

A large, stylized letter 'C' in a dark blue color, with a teal gradient on its right side, framing the central text.

CETAQUA

CENTRO TECNOLÓGICO DEL AGUA

**Estudio para la identificación y
restauración de pasivos mineros en la
provincia de Huelva**

Laura Díaz, Cetaqua

Carlos Echevarría, Cetaqua

Jose Luís Cortina, Cetaqua

ÍNDICE:

1. Antecedentes y alcance.	4
2. Inventario de los pasivos mineros históricos abandonados en el perímetro definido.	6
3. Evaluación del impacto de los lixiviados mineros en la cuenca del Odiel.	11
3.1. Caracterización de lixiviados	12
3.2. Evaluación del impacto actual en los recursos hídricos que llegan a la presa	18
Riotinto	19
San Telmo	20
La Zarza	25
Tharsis	27
4. Soluciones de remediación de los pasivos mineros	31
4.1. Tratamientos activos	31
4.1.1. Sistemas fisicoquímicos y membranas	31
4.1.2. Sistemas biológicos	34
4.2. Tratamientos pasivos	35
4.3. Otras estrategias de remediación	38
4.3.1. Tecnosuelos	38
4.3.2. Dry Covers	39
4.3.3. Autodepuración	41
4.4. Evaluación económica de los tratamientos de remediación evaluados.	43
5. Propuestas de remediación y evaluación económica de los escenarios definidos	45
- FASE 1: Remediación de los pasivos mineros de RioTinto, Tharsis, San Telmo y La Zarza	46
RioTinto	46
San Telmo (Subcuenca Oraque)	47
La Zarza (Subcuenca Olivargas)	47
Tharsis (Subcuenca Meca)	47
Coste Total Fase 1	48
- FASE 2: Remediación del resto de pasivos mineros históricos abandonados del perímetro de estudio.	49
6. Conclusiones y próximos pasos	52

7. Referencias bibliográficas	54
8. Anexos	59
- A.1. Descripción, fichas técnicas y cartografía de las estructuras mineras	60
- A.2. Cálculo de la carga contaminante de los principales focos de contaminación con respecto a la carga total transportada por el Odiel	118
- A.3. Descripción de tratamientos pasivos	121
A.3.1. Humedales aerobios	121
A.3.2. Humedales anaerobios o balsas orgánicas	122
A.3.3. Drenaje anóxico calizo (ALD).	123
A.3.4. Sistema de producción sucesiva de alcalinidad (SAPS).	124
A.3.6. Sustrato Disperso Alcalino	125

1. Antecedentes y alcance.

La explotación minera a lo largo de miles de años en la Franja Pirítica Ibérica (FPI) ha dado lugar a que en la actualidad sea un área particularmente afectada por la presencia de residuos ricos en sulfuros, causantes de la generación de drenajes ácidos de mina (AMD) cuando estos minerales se exponen a las condiciones atmosféricas. Las reacciones de oxidación asociadas provocan la liberación de sulfatos, acidez y elevadas concentraciones de metales (Fe, Al, Cu, Mn, Pb, Zn, etc.) que finalmente impactan en las cuencas de los ríos Odiel, Tinto, Chanza y Guadamar.

El presente estudio tiene como objetivo la identificación de los principales focos de contaminación consecuencia de la minería histórica en la FPI que afectan a la cuenca del río Odiel, así como una propuesta de soluciones de remediación para mitigar el potencial impacto contaminante sobre los recursos hídricos y las futuras infraestructuras de regulación proyectadas. En el caso de las explotaciones mineras en activo en la actualidad, ya cuentan con las soluciones tecnológicas para cumplir con el vertido cero en sus procesos.

La Figura 1 engloba la red hidrográfica de la cuenca del río Odiel, en la que se pueden diferenciar cuatro subcuencas: Oraque, Meca, Olivargas y Odiel. El estudio también abordará el impacto asociado a las minas de Riotinto, ya que, aunque el Proyecto Riotinto está en la divisoria entre la cuenca del Tinto y la del Odiel, las superficies pasivas históricas correspondientes a esta mina se encuentran en la cuenca del Odiel. En las proximidades de estas escombreras nace el río Tintillo, el cual desemboca en el Agrío que posteriormente desemboca en el Odiel, constituyendo otro foco de contaminación a tener en cuenta para su mitigación, actualmente parte de esta contaminación ya está mitigada al encontrarse dentro del Proyecto Riotinto.

