9-23)	T2 (7-11-23)	T3 (18-12-23)
<i>Dehalogenimonas spp.</i>	DHG	Clorobencenos	4,32E+03	3,79E+03	1,42E+04	1,44E+03	1,89E+03
<i>Dehalobium chlorocoercia</i>	DECO	Clorobencenos	5,63E+03	5,97E+04	9,01E+04	6,04E+04	1,21E+04
<i>Dehalobacter spp.</i>	DHBt	Clorobencenos y HCH	2,57E+05	3,16E+05	4,51E+04	0	0
<i>Dehalococcoides</i>	DHC	Clorofenoles, clorobencenos y HCH	3,90E+03	6,78E+03	1,68E+04	1,89E+03	8,60E+03
<i>Desulfitobacterium spp.</i>	DSB	Clorofenoles	7,88E+04	3,34E+05	3,34E+04	1,63E+04	0
Benzoyl coenzyme A reductase	BCR	Benceno	1,81E+02	3,05E+02	1,05E+02	8,92E+01	0

Gráfica 62. Evolución concentración genes funcionales/microorganismos (vía anaerobia) en P186



Adicionalmente, en la siguiente gráfica se recoge la concentración que presentaron las celdas de carbón activo del interior del sistema ISBR en los genes funcionales/microorganismos relacionados con la degradación anaeróbica de los contaminantes presentes en el acuífero al final del ensayo.

Gráfica 63. Concentración genes funcionales/microorganismos (vía anaerobia) celdas sistema ISBR



Las concentraciones de prácticamente todos los genes/microorganismos analizados relacionados con la degradación anaeróbica de los contaminantes presentes en el acuífero se encontraron igual o mayor tras el arranque del sistema (T0) respecto al muestreo de *baseline*.

Después, los únicos genes/microorganismos que aumentaron tras un mes de funcionamiento del sistema fueron *Dehalogenimonas spp.* (DHG), *Dehalobium chloroocercia* (DECO) y *Dehalococcoides* (DHC). Estos tres están relacionados con la dehalación reductora de algunos tri, tetra, penta y hexa clorobenzenos; y algunas cepas de DHC también podrían participar en la dehalación reductiva de fenoles clorados y HCH.

En los muestreos T2 y T3, las concentraciones en prácticamente todos los genes/microorganismos se redujeron, e incluso desaparecieron; a excepción de unos repuntes en DHC y DHG en el muestreo T3 del 18 de diciembre de 2023. Esta evolución parece coherente con el hecho de que no se pudieron mantener las condiciones anaeróbicas durante todo el ensayo, y coincide con los periodos donde se detectaron concentraciones de oxígeno disuelto en el sondeo mayores a 0 mg/l (durante el muestreo T3, volvieron a registrarse condiciones anaeróbicas, pero no fue tiempo suficiente para que las poblaciones se recuperaran completamente a las condiciones que presentaban en T1).

Por otro lado, en el análisis realizado sobre las celdas de carbón activo del sistema ISBR tras el ensayo, se detectó la presencia de *Dehalobium chloroocercia* (DECO), *Dehalobacter spp.* (DHbt), *Desulfitobacterium* (DSB), y en menor medida, *Dehalococcoides* (DHC). Algunas especies y cepas de *Desulfitobacterium* son capaces de reducir algunos clorofenoles, y *Dehalobacter spp.* está relacionada con la dehalación reductora de diclorobenceno a clorobenceno y de clorobenceno a benceno, además de estar relacionado en la dehalación reductiva del HCH.

Estos resultados contrastan con las muestras analizadas en el agua subterránea, puesto que en el caso de *Dehalobacter spp.* y *Desulfitobacterium*, no fueron detectados en los últimos muestreos. Y en cambio, *Dehalogenimonas spp.* (DHG), que sí fue detectado en el agua del sondeo en todos los muestreos, no fue detectado en las celdas de carbón activo.

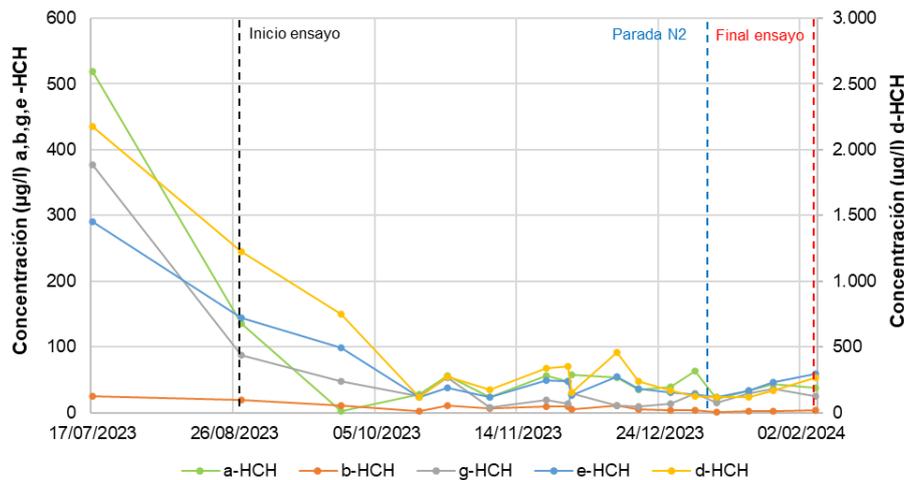
Debido a que no se dispone de un muestreo específico en el agua subterránea para el día 6 de febrero de 2024, cuando se paró el ensayo, es difícil identificar si estas diferencias se debieron a la evolución de los genes funcionales/microorganismos durante el último periodo del ensayo, o están más relacionadas con el método de muestreo y/o análisis.

Por último, indicar que tampoco se detectó el gen Benzoyl coenzyme A reductase (BCR), relacionado con la degradación anaeróbica del benceno, en las celdas de carbón activo. No obstante, las concentraciones resultaron muy bajas en los análisis de agua e incluso no se llegó a detectar en el último muestreo T3.

Evolución de la concentración de contaminantes

En la gráfica a continuación se expone la evolución de las concentraciones en los diferentes isómeros de HCH a lo largo del ensayo en el sondeo de actuación P186. Con objeto de mejorar la visualización, se muestra el isómero delta-HCH en el eje secundario debido a su mayor concentración respecto al resto de isómeros.

Gráfica 64. Evolución de las concentraciones de isómeros de HCH en P186



De acuerdo con la evolución de los isómeros de HCH, se apreció un descenso significativo de la concentración de alfa, gamma, delta y épsilon-HCH tras el arranque del sistema, que llegó a su máximo en el muestreo del día 17 de octubre de 2023. Desde entonces, las concentraciones se mantuvieron bajas y bastante estables hasta la parada de la inyección de nitrógeno.

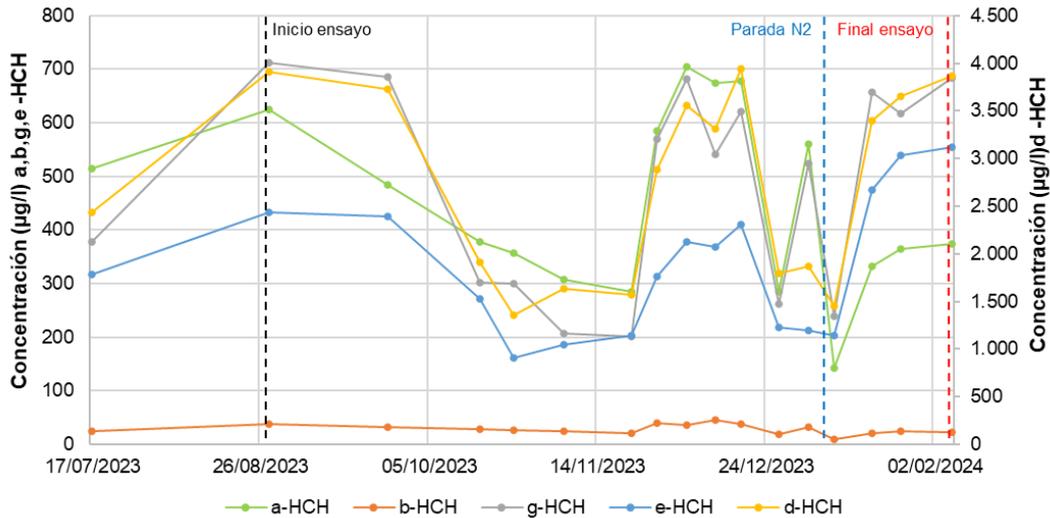
Teniendo en cuenta la relación entre los diferentes isómeros⁴, se observó que el isómero alfa, uno de los más biodegradables, se encontró en los muestreos iniciales a una proporción de casi el doble respecto al isómero épsilon, el cual no parece ser biodegradable.

Utilizando estos dos isómeros como marcadores, se observa que, una vez arrancó el sistema, la concentración de alfa decayó hasta quedar por debajo de la de épsilon durante varios periodos a lo largo del ensayo, lo que podría ser indicativo de que se estaban produciendo procesos de biodegradación.

En el caso del sondeo P179N, tal y como se recoge en la siguiente gráfica, las concentraciones del isómero delta disminuyeron tras el arranque del sistema, más acusadamente tras el muestreo del 17 de octubre de 2023, y volvieron a recuperarse entre el muestreo del 22 de noviembre al 18 de diciembre de 2023, coincidiendo con el periodo donde se interrumpieron las condiciones anaerobias. Nótese que en la gráfica se muestra también el isómero delta en el eje secundario.

⁴ Según la bibliografía, por vía anaeróbica, los isómeros alfa y gamma se degradarían más rápidamente que delta y beta, mientras que no se ha observado que se produzca para el isómero épsilon.

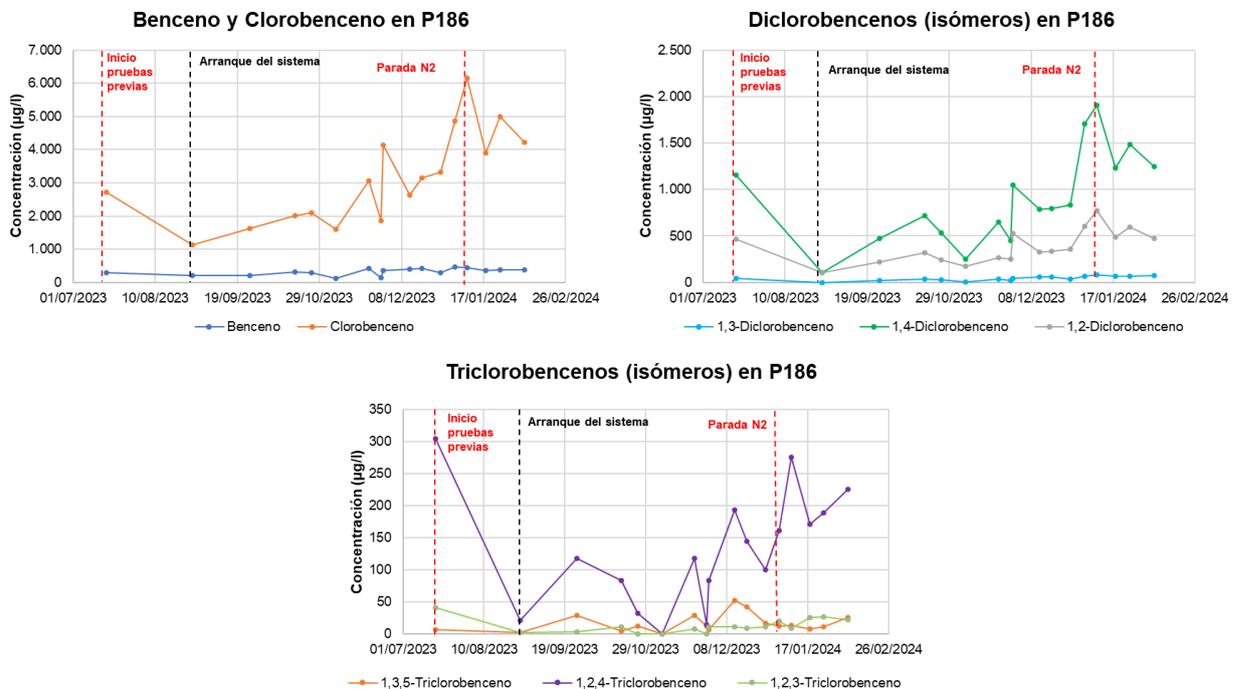
Gráfica 65. Evolución de las concentraciones de isómeros de HCH en P179N



En el resto de isómeros, las concentraciones se mantuvieron bastante estables a lo largo del ensayo siguiendo una tendencia similar a las del sondeo P186. Sin embargo, al contrario de lo que ocurría en P186, la concentración del isómero épsilon se situó por debajo de delta en todo momento, a excepción de los últimos muestreos la parada de la inyección de nitrógeno. En ese último periodo, tal y como ocurría en P186, la concentración de épsilon se situó por encima de la de alfa, si bien la causa podría deberse únicamente a la entrada de una mayor concentración de contaminante con una proporción mayor en el isómero épsilon.

Respecto a otros compuestos químicos analizados, como el benceno y los clorobencenos, cuya degradación por vía anaeróbica puede ser más limitada que por vía aeróbica, la evolución de las concentraciones en el sondeo de actuación se recoge en las siguientes gráficas.

Gráfica 66. Evolución de las concentraciones de benceno y clorobencenos en P186



En el caso del benceno, las concentraciones de partida fueron bastante reducidas, y no presentaron variaciones significativas a lo largo del ensayo. En cambio, en el caso del monoclorobenceno y algunos dicloro y triclorobencenos, como 1,4-diclorobenceno y 1,2,4-triclorobenceno, se detectó una tendencia creciente de las concentraciones desde el inicio del ensayo.

Este aumento, unido a la disminución de las concentraciones de alguno de los isómeros de HCH podría ser a priori indicador de la existencia de procesos de dechloración reductiva, uno de los principales procesos de la degradación del HCH por vía anaeróbica.

Conclusiones

A raíz de los resultados obtenidos en todos los análisis realizados durante el ensayo, cabe destacar las siguientes conclusiones:

- Las concentraciones analizadas de microorganismos fueron menores que en otros tratamientos realizados en el emplazamiento por vía aeróbica, aunque, en general, sí se produjo un crecimiento bacteriano a lo largo del ensayo.
- La interrupción de las condiciones puramente anaerobias, por un corte en el suministro de nitrógeno al interior del sondeo, un mes antes de que acabara el ensayo, pareció haber afectado sensiblemente a la actividad de los microorganismos anaerobios y a la efectividad del ISBR, cuyos procesos para la degradación de los contaminantes suelen ser más lentos que los registrados por vía aeróbica.

Esta dificultad para el mantenimiento de las condiciones anaeróbicas pudo deberse en parte por las complicaciones técnicas acontecidas durante la aplicación de los reactivos. No obstante, también es posible que el sistema no fue sido capaz de adaptar las necesidades de nitrógeno durante la potencial entrada de agua al sondeo más oxigenada en determinados momentos durante el ensayo.