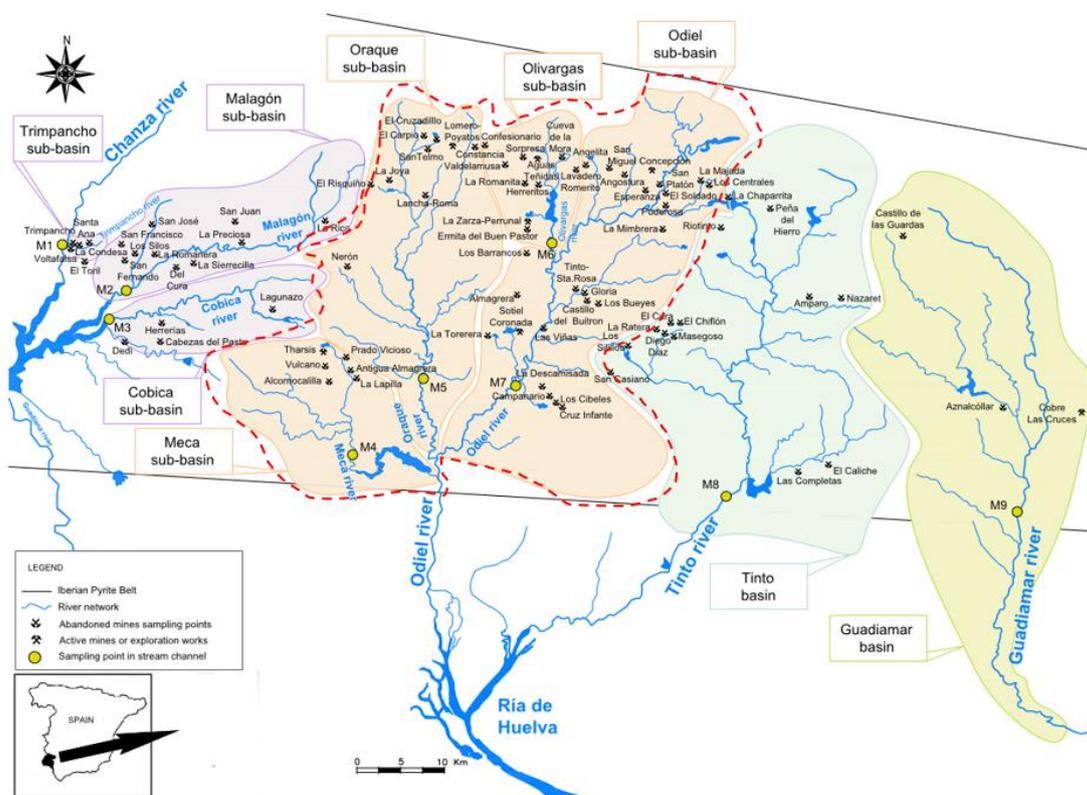


Figura 1 Mapa de la red hidrográfica de la cuenca del Odiel

La cuenca del río Odiel tiene una superficie de 2300 km² y una longitud de 140 km, desembocando en su tramo final al estuario de la ría de Huelva junto con el río Tinto. (Olías et al., 2018). Representa el 48% del área total ocupada por antiguas operaciones mineras (abandonadas o reabiertas). Por otro lado, el río Tinto nace en Peña del Hierro con características ácidas y contenido metálico. El Proyecto Riotinto ha reducido desde el inicio de la actividad un 86% su aporte. La zona aguas abajo del Proyecto Riotinto Zaranda Nayas supone un importante foco.

En la Tabla 1 se refleja el impacto de los drenajes ácidos de minas en la calidad de las aguas de algunos tramos de la cuenca del río Odiel, sobre la cual se centralizará este estudio. A través de estos parámetros medidos por J.M. Nieto et al., (2013) se puede observar un fuerte incremento de la acidez, concentración de sulfatos y metales pesados.

Tabla 1 Parámetros fisicoquímicos medios para el río Odiel antes y después de la afección por AMD (NIETO, Jose M. et al., 2013).

Cuenca del Odiel		
Parámetro	Sin contaminación por AMD	Contaminación por AMD
pH	8,42	3 ,69
Eh (mV)	393	622
CE (mS/cm)	0,31	2,57
OD (% sat)	-	88,9
Al (mg/L)	< limite detección	103
As (µg/L)	2,74	215
Ca (mg/L)	28,8	81,6
Cd (µg/L)	< limite detección	136
Co (µg/L)	8,91	965
Cr (µg/L)	< limite detección	17,7
Cu (mg/L)	< limite detección	11,7
Fe (mg/L)	< limite detección	153
Fe(II) (mg/L)	< limite detección	65,8
Fe(III) (mg/L)	< limite detección	82,2
K (mg/L)	2,20	1,81

Mg (mg/L)	13,0	199
Mn (mg/L)	< limite detección	2 1,9
Na (mg/L)	14,8	21,4
Ni (µg/L)	< limite detección	585
Pb (µg/L)	< limite detección	1 10
Si (mg/L)	3,04	12,3
Zn (mg/L)	< limite detección	5 1,2
SO₄²⁻ (mg/L)	22,0	2122
Cl (mg/L)	16,6	15,5
HCO₃ (mg/L)	167	30,1
CO₃ (mg/L)	6,86	-

La alcalinidad de la cuenca neutraliza parcialmente los primeros efluentes ácidos, provocando la precipitación del Fe (III) y el As como oxihidróxidos de Fe (III) (schwertmannita), y el Al, Cu, Sc, Y y tierras raras precipitan como oxihidróxidos de Al (basaluminita). Sin embargo, otros metales divalentes como el Zn, Mn, Co, Ni y Cd permanecen en disolución. Aguas abajo, debido al agotamiento progresivo de su alcalinidad, la calidad de estos ríos se puede ver afectada en función de la variabilidad del caudal (principalmente ligada a las condiciones meteorológicas), al efecto de la dilución y a la capacidad autodepurativa del río.