- No obstante, algunos genes funcionales y microorganismos específicos asociados a las vías de degradación anaeróbica de los contaminantes existentes en el acuífero mostraron mayores concentraciones durante el tiempo que el sistema se mantuvo en condiciones puramente anaerobias, pero fueron mermándose hacia el final del ensayo, previsiblemente debido a la interrupción de estas condiciones.
- De acuerdo con la evolución de las concentraciones de los isómeros de HCH, es posible que se produjera cierta degradación en el sondeo de actuación durante el tiempo que el sistema se mantuvo en condiciones anaeróbicas, como podría indicar el contraste en la evolución de la concentración de los isómeros más biodegradables frente a los que no parecen serlo.

El aumento de las concentraciones de monoclorobenceno y algunos di y triclorobencenos también podría ser indicativo de la existencia de procesos de dechloración reductiva, si bien parece que la actividad registrada fue muy limitada y no es fácil discernir que se haya producido únicamente debido a estos procesos más allá de otros posibles factores externos.

- En cuanto al sondeo de observación, no pareció haberse notado una influencia directa de la actuación del sistema en P186.
- En general, parece que los tratamientos por vía aeróbica tienen un mayor potencial para su aplicación en campo en el emplazamiento, si bien, debido a la interrupción de las condiciones anaeróbicas durante el ensayo, no se puede descartar este método como una opción eficaz para la biorremediación del HCH.

8.2.2 Ensayo de bioestimulación aeróbica en campo

Antecedentes

En los meses de abril y mayo de 2023 se desarrolló un ensayo de bioestimulación mediante aireación e incremento de temperatura en los sondeos I1 y O1 situados en capa M en la Zona de Barrera, empleando el sondeo O2 como punto de observación. Las conclusiones principales obtenidas fueron las siguientes:

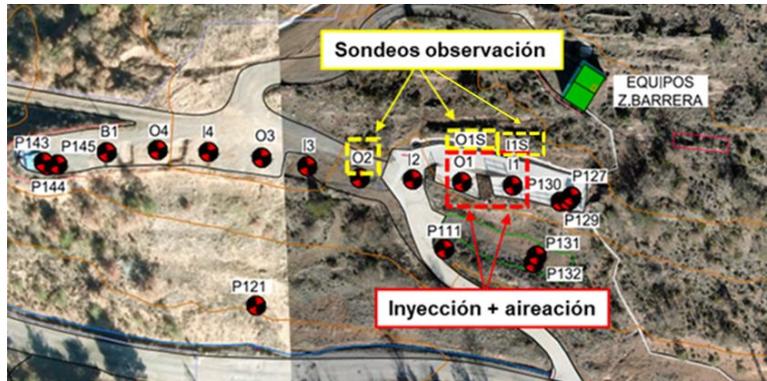
- La aireación fue efectiva, aumentando las concentraciones de oxígeno disuelto en I1 y O1 hasta 4-5,5 mg/l, las cuales disminuyeron una vez finalizó la aireación.
- La concentración de microorganismos aumentó en los sondeos de actuación, de valores iniciales de 10^3 UFC/ml a valores superiores a 10^4 UFC/ml. Al cesar la aireación, las concentraciones volvieron a los valores iniciales.
- Las concentraciones de contaminantes descendieron durante el ensayo en los sondeos seleccionados, aunque fue difícil discernir si fue a causa de un aumento de los procesos de biodegradación o a causa del efecto directo de la aireación.

Como los resultados del ensayo fueron favorables, se planteó repetir el ensayo en los mismos sondeos añadiendo también nutrientes para incentivar así el aumento de la actividad microbiana, y por ende, los procesos de biodegradación.

Objetivo y metodología

El objetivo principal del ensayo inducir procesos de biodegradación aeróbica mediante la instalación de un biorreactor en los sondeos de actuación, I1 y O1, empleándose 3 sondeos de observación ubicados aguas abajo de los sondeos de actuación: I1S, O1S y O2.

Figura 61. Ubicación del ensayo de bioestimulación en Zona de Barrera



El sistema biorreactor consistía en un tubo de PVC relleno de carbón activo para facilitar la adhesión de microorganismos; cerrado en sus extremos y ranurado en la parte central para favorecer la entrada del agua subterránea. En el tubo se introdujeron dos tuberías de entrada, una para la inyección de aire en continuo con un difusor, alimentado por el sistema de aireación de la caseta de la Zona de Barrera, y otra para la inyección de nutrientes. El sistema fue fabricado por el personal de campo de AECOM en el emplazamiento.

En I1 y O1 los sistemas se colocaron a 35 m de profundidad, e inmediatamente encima (a 34 m) se colocó una bomba peristáltica que quedó fija durante el ensayo para realizar los muestreos. Los sondeos de observación también quedaron instalados a 35 m con bombas *bladder* para su muestreo.

Figura 62. Fabricación de los sistemas de biorremediación del ensayo de Zona de Barrera



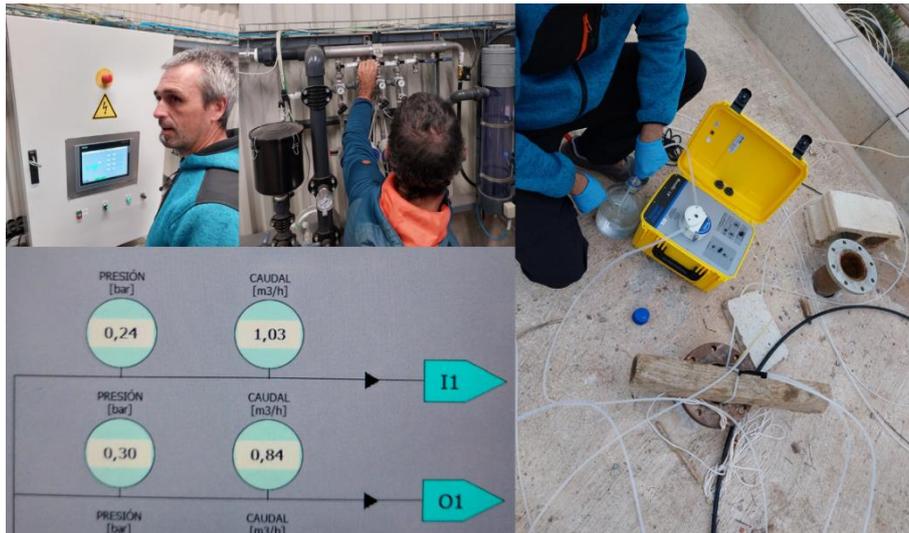
Para alcanzar la relación C:N:P adecuada para favorecer la actividad microbiana (100:10:1), se decidió inyectar una solución de urea y fosfato diamónico para elevar los valores de N y P necesarios.

Tabla 56. Concentraciones y relación C:N:P previa al ensayo de bioestimulación en los sondeos de actuación

Punto		C	N	P
O1	[] (mg/l)	37,29	0,54	0,00
	C:N:P	100,00	1,45	0,00
I1	[] (mg/l)	53,85	0,37	0,00
	C:N:P	100,00	0,68	0,00

La semana anterior al inicio del ensayo se realizaron pruebas de funcionamiento, así como para ajustar la frecuencia y concentración de las inyecciones de nutriente, estableciéndose una frecuencia de 2 inyecciones semanales (lunes y jueves).

Figura 63. Ajuste de dosificación de aire, pruebas de inyección y funcionamiento del sistema



Ejecución del ensayo

El día 23 de octubre de 2023 se instalaron los dos sistemas de biorremediación por vía aeróbica en los sondeos I1 y O1, el cual estuvo en funcionamiento hasta el 18 de marzo de 2024. Para poder obtener un análisis de los resultados más completo, se realizó un último muestreo en abril, un mes después de la finalización del ensayo.

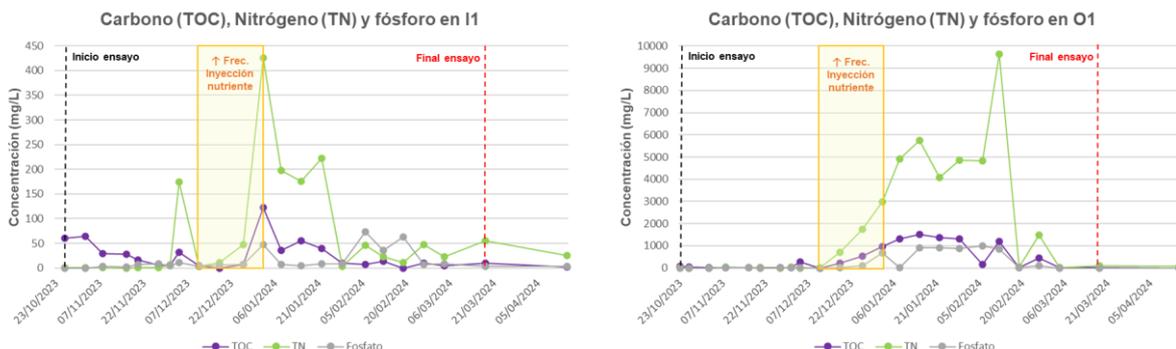
Semanalmente, se fueron analizando contaminantes en el laboratorio de Pirenarium, parámetros fisicoquímicos in situ y revisión del caudal de entrada de aire. Mensualmente, se realizaron siembras microbiológicas en el laboratorio de Bailín, en medio genérico (con Plate count agar) y medio mínimo (con Bushnell haas agar + una dilución de los contaminantes del emplazamiento), en este caso cultivándose en condiciones aeróbicas.

Dos veces por semana se inyectó la solución nutriente preparada en el laboratorio de Bailín, la cual se componía de 1,7 l de agua con 590 g de urea y 140 g de fosfato diamónico.

Durante el mes de diciembre de 2023, se estuvo inyectando 3 veces por semana en lugar de 2 al no conseguir las concentraciones de nutrientes deseadas, pero a pesar de ver una mejoría en los resultados, se tuvo que volver a la configuración de inyección 2 veces por semana por problemas de obturación de la tubería de inyección.

En la siguiente figura se muestra la evolución de la concentración de nutrientes en los sondeos de actuación. En la figura se indica en amarillo el periodo de tiempo en el que se estuvo inyectando 3 veces por semana, que coincide con un aumento significativo de las concentraciones de nutrientes en los sondeos.

Gráfica 67. Evolución de concentración de nutrientes en los sondeos de actuación

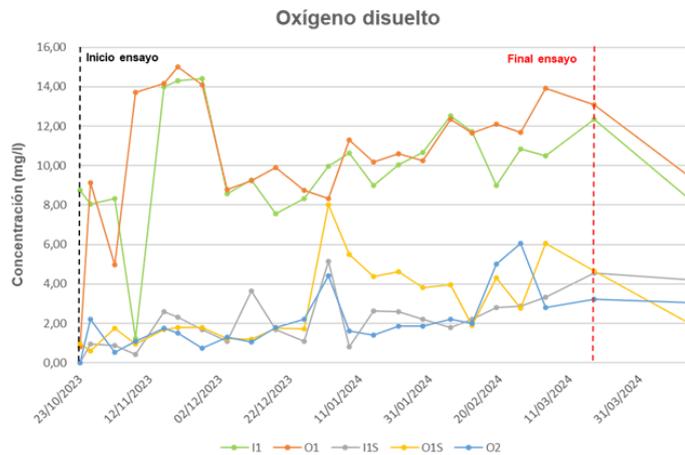


Por otro lado, en enero de 2024 se observó una biomasa creciendo sobre y en el interior de la bomba peristáltica colocada encima del biorreactor de I1, que fue analizada mediante siembras microbiológicas y por secuenciación de ADN en el laboratorio de GAIKER.

Al inicio del ensayo se ajustó un caudal de entrada de aire a los reactores de 1 m³/h. No obstante, al tratarse de un caudal muy bajo (era el valor mínimo que parecía poder establecerse en el sistema de aireación de la caseta de Zona de Barrera) regulado mediante una llave de paso, no contaba con una gran precisión.

Por este motivo, la concentración de oxígeno disuelto en los sondeos fue oscilando, aunque se consiguió mantener el oxígeno disuelto en valores relativamente altos entre 8 y 15 mg/l, exceptuando algunos valores que corresponden a momentos en los que el caudal de entrada de aire había disminuido.

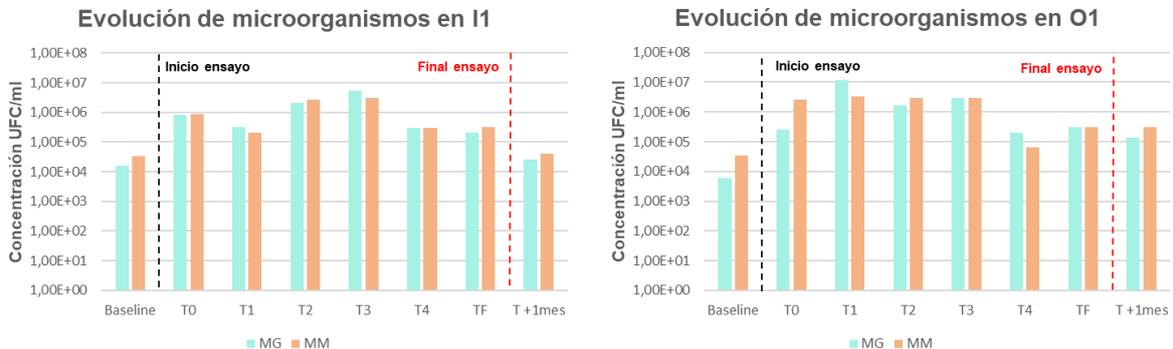
Gráfica 68. Evolución de la concentración de oxígeno disuelto durante el ensayo



Resultados de la evolución en la concentración de microorganismos

En la siguiente figura se representa la evolución de la concentración de microorganismos en los sondeos de actuación durante el ensayo. Cabe destacar que la primera muestra sembrada fue la de *baseline* del 16 de octubre, aunque el ensayo no se inició hasta el 23 de octubre (T0).

Gráfica 69. Evolución de la concentración microbiológica durante el ensayo en I1 y O1



En general, se observó un claro aumento de la actividad microbiana. En el caso del sondeo I1, tanto en medio genérico (MG) como en medio mínimo (MM) existía una concentración de alrededor de 10^4 UFC/ml antes de comenzar el ensayo, y tras una semana de aireación en continuo y una inyección de solución nutriente, en T0 el orden de magnitud fue dos órdenes mayor (10^6 UFC/ml) en MG y en MM.