2. Inventario de los pasivos mineros históricos abandonados en el perímetro definido.

En la Tabla 2 se expone el inventario de minas pertenecientes al perímetro de estudio definido para la cuenca del Odiel, indicando el estado y tipo de cada mina (Olías et al., 2018; Grande, 2016), el caudal de lixiviados ácidos que generan y su potencial contaminante. La clasificación del potencial contaminante de cada mina viene determinado por el grado de impacto a la calidad final de las aguas que tienen los aportes de acidez y metales, siendo alto para las minas que suponen el foco de contaminación más grave para la recuperación de la cuenca del Odiel (Tharsis, La Zarza y San Telmo), relevante para las minas que presentan un aporte de contaminantes importante aunque bastante menor en comparación con las anteriores, y bajo para las minas cuyo grado de contaminación presenta una afección mayoritariamente a escala local. En el caso de Riotinto, ha sido históricamente el primer foco de contaminación de la cuenca del Odiel, no obstante, en la actualidad, debido a que la remediación de esta zona se encuentra dentro del plan de restauración del Proyecto Riotinto (el cual ya se encuentra iniciado) su impacto al río ha disminuido considerablemente desde el inicio de la actividad.

En el Anexo A.1. se puede encontrar información más al detalle de cada uno de los focos de contaminación, además de fichas técnicas y cartografías de las estructuras mineras de cada uno de ellos (Olías et al., 2018; Grande, 2016)

Tabla 2 Inventario de las minas del perímetro de estudio y caudal de lixiviados que impactan en la cuenca del Odiel (Olías et al., 2018; Macías et al., 2021; Sánchez et al., 2005; González et al., 2018)

Mina	Estado	Tipo	Caudal (L/s)	Potencial contaminante
Divisoria entre Cuenca Odiel y Tinto				
Riotinto	Activa (Plan de Restauración Proyecto Riotinto)	Cielo Abierto -Corta Cerro Colorado (En explotación) -Corta Atalaya (No se encuentra en operación)	Actualmente sólo presenta aguas difusas procedentes de las escombreras fuera del PRT	Alto (1º potencial contaminante histórico, en la actualidad tienen un impacto mucho menor debido a las labores del PRT)
Subcuenca Meca				
Mina Tharsis	Abandonada	Cielo abierto	Filón Centro: 0,94 [5]	Alto (2º potencial contaminante)
			Filón Sur: 0,98 estiaje 12 en periodos de precipitación [5]	
			Arroyo de la Tiesa: 2,2 estiaje 12,28 en periodos de precipitación [5]	
Mina Antigua almagrera	Abandonada	Cielo abierto	No se dispone de datos	Bajo
Mina Vulcano	Abandonada	Cielo Abierto	Sólo se generan lixiviados en periodos de precipitación [1]	Bajo
Mina Prado Vicioso	Abandonada	Subterránea	No presenta descarga localizada, los lixiviados que se generan son de bajos caudales.	Bajo
Mina La Lapilla	Abandonada	Cielo abierto	12,2[1]	Relevante
Subcuenca Olivargas				
Mina La Zarza	Proyecto reapertura	Cielo abierto	1 [2]	Alto (3º potencial contaminante)
Mina de Aguas Teñidas	Activa	Subterránea	2 [2]	Cuenta con una planta de tratamiento activo para la neutralización de

Mina	Estado	Tipo	Caudal (L/s)	Potencial contaminante
				los lixiviados ácidos
Mina Confesionario	Abandonada	Cielo abierto	2 [2]	Relevante
Mina Concepción	Abandonada	Cielo abierto	4 L/s [1]	Relevante
Subcuenca Oraque				
Mina San Telmo	Abandonada	Cielo abierto	28,3 [1]	Alto (4º potencial contaminante)
Mina El Carpio	Abandonada	Cielo abierto	15,3 [1]	Relevante
Mina La Joya	Abandonada	Cielo abierto	No se dispone de datos	Relevante
Mina Lomero-Poyatos	Proyecto reapertura	Cielo abierto	4 [1]	Relevante
Subcuenca Odiel				
Mina Angelita	Abandonada	Cielo abierto	0,3 [1]	Bajo
Mina Angostura	Abandonada	Cielo abierto	0,4 [2] Sin descargas ácidas relevantes.	Relevante
Mina Almagrera	Acciones de restauración	-	3,9 [1]	Cuenta con una planta de tratamiento activo para la neutralización de los lixiviados ácidos
Mina Campanario	Abandonada	Cielo abierto	Surgencias ácidas de bajo caudal (<0.5L/s) [1]	Relevante
Mina Castillo del Buitrón	Abandonada	Cielo abierto	No se dispone de datos	Relevante
Mina Cruz Infante	Abandonada	Subterránea	No se dispone de datos	Bajo
Mina Cueva de la Mora	Abandonada	Cielo abierto	3,5 [2] Sin descargas ácidas significativas. (Olías y Nieto) Presenta contaminación difusa	Relevante