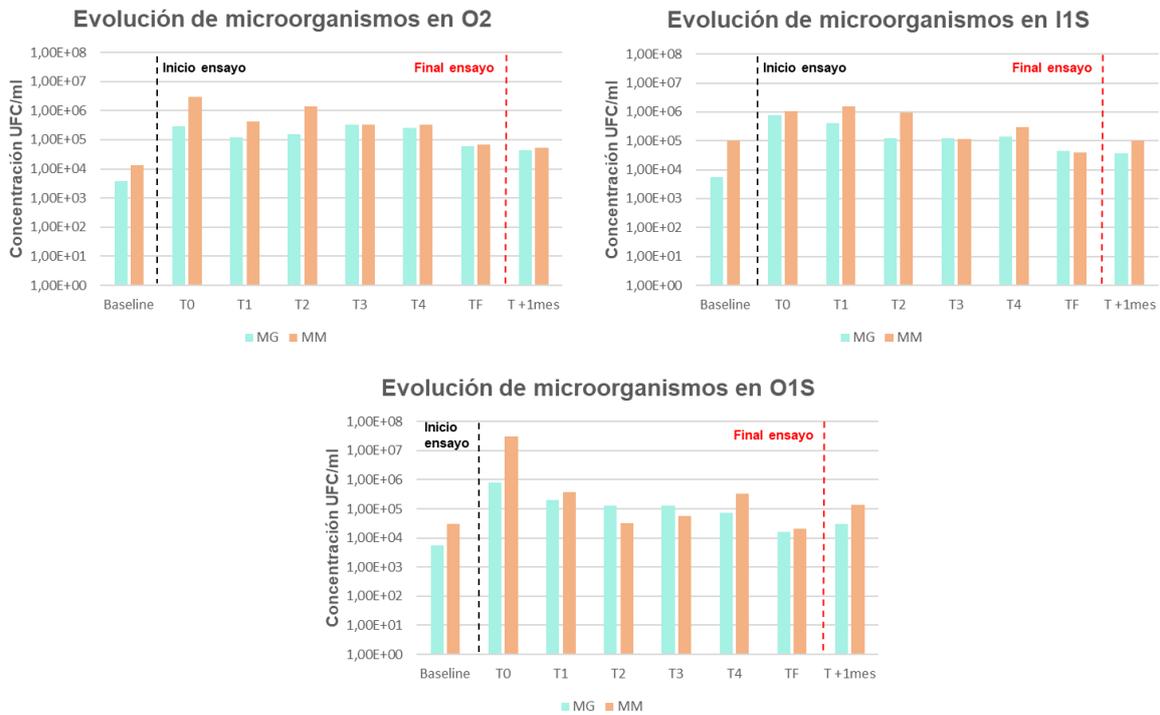
A lo largo del ensayo, la concentración de microorganismos en I1 fue bastante pareja en los dos medios, con valores de más de 10^5 UFC/ml en todos los muestreos, llegando casi a alcanzar las 10^7 UFC/ml en el muestreo T3. En el caso del sondeo O1 se observó una tendencia similar, con concentraciones antes del ensayo de alrededor de 10^4 UFC/ml en ambos medios, que tras una semana superaron las 10^5 UFC/ml en MG y las 10^6 UFC/ml en MM, manteniéndose alrededor de dichos valores durante el ensayo, llegando a alcanzar las 10^7 UFC/ml en T1 en el caso del MG y concentraciones mayores de 10^6 UFC/ml en el caso del MM.

Un mes después de la finalización del ensayo, en el caso de I1 se volvió a las concentraciones iniciales de antes del ensayo, lo cual evidencia que la bioestimulación se estaba generando por la aplicación de aireación y nutriente y no por otros factores aleatorios. En el caso de O1, dicha concentración fue un orden superior al valor inicial en ambos medios, lo cual podría indicar que en este caso el efecto de la bioestimulación se mantuvo una vez finalizado el ensayo. El hecho de que en I1 no se viera este efecto posterior pudo deberse a los problemas detectados en este sondeo para realizar las inyecciones de nutriente al final del ensayo.

Los valores de concentración de microorganismos alcanzados fueron altos (10^6 - 10^7 UFC/ml), pareciendo evidenciar que la adición de nutrientes complementada con la aireación tuvo mejor resultado en la estimulación microbiana de los sondeos I1 y O1 que la aireación sin adición de nutrientes, ya que en el anterior ensayo de bioestimulación en los mismos sondeos mediante solo aireación en abril 2023, las concentraciones microbianas alcanzaron valores alrededor de 10^5 UFC/ml en el caso de ambos sondeos, siendo las concentraciones de partida similares (10^4 UFC/ml en I1 y alrededor de 10^3 UFC/ml en O1).

Como se puede ver en la siguiente figura, la actividad microbiana también se vio favorecida en los sondeos de observación, aunque en menor medida que en los sondeos de actuación.

Gráfica 70. Evolución de concentración microbiológica durante en ensayo en O2, I1S y O1S



Las concentraciones microbiológicas de partida en los sondeos de observación fueron de alrededor de 10^4 UFC/ml en MG y MM, similares a las de los sondeos de actuación, con excepción del sondeo I1S en MM, que tuvo concentraciones de partida de 10^5 UFC/ml.

Tras una semana de actuación, en los 3 sondeos de observación se notó un aumento de la concentración microbiana, de alrededor de 10^6 UFC/ml en todos los casos, siendo mayores en el caso del MM en O1S (superiores a 10^7 UFC/ml).

En general, durante el ensayo se mantuvieron unas concentraciones de entre 10^5 y 10^6 UFC/ml en todos los sondeos de observación, excepto en el último muestreo, entre 10^4 y 10^5 UFC/ml, lo cual pudo deberse a los problemas de inyección en los sondeos de actuación.

Pasado un mes de la finalización del ensayo es positivo destacar que las concentraciones microbiológicas se mantuvieron en valores alrededor de 10^5 UFC/ml, un orden por encima de los valores de inicio del ensayo. Estos resultados parecieron reflejar que la actuación en los sondeos I1 y O1 no solo favorecía a esos sondeos sino que el efecto de bioestimulación se extendió a los sondeos cercanos.

Análisis de genes funcionales

El 26 de diciembre de 2023 se tomó una muestra de la biomasa que creció el sondeo I1 alrededor de bomba instalada encima del biorreactor, en la tubería de salida de la misma y en la superficie del biorreactor.

Ese mismo día se sembró la biomasa en medio genérico (PCA), y tras unos resultados óptimos de concentración de microorganismos (10^7 UFC/ml), el día 2 de enero de 2024 se volvió a sembrar otra muestra, obteniendo unos resultados de 10^9 UFC/ml, valor muy elevado y favorable.

El 15 de enero se volvió a sembrar una muestra de la biomasa en medio genérico y medio mínimo para confirmar que los microorganismos que la formaban fueran específicos. Al obtener en ambos medios valores de 10^8 UFC/ml, se pudo afirmar que la biomasa se componía de una aglomeración de microorganismos especializados.

Figura 64. Biomasa encontrada en el sondeo I1 durante el ensayo analizada en el laboratorio de Bailín



De esta biomasa se enviaron 4 muestras al laboratorio del Centro Tecnológico de GAIKER, una de la que salía de la bomba al purgar antes de muestrear (A1), otra de la que creció en la superficie de la bomba de encima del biorreactor (A2), una tercera de la que creció en el exterior del biorreactor (A3) y una última del carbón activo de dentro del biorreactor (A4).