Mina	Estado	Tipo	Caudal (L/s)	Potencial contaminante
Mina El Soldado	Abandonada	Cielo abierto	2 [2]	Bajo
Mina Esperanza	Abandonada	Cielo abierto	2,2 [2] Presenta contaminación difusa	Relevante
Mina Gloria	Abandonada	Cielo abierto	1 [2]	Bajo
Mina La Descamisada	Abandonada	Cielo abierto	Lixiviados de bajos caudales [1]	Bajo
Mina La Torerera	Abandonada	Cielo Abierto	1 [2]	Relevante
Mina El Perrunal			1 [1]	Relevante
Mina Los Bueyes	Abandonada	Cielo Abierto	No se dispone de datos	Bajo
Mina Poderosa	Abandonada	Cielo Abierto	Aproximadamente 1,3 L/s En periodos de precipitación: 11L/s [2]	Relevante
Mina San Miguel	Abandonada	Cielo Abierto	1,5 [2]	Relevante
Mina San Platón	Abandonada	Cielo Abierto	Estiaje: 0,2 Periodos lluviosos: >20 [1]	Relevante
Mina Sorpresa	Abandonada	Subterránea	No se dispone de datos	
Mina Sotiel Coronada (Complejo minero)	Proyecto reapertura	Cielo abierto	130 [3]	Relevante
Mina Tinto-Santa Rosa	Abandonada	Cielo abierto	0,7 [1]	Relevante
Mina Las Viñas	Abandonada	Cielo abierto	No se dispone de datos	Se están realizando labores de restauración

[1] Manuel Olías Álvarez, Jose Miguel Nieto Liñán, Francisco Macías Suarez. 2018. PROPUESTA PARA EL PLAN DE RESTAURACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN MINERA EN LA CUENCA DEL RÍO ODIEL. Universidad de Huelva : s.n., 2018.

[2] Macías, Francisco, et al. "A geochemical approach to the restoration plans for the Odiel River basin (SW Spain), a watershed deeply polluted by acid mine drainage." Environmental Science and Pollution Research 24.5 (2017): 4506-4516.

[3] Espana, Javier Sánchez, et al. "Acid mine drainage in the Iberian Pyrite Belt (Odiel river watershed, Huelva, SW Spain): geochemistry, mineralogy and environmental implications." *Applied geochemistry* 20.7 (2005): 1320-1356

[4] González, Raúl Moreno, et al. "Hydrological characterization and prediction of flood levels of acidic pit lakes in the Tharsis mines, Iberian Pyrite Belt." *Journal of Hydrology* 566 (2018): 807-817

[5] Fuente: Tharsis Mining

3. Evaluación del impacto de los lixiviados mineros en la cuenca del Odiel.

La cuenca del Odiel, como se ha indicado en los apartados anteriores, recibe aportes de las escorrentías de lixiviados de un número significativo de pasivos mineros (Tabla 2). La afección de drenajes ácidos de minas a los ríos produce un importante desequilibrio en la geoquímica del agua y la biota, incorporando sulfatos y metales al medio.

En el presente apartado se llevará a cabo una caracterización físico-química, la cual está basada en referencias bibliográficas ya que no se han llevado a cabo medidas in situ, de los drenajes ácidos de minas que impactan a la cuenca del Odiel, haciendo hincapié en los principales focos de contaminación, con la finalidad de establecer un plan de tratamiento posterior para la mejora de la calidad hidrogeoquímica de la cuenca del río Odiel.