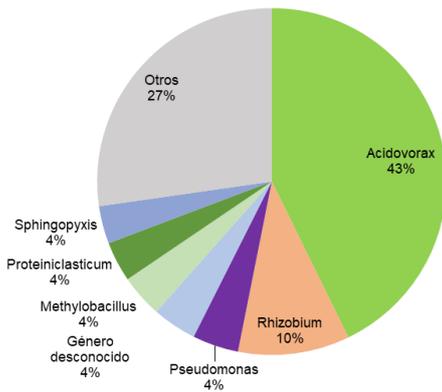
Figura 65. Muestras enviadas a GAIKER para secuenciación de ADN



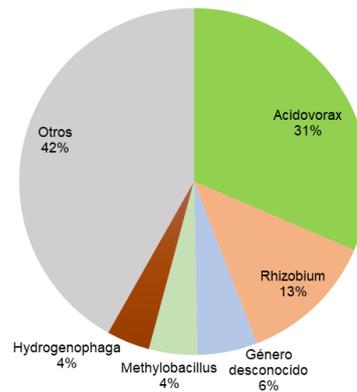
Los resultados de la secuenciación de ADN en cuanto a caracterización taxonómica por géneros se exponen en la siguiente figura.

Gráfica 71. Clasificación taxonómica de géneros encontrados en la secuenciación de ADN

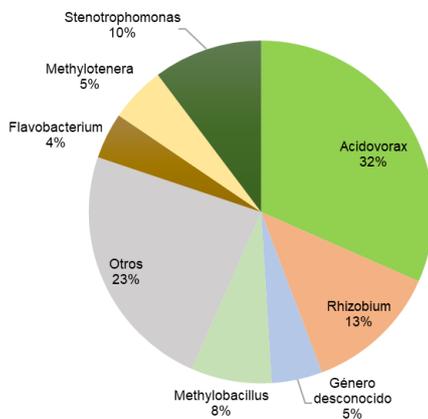
Clasificación de géneros en A1



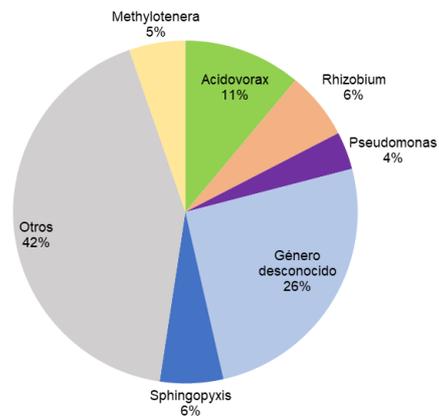
Clasificación de géneros en A2



Clasificación de géneros en A3



Clasificación de géneros en A4



En general, las cuatro muestras presentaron una elevada presencia del género *Acidovorax*, además de otros géneros como *Rhizobium* y un género desconocido, que aparece en las 4 muestras; *Methylobacillus*, que aparece en 3 de las muestras y otros géneros como *Methylotenera*, *Pseudomonas* y *Sphingopyxis*, que aparecen en 2 de las 4 muestras.

Según la bibliografía especializada consultada, la mayoría de estos géneros están relacionados con la degradación de organoclorados, sobre todo *Sphingopyxis* y *Pseudomonas*. Por su parte, del género *Acidovorax*, que parece ser protagonista estando muy presente en el acuífero, no existe mucha información que le relacione directamente con el HCH, aunque sí aparece en algunos artículos relacionados con éste. En mayor medida, este género se relaciona con otros compuestos, como los clorofenoles, lo cual es interesante ya que éstos se encuentran en el emplazamiento como producto de degradación aeróbica.

Por otro lado, también se ha encontrado el género *Sphingopyxis*, un género reciente establecido a partir del género *Sphingobium*, el cual guarda relación con los genes *Lin1* y *Lin2*, genes que inician la degradación aeróbica del lindano.

Respecto cada una de las muestras en particular:

A1 (al purgar la bomba que queda encima del biorreactor)

En esta muestra destaca *Acidovorax* (42,8%), *Rhizobium* (10,3%), *Pseudomonas* (4,0%), un género desconocido (4,1%), *Sphingopyxis* (4,0%).

Además de la taxonomía por géneros, se analizó por especies, destacando la existencia de cuatro especies diferentes del género *Acidovorax*: *Acidovorax defluvi* (20,5%), *Acidovorax facilis* (6,0%), *Acidovorax radialis* (5,9%) y *Acidovorax soli* (3,1%). *Rhizobium sp.* aparecía en un 6,8%, *Proteiniclasticum Ruminis* y *Methylobacillus glyco*genes en un 3,7 y 3,5% respectivamente, y una especie desconocida aparecía en un 22,3%.

A2 (exterior de la bomba peristáltica)

Esta muestra fue muy similar a la anterior, destacando de nuevo *Acidovorax* (31,5%), *Rhizobium* (12,7%), y *Methylobacillus* (4,5%). Apareció un nuevo género que no aparecía en A1, *Stenotrophomonas*, en un 3,4%, el cual es un microorganismo muy asociado a la biorremediación. También continuó la presencia de *Pseudomonas* (3,2%), y *Sphingopyxis*, relacionado con los genes *Lin1* y *Lin2*, asociados a la degradación aerobia del lindano.

En cuanto a especies, volvieron a aparecer 3 de las especies de *Acidovorax* que aparecían en A1: *Acidovorax defluvi* (16,0%), *Acidovorax radices* (5,1%) y *Acidovorax soli* (2,9%), *Rhizobium sp.* (8,8%) y *Methylobacillus glycogenes* (3,9%), y otras como *Hydrogenophaga taeniospiralis* (2,4%) y *Methylotenera versatilis* (2,4%).

A3 (exterior del biorreactor)

De nuevo apareció *Acidovorax* como género más abundante (31,6%), *Rhizobium* (12,6%), *Methylobacillus* (7,6%) y *Methylotenera* (5,2%). Otros como *Stenotrophomonas* y *Flavobacterium* (10,2 y 4,3% respectivamente) y de nuevo, *Pseudomonas* (3,4%). El resto perteneció a un género no identificado (3,4%).

En cuanto a la taxonomía por especies, aparecieron las mismas que en las dos muestras anteriores.

A4 (carbón activo del interior del biorreactor)

En A4, el género que más presencia tuvo fue un género desconocido (25,5%). Por otro lado, siguió apareciendo *Acidovorax* (11,0%), *Rhizobium* (6,4%), *Sphingophyxis* (5,9%), *Methylotenera* (5,3%), *Pseudomonas* (3,5%), *Sthenotrophomonas* (3,2%) y *Methylobacillus* (2,7%).

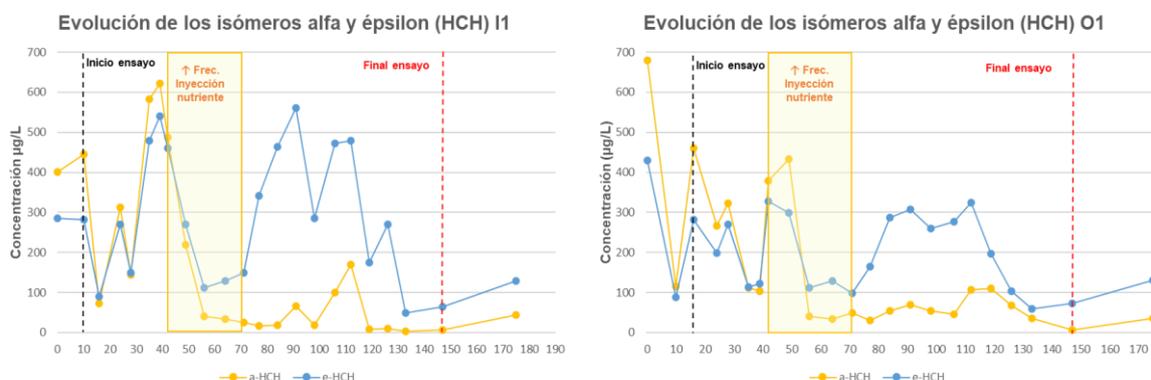
En la clasificación taxonómica a nivel de especies se observó como la especie del microorganismo de género no clasificado tuvo una presencia del 40,5%, seguido de *Acidovorax defluvi* (6,6%), *Methylotenera versatilis* (5,1%) y *Sphingophyxis sp.* (4,8%). Siguió apareciendo *Rhizobium sp.* (4,8%), *Stenotrophomonas rhizophila* (2,9%) y *Methylobacillus glycogenes* (2,3%), y apareció por primera vez *Sphingobacterium nematocida* (2,6%), una especie de un grupo muy asociado con la degradación aerobia del lindano.