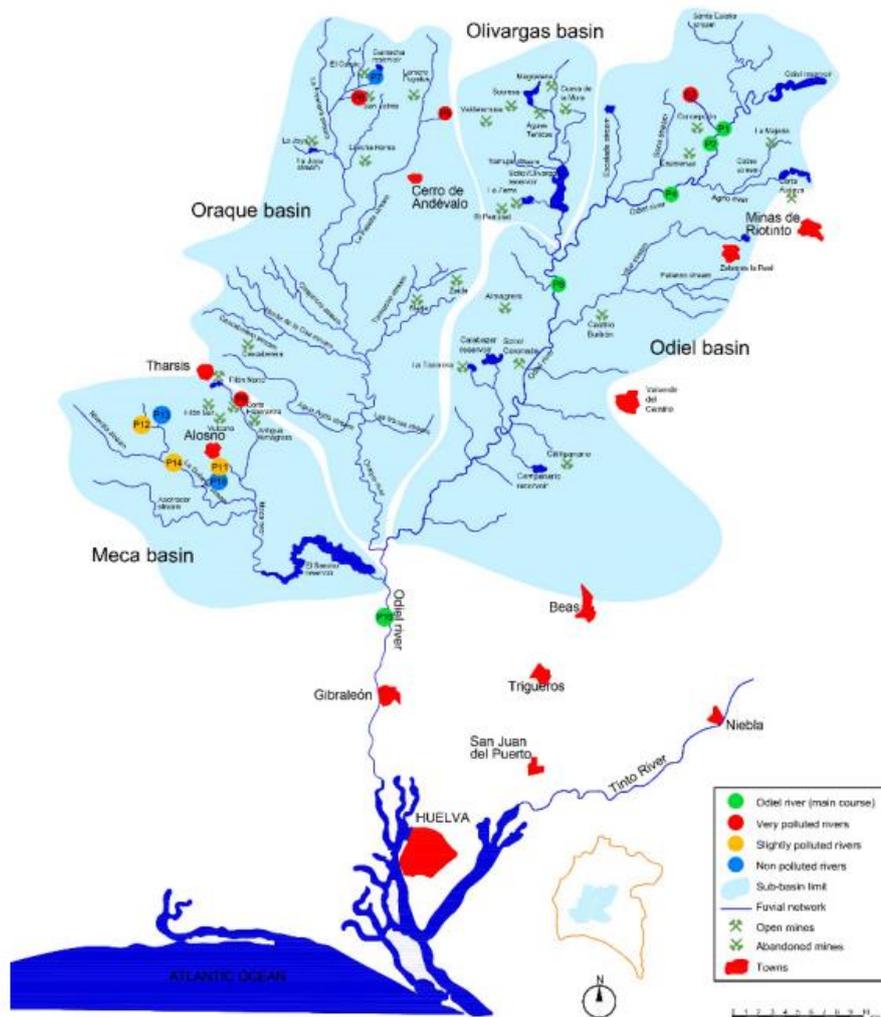


Figura 2 Mapa de la red fluvial de la cuenca del Odiel indicando el grado de contaminación de los ríos (Grande et al., 2021)

La Figura 2 muestra el mapa de la red fluvial de toda la cuenca del Odiel, indicando el grado de contaminación de los ríos que la constituyen. Se observa que los ríos cercanos a las minas de Tharsis, San Telmo, Lomero-Poyatos y Mina Concepción presentan los

niveles más altos de contaminación. Por otro lado, las minas de Riotinto han supuesto históricamente un importante foco de contaminación para el río Odiel, ya que el arroyo Tintillo recibe las aguas ácidas procedentes de estas minas, previo a su confluencia con el río Odiel, por ello, la caracterización hidroquímica del río Tintillo también será objeto de estudio. En la actualidad, ya se encuentra iniciado un plan de remediación del complejo minero de Riotinto por parte de Atalaya Mining.

3.1. Caracterización de lixiviados

En la Tabla 3 se muestran las superficies para las subcuencas del perímetro de estudio (subcuencas del Odiel), así como los valores medios de los parámetros fisicoquímicos obtenidos para cada área considerada en el estudio tras ser afectada por el drenaje ácido de minas (J.A. Grande et al., 2018).

En la Tabla 3 y la Tabla 4 se comparan los valores de cada parámetro en periodo de estiaje y de precipitación. En general, los valores de pH son más bajos en el periodo de estiaje que en la época de lluvias para todos los ríos. El aporte de agua de lluvia limpia a los cauces produce una dilución del río, lo que se traduce en un aumento del pH. Del mismo modo, las concentraciones de metales, arsénico, sulfatos y los valores de conductividad y sólidos en suspensión son mayores en verano.

Tabla 3 Características fisicoquímicas de las subcuencas en periodo de estiaje

Parámetro	Meca	Oraque	Olivargas	Odiel
Extensión (ha)	383,6	132,3	136,5	636,7
pH	2,33	2,84	2,83	3,12
CE (µS/cm)	2,910	2,680	4,700	2,810
SST (mg/L)	1,836	1,728	3,010	1,799
Fe(mg/L)	43,18	26,28	91,97	11,03
Cu(mg/L)	15,01	4,91	10,27	6,74
Cd(mg/L)	0,73	0,64	1,09	0,68
Mn(mg/L)	22,92	1,71	16,77	15,25
Co(mg/L)	0,24	0,13	0,21	0,04
Ni(mg/L)	28,24	0,91	2,38	1,10
As(mg/L)	8,39	0,29	2,09	0,18
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	1,656	1,920	2,000	1,596

Tabla 4 Características físico-químicas de las subcuencas en periodo de lluvias

Parámetro	Meca	Oraque	Olivargas	Odiel
Extensión (ha)	383,6	132,3	136,5	636,7
pH	2,57	2,93	3,25	3,41
CE (µS/cm)	746	302	1521	382
SST (mg/L)	475	193	1123	244
Fe(mg/L)	34,13	4,90	22,1	1,46
Cu(mg/L)	7,14	1,41	2,98	3,61
Cd(mg/L)	0,038	0,006	0,011	0,025
Mn(mg/L)	6,54	0,08	3,92	4,75
Co(mg/L)	0,531	0,052	0,089	0,101
Ni(mg/L)	0,193	0,006	0,2	0,022
As(mg/L)	0,007	0,001	0,001	0,005
SO₄²⁻ (mg/L)	720	188	430	384

En general, el comportamiento dinámico del cauce responde a la suma de estímulos externos provocados por las lluvias. Cuando se producen altas precipitaciones, los aportes son abundantes y modifican los valores de pH, oxígeno disuelto o el potencial redox. Por el contrario, cuando no llueve, no hay aportes de agua limpia y la precipitación de sales se produce a expensas de los solutos presentes en el agua. Parte de la carga contaminante se elimina del medio acuático que va a formar la fase sólida, y todo ello está sujeto a la formación de nuevas especies minerales reguladas por el pH, el oxígeno disuelto o el potencial redox.

Se observan variaciones de conductividad significativas, en las que influyen principalmente los sulfatos y los sólidos en suspensión. Esto ocurre en ausencia de cloruros, que son potencialmente responsables de aumentos de conductividad que podrían enmascarar las relaciones de dependencia entre ésta y los sulfatos, como suele ocurrir en un medio estuarino dentro de la zona de influencia de las mareas en coexistencia con procesos fluviales de drenajes ácidos de minas (Grande et al., 2018).