La existencia de 4 especies diferentes dentro del género *Acidovorax* parece apuntar que dicho género es de gran relevancia en el acuífero de Bailín.

Evolución de la concentración de contaminantes

Según la bibliografía existente, en el caso del HCH, los isómeros alfa, gamma y delta son los más biodegradables, el isómero beta también parece ser biodegradable, aunque en menor medida, y el isómero épsilon no parece serlo. Es por ello que se pueden encontrar indicios de biodegradación observando la relación que se produce en la evolución de los distintos isómeros del HCH. De este modo, en la figura a continuación se representan los isómeros de HCH alfa y épsilon en los sondeos de actuación del ensayo, midiéndose en días los valores del eje X.

Gráfica 72. Evolución de a-HCH y e-HCH por días durante el ensayo en I1 y O1

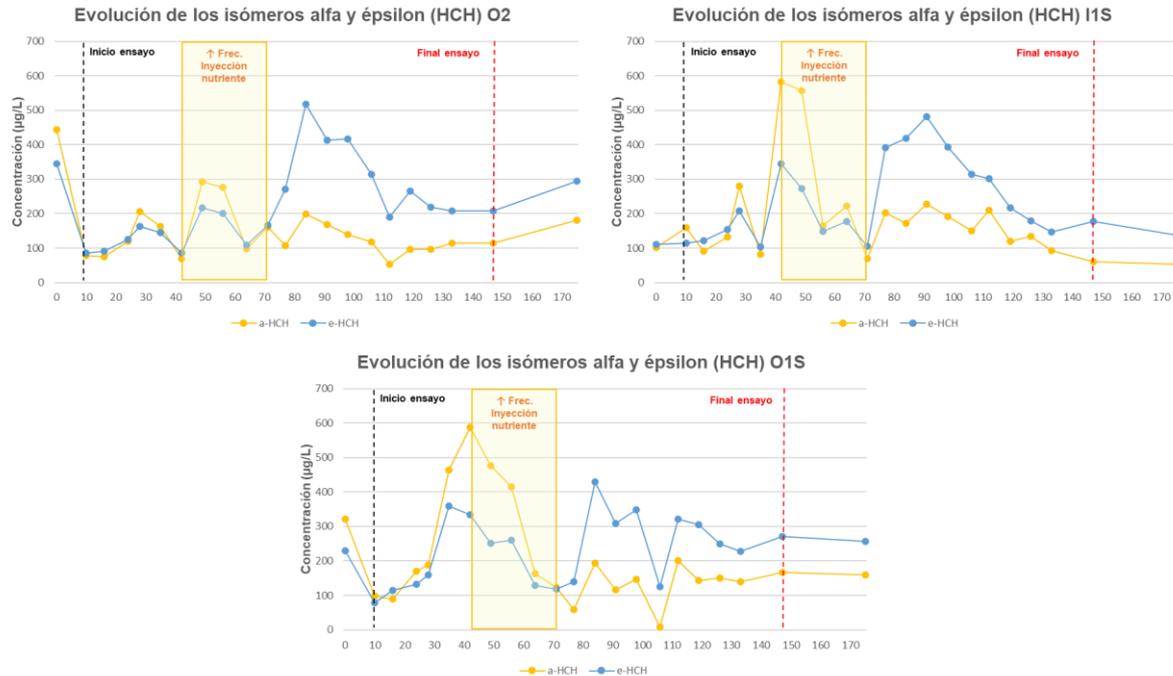


Como se puede observar en figura, tanto en I1 como en O1, al comienzo del ensayo el isómero alfa presentó una mayor concentración que el isómero épsilon. Una vez aumentó la frecuencia de inyección de nutrientes, alrededor del día 40 de ensayo, y aumentaron las concentraciones de nitrógeno y fósforo, el isómero alfa pasó a estar en menor concentración que el isómero épsilon, lo cual podría ser un indicio de que desde ese momento hasta el final del ensayo se produjo biodegradación. Incluso una vez finalizado el ensayo, se mantuvo la concentración de épsilon por encima de alfa.

Por otro lado, el pico de concentración de épsilon que apareció alrededor del día 90 en I1 pudo deberse a una aportación de carga contaminante desde aguas arriba, que afectó a épsilon pero no a alfa, lo cual vuelve a apuntar a que alfa podría estar siendo biodegradado por la actividad microbiana.

Comparando los resultados de las siembras microbiológicas de I1 con las concentraciones de HCH, se observó como en T2 y T3, que coinciden con los días 49 y 84 del ensayo, se detectaron las concentraciones microbiológicas más altas (de 10^6 - 10^7 UFC/ml) coincidiendo con el periodo en el que hubo mayor diferencia entre épsilon y alfa, siendo la concentración de épsilon superior a la de alfa. Esta diferencia podría estar reflejando una alta actividad de biodegradación de los microorganismos de los isómeros más biodegradables. Además, esta tendencia en la relación de alfa frente a épsilon se pudo observar también aunque en menor medida en los sondeos de observación, como se presenta en la siguiente figura.

Gráfica 73. Evolución de a-HCH y e-HCH por días durante el ensayo en O2, I1S y O1S



Como se observa, alrededor del día 70 desde el muestreo *baseline* se empezó a ver en los sondeos de observación un cambio en la relación de los isómeros alfa y épsilon. Hasta entonces, alfa estaba por encima de épsilon, y a partir de ese momento épsilon pasó a tener concentraciones más altas que alfa en los tres sondeos hasta al menos un mes después de la finalización del ensayo.

Debido a que la inyección de nutrientes se realizaba en los sondeos I1 y O1, el hecho de que este efecto se viera más tarde en O1S, I1S y O2 pudo deberse a que los nutrientes de la inyección llegaron también más tarde a esos sondeos, lo cual es lógico ya que no se estaba actuando directamente en ellos. Aun así, parece que el efecto de la biodegradación se podría haber extendido a los sondeos de observación, lo cual es positivo y aumenta el alcance del ensayo.

Conclusiones

Se aplicó aireación e inyección de nutrientes (N y P) en I1 y O1, consiguiendo altas concentraciones de microorganismos, sobre todo en los sondeos de actuación (10^6 - 10^7 UFC/ml), superiores a las que se consiguieron en un ensayo anterior en los mismos sondeos donde solo se aplicó aireación (10^5 UFC/ml).

Parece existir un patrón en la relación de los isómeros alfa y épsilon, siendo el primero biodegradable a diferencia del segundo. Al aumentar la frecuencia de inyección de nutrientes, la concentración del isómero alfa pasó de ser mayor que la de épsilon a ser menor, incluso durante un potencial aporte de carga contaminante procedente aguas arriba, lo cual podría indicar una biodegradación por parte de los microorganismos que coincidió con el aumento de la frecuencia de inyección, la concentración de nutrientes en los sondeos y los valores más altos registrados de concentración microbiana.

El aumento de la frecuencia de inyección no pudo mantenerse en el tiempo por problemas de obturación en el sistema, aunque una frecuencia de 3 veces por semana de inyección de nutriente fue más beneficioso para la actividad microbiana que las 2 planteadas inicialmente.