En la Tabla 5 se expone una caracterización de los principales parámetros de calidad asociados a los focos de contaminación que impactan en la cuenca del Odiel. Se muestran los valores de pH, conductividad, sulfatos y concentración media de metales para cada una de las minas que se encuentran dentro del perímetro de estudio del presente informe (Ostalé, 2014).

En el caso de los lixiviados ácidos de las minas el Perrunal y Prado Vicioso no se dispone de datos para su caracterización.

Tabla 5 Caracterización de los principales focos de lixiviados de los pasivos mineros identificados que impactan en la cuenca del Odiel (Ostalé, 2014)

Mina	Fe (mg/L)	Cu (mg/L)	Pb (mg/L)	Cd (mg/L)	Zn (mg/L)	Mn (mg/L)	Co (mg/L)	Ni (mg/L)	Mg (mg/L)	Ca (mg/L)	Al (mg/L)	As (mg/L)	Sb (mg/L)	pH	Cond (μ S/cm)	TDS (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)
Riotinto	74,210	68,530	0,782	2,540	8,211	28,740	12,510	1,088	6,439	8,159	0,049	1,277	0,002	2,01	41300	26400	3850
Subcuenca Meca																	
Mina Tharsis	63,090	23,150	0,028	1,584	12,760	12,900	0,592	0,462	1,147	14,040	0,174	0,181	0,014	2,36	1454	929	3591 - 8529
Mina Antigua almagrera	69,690	6,798	0,155	0,158	7,020	8,750	0,837	0,406	66,960	13,580	0,621	2,527	0,181	2,22	2430	1558	2875
Mina Prado Vicioso	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mina La Lapilla	5,020	0,888	0,275	0,138	2,201	2,778	0,165	0,032	74,550	4,171	0,675	0,206	0,056	2,92	379	242	NA
Subcuenca Olivargas																	
Mina La Zarza	73,480	20,170	0,143	0,165	6,017	7,923	0,517	0,770	0,370	5,326	0,037	4,132	0,333	2,53	2340	1494	2525 - 7980
Mina de Aguas Teñidas [3]	199	16	0,166	0,229	60	7	0,83	0,212	62	54	47	0,283	-	3,1	1950	-	NA
Mina Confesionario	69,450	0,388	-	1,522	0,644	0,632	1,102	0,006	0,102	11,050	0,170	0,115	0,011	2,23	5390	3450	2425
Mina Cueva de la Mora	29,420	1,365	3,318	0,135	0,604	0,473	0,070	0,035	39,220	41,370	0,420	0,051	0,013	2,42	352	225	NA
Subcuenca Oraque																	

Mina	Fe (mg/L)	Cu (mg/L)	Pb (mg/L)	Cd (mg/L)	Zn (mg/L)	Mn (mg/L)	Co (mg/L)	Ni (mg/L)	Mg (mg/L)	Ca (mg/L)	Al (mg/L)	As (mg/L)	Sb (mg/L)	pH	Cond (µS/cm)	TDS (mg/L)	SO ₄ ⁻² (mg/L)
Mina San Telmo	67,410	63,720	0,001	1,614	7,788	28,000	1,380	0,967	6,348	35,930	0,190	0,042	0,018	2,61	3010	1935	1970 - 8926
Mina La Joya	44,320	2,414	0,121	0,159	5,824	11,760	0,185	0,055	58,990	6,709	0,520	0,021	0,010	2,87	691	443	NA
Mina El Carpio	67,540	2,826	0,095	0,162	6,255	4,939	0,234	0,134	86,560	44,310	0,671	0,097	0,115	2,48	1226	782	NA
Mina Lomero-Poyatos	55,090	11,880	0,047	1,190	7,012	4,612	0,033	0,002	13,310	24,760	0,552	0,655	0,008	2,81	1114	714	NA
Subcuenca Odriel																	
Mina Angelita	0,243	6,838	0,196	0,941	4,723	1,209	0,032	0,016	0,286	9,590	0,549	0,007	0,001	2,8	389	250	NA
Mina Angostura	0,321	6,472	-	0,720	0,403	0,758	0,044	0,044	27,600	12,710	0,564	0,007	0,008	3,58	1231	788	NA
Mina Almagrera	71,990	73,140	0,035	1,147	8,055	17,060	2,272	1,663	27,260	84,560	1,140	0,980	0,035	2,3	800	1476	NA
Mina Campanario	69,470	33,950	0,003	0,415	7,568	6,765	0,102	0,108	0,104	10,420	0,036	0,033	0,050	2,52	6480	4100	2475
Mina Castillo del Buitrón	39,800	2,183	0,008	0,001	5,227	2,168	-	0,627	65,310	6,088	0,410	0,033	-	4,58	631	282	NA
Mina Concepción	42,490	17,270	0,328	1,490	0,646	2,850	0,022	0,006	0,204	15,590	0,796	0,201	0,014	2,78	791	508	NA
Mina Confesionario	69,450	0,388	-	1,522	0,644	0,632	1,102	0,006	0,102	11,050	0,170	0,115	0,011	2,23	5390	3450	2425
Mina Cruz Infante	0,349	0,069	-	0,568	0,513	0,027	0,034	0,434	5,665	22,590	1,195	0,020	0,001	5,53	134	84	NA