Durante el ensayo apareció una biomasa en el biorreactor, la bomba de muestreo y el agua del sondeo I1, en la que se realizó una secuenciación de ADN y se descubrió la presencia de diferentes géneros de interés: *Acidovorax*, relacionado con la degradación de clorofenoles, un género desconocido, y otros como *Rhizobium*, *Methylobacillus*, *Methylotenera*, *Pseudomonas* y *Sphingopyxis*. Según la bibliografía actual, la mayoría de estos géneros están relacionados con la degradación de organoclorados, sobre todo *Sphingopyxis* y *Pseudomonas*. Especialmente el género *Sphingopyxis*, un género reciente establecido a partir del género *Sphingobium*, guarda relación con los genes *Lin1* y *Lin2*, genes que inician la degradación aerobia del lindano.

La bioestimulación pareció verse reflejada también en los sondeos de observación, en los cuales se observó la misma tendencia en la relación de isómeros alfa y epsilon, además de conseguir valores de concentraciones microbianas de 10⁶ UFC/ml.

8.2.3 Biorreactor aeróbico en campo

Desde julio de 2021, se ha seguido una línea de trabajos tanto en laboratorio como en campo con el objetivo final de implantar un biorreactor aeróbico en campo. Para cumplir este objetivo, se definió una hoja de ruta compuesta por diferentes etapas secuenciales donde los primeros trabajos se han ido desarrollando principalmente en el laboratorio de manera previa a su aplicación en campo.

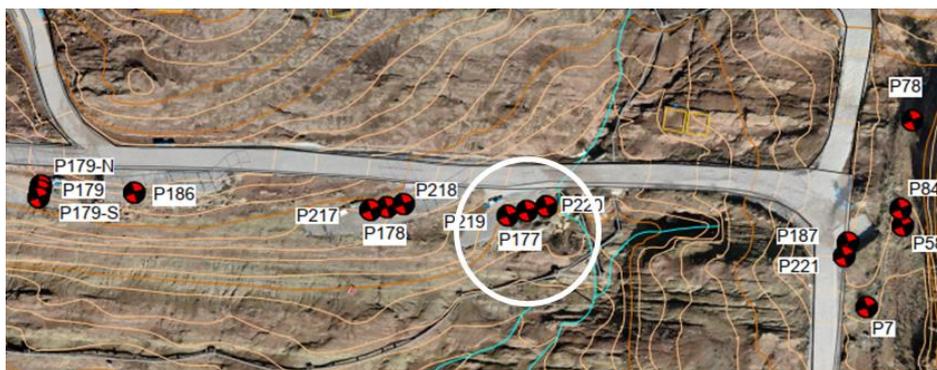
Figura 66. Secuencia de trabajos microbiológicos efectuados en Bailín



Tras las primeras etapas de caracterización y ensayos en laboratorio, entre enero y mayo de 2023 se desarrollaron dos ensayos de bioestimulación en Zona de Barrera, con aireación y aireación más inyección de nutrientes, una de las condiciones previamente estudiadas en los ensayos de incubador orbital en el laboratorio. Y entre octubre de 2023 y abril de 2024, tal y como se ha comentado anteriormente, se llevaron a cabo varias pruebas piloto de biorreactor aeróbico in situ, en sondeos de la capa M en Zona de Barrera, actuando directamente sobre el acuífero.

Finalmente, en 2024 se ha construido un biorreactor aeróbico de campo on site, con el objetivo de intentar bioestimular el metabolismo microbiano por vía aeróbica en una zona del barranco este del vaso, y favorecer la degradación de los contaminantes de interés.

Figura 67. Ubicación del biorreactor aeróbico de campo



En agosto de 2024 comenzaron los trabajos de puesta a punto del biorreactor, que se instaló con una carpa de cubrición para evitar su sobrecalentamiento durante los meses más calurosos.

Figura 68. Pruebas de funcionamiento del biorreactor aeróbico de campo



El sistema se compone de un depósito principal de un volumen de unos 2.000 l en el que tiene lugar el tratamiento biológico. Este depósito dispone de una entrada que recoge el agua contaminada procedente del acuífero y una salida para evacuar el efluente tratado. En el [Anexo D](#) se muestra un plano del mismo.

En el interior, se dispone de un sistema de aireación para oxigenar y homogeneizar la masa de agua y un sistema para calentar y controlar la temperatura del agua con el objetivo de favorecer los procesos de degradación al trabajar a una temperatura determinada.

El biorreactor incorpora un sensor dentro del tanque para medir parámetros como el pH, el oxígeno disuelto, el potencial redox, la conductividad o la temperatura. A su vez, dispone de diferentes entradas para la incorporación de nutrientes y aditivos, así como de salidas adicionales para la toma de muestras.

Tras la realización de las pruebas de funcionamiento en agosto de 2024, se llevó a cabo una caracterización inicial del agua de los sondeos situados en el entorno, que constó de siembras microbiológicas, perfiles de conductividad y análisis de contaminantes. El sondeo seleccionado para el ensayo inicial fue el P177.

El primer ensayo piloto en el biorreactor se planificó para replicar los ensayos aeróbicos del miniBio de laboratorio, estudiando la adición de fósforo, nitrógeno y carbono para incentivar el crecimiento microbiano en el interior del biorreactor.

Los días 16 a 21 de octubre de 2024 se llevó a cabo el llenado del biorreactor con agua de P177 para comenzar el primer ensayo y se introdujeron en el biorreactor biosoportres (0,2 m³) para facilitar la generación de biofilms y con ello, la proliferación de microorganismos. El mismo día 21 se efectuó el muestreo de condiciones iniciales, para analizar:

- Contaminantes principales y nutrientes, en el laboratorio de Pirenarium.
- Siembras microbiológicas, en el laboratorio de Bailín.
- Secuenciación de ADN y análisis de genes funcionales (NGS y QuantArray Chlor), en el laboratorio especializado Microbial Insights.

Figura 69. Muestreo de condiciones iniciales y análisis microbiológicos



Tras el análisis inicial se llevaron a cabo las siguientes tareas:

- Medición de parámetros fisicoquímicos: control de la temperatura del agua (25°C) y el oxígeno disuelto (>60%).
- Inyección de nutrientes: una vez cada dos semanas inyección de solución nutriente a base de dextrosa, fosfato diamónico y urea preparada con agua destilada en el laboratorio de microbiología para ajustar las concentraciones de carbono, nitrógeno y fósforo en el agua del biorreactor con el objetivo de mantener una relación C:N:P de 100:10:1 óptima para el desarrollo microbiano.
- Muestras de control de nutrientes: mediciones realizadas cada 2 días para conseguir una relación de C:N:P de 100:10:1, y determinar la frecuencia de las inyecciones según su curva de consumo.
- Muestras para análisis de contaminantes: cada 7-10 días para analizar contaminantes en el laboratorio Pirenarium.
- Siembras microbiológicas: cada 7-10 días en condiciones aeróbicas. Para las siembras se utiliza un medio genérico (MG) a base de Plate Count Agar y un medio mínimo (MM) a base de Bushnell Haas Agar y una dilución de contaminantes del emplazamiento.

Figura 70. Siembras microbiológicas asociadas al ensayo del biorreactor aeróbico de campo



El ensayo ha estado en marcha hasta el mes de febrero de 2025, estando los resultados del mismo en análisis en la actualidad.

Anexo A Red de control de niveles

Anexo B Inventario

Anexo C Reportaje fotográfico

Anexo D Planos

Anexo E Perforación de sondeos

Anexo F Ensayo de bombeo

Anexo G Ensayo de trazadores