Mina	Fe (mg/L)	Cu (mg/L)	Pb (mg/L)	Cd (mg/L)	Zn (mg/L)	Mn (mg/L)	Co (mg/L)	Ni (mg/L)	Mg (mg/L)	Ca (mg/L)	Al (mg/L)	As (mg/L)	Sb (mg/L)	pH	Cond (µS/cm)	TDS (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)
Mina El Soldado	147	5	0,089	0,042	8	1	0,371	< LD	30	31	33	0,031	-	2,5	1800	-	NA
Mina Esperanza	67,370	45,220	0,013	1,108	7,070	5,202	0,357	0,158	3,827	21,450	0,269	1,500	0,011	2,7	1480	946	2440
Mina Gloria	52,850	56,340	0,015	0,931	5,277	3,400	0,486	0,202	6,821	3,660	0,326	0,055	0,001	2,9	2100	1620	NA
Mina La Descamisada	0,313	8,539	0,122	0,619	1,931	5,090	0,045	0,063	3,725	54,430	0,760	0,696	0,003	3,42	914	585	NA
Mina La Torerera	11,160	2,171	0,032	1,352	2,426	5,568	0,022	0,009	77,190	6,640	0,733	0,106	0,001	3,1	1120	724	NA
Mina El Perrunal	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mina Los Bueyes	45,800	10,483	0,015	0,010	5,227	0,168	-	0,366	5,310	3,088	0,310	0,053	-	3,5	1250	825	NA
Mina Poderosa	72,810	73,490	0,213	1,231	7,798	4,117	2,025	0,320	7,205	10,720	0,768	0,879	0,165	2,05	6410	4100	2700
Mina San Miguel	71,190	23,250	-	1,646	2,743	3,048	0,927	0,047	59,760	37,600	0,143	0,584	0,009	2,32	2960	1892	2580
Mina San Platón	0,269	40,270	0,188	1,390	7,629	1,647	0,032	0,028	28,990	66,950	0,444	2,384	0,012	2,61	1053	682	NA
Mina Sorpresa	4,300	1,245	-	0,983	0,541	6,126	0,031	0,021	3,309	36,980	0,514	0,028	0,009	3,1	91	614	NA
Mina Sotiel Coronada (Complejo minero)	72,490	32,900	0,721	1,633	5,168	19,310	1,524	1,363	79,900	13,130	0,422	1,158	3,326	4,58	4130	2640	NA
Mina Tinto-Santa Rosa	65,790	52,820	-	0,517	7,663	19,340	1,004	0,916	1,414	11,260	0,614	-	0,011	3,58	3530	2260	1510

Mina	Fe (mg/L)	Cu (mg/L)	Pb (mg/L)	Cd (mg/L)	Zn (mg/L)	Mn (mg/L)	Co (mg/L)	Ni (mg/L)	Mg (mg/L)	Ca (mg/L)	Al (mg/L)	As (mg/L)	Sb (mg/L)	pH	Cond (μ S/cm)	TDS (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)
Mina Vulcano	0,099	0,988	0,518	0,141	0,840	1,246	0,098	0,023	2,642	34,670	0,620	0,108	0,013	3,8	151	96	125
Mina Las Viñas	62,140	16,150	0,021	1,833	5,529	2,319	0,027	0,050	9,509	26,730	0,625	0,004	0,010	2,57	2500	1601	990

3.2. Evaluación del impacto actual en los recursos hídricos que llegan a la presa

Tras realizar una evaluación de la carga de contaminantes que transportaría cada foco de contaminación al río Odiel (para lo cual se han tenido en cuenta los valores medios de contaminantes disueltos que aportaría foco de estudio y los valores medios de contaminantes totales transportados por el río Odiel, ambos basados en datos bibliográficos-Anexo A.2.-), se ha visto que las minas de Riotinto, San Telmo, Tharsis y La Zarza suponen los principales focos de contaminación de la carga contaminante que afecta a la calidad del agua de la cuenca del Odiel (Olías et al.,2018; Galván y Olías, 2015). Estos datos son válidos hasta 2019/2020, en la actualidad el impacto de la contaminación originada por las minas de Riotinto ha disminuido considerablemente debido a las acciones que ya se han iniciado del Plan de Restauración del Proyecto Riotinto por parte de Atalaya Mining, esta reducción a cierre de 2021 se encuentra en torno a un 62% sobre la carga contaminante del Odiel (Información proporcionada por Atalaya Mining). Por ello, aunque las minas de Tharsis, La Zarza y San Telmo continúen siendo los focos más importantes de contaminación, este dato del aporte de la carga contaminante debe tomarse como un valor meramente orientativo.

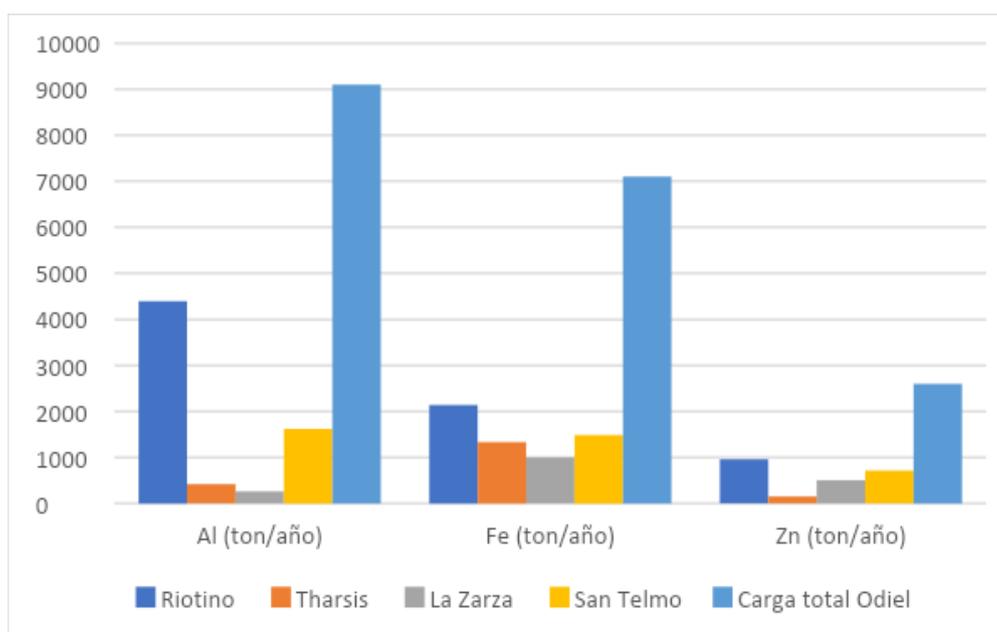


Figura 3 Carga total de Al, Fe y Zn para las minas de Riotinto, Tharsis, La Zarza y San Telmo con respecto a la carga total transportada por el Odiel (Anexo A.2.)

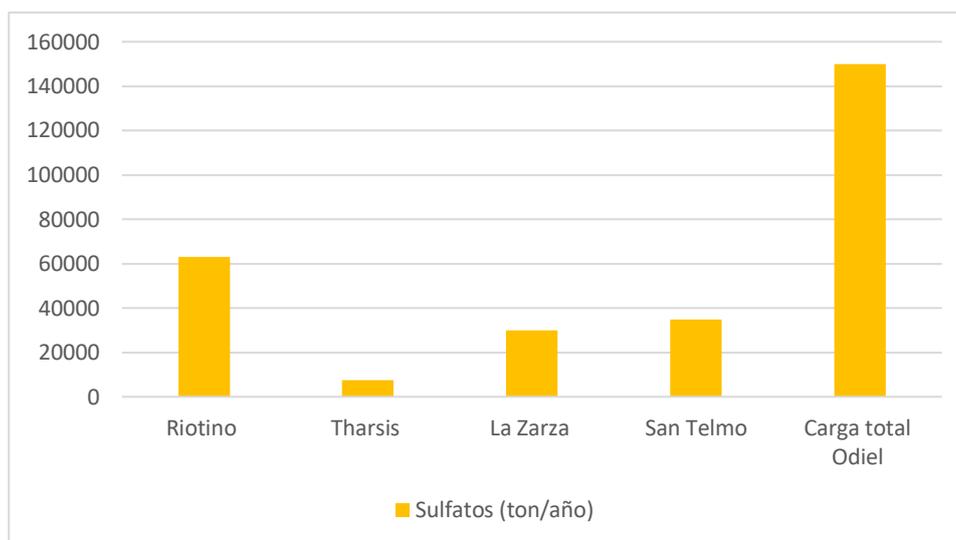


Figura 4 Carga total de sulfatos aportada por Riotinto, Tharsis, La Zarza y San Telmo al río Odiel (Anexo A.2.)

A continuación, se describen los distintos puntos de generación de lixiviados que impactan en el Odiel para cada uno de los principales focos de contaminación:

Riotinto

El río Tintillo recibe los drenajes y aguas difusas procedentes de las escombreras pasivas que están fuera del Plan de Restauración de Riotinto, los cuales se caracterizan por unos valores de pH muy ácidos (entre 2,5 y 2,6) y una elevada conductividad eléctrica, que varía entre 9000 y 9500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Las condiciones redox están influenciadas principalmente por la tasa de oxidación de Fe^{2+} a Fe^{3+} , y presentan valores de aproximadamente 575 mV, los cuales son característicos de ambientes acuosos oxidados. Este río se funde con el arroyo Agrio, que a su vez desemboca en el Odiel previo a su desembocadura en la ría de Huelva, y constituye el foco de contaminación más influyente sobre esta cuenca.

Como se ha comentado anteriormente, el impacto del río Tintillo a la cuenca del Odiel en la actualidad ha disminuido de manera relevante, ya que ya se han iniciado labores de remediación en el área minera de Riotinto por parte de Atalaya Mining (Proyecto Riotinto). Actualmente, ni Corta Atalaya ni el Embalse de Cobre, dos de los principales focos históricos de contaminación de Riotinto, drenan hacia el Tintillo, en el caso de Corta Atalaya, dentro del PRT se selló el túnel que los conectaba, mientras que el Embalse de Cobre se encuentra actualmente en operación, por lo que no drena hacia el Tintillo.

En la Tabla 6 se muestran la superficie de escombreras que quedan fuera del Plan de Restauración de Riotinto, las cuales suponen el único foco de contaminación procedente de este complejo minero que impacta actualmente en el Tintillo.

Tabla 6. Superficie de escombreras fuera del Proyecto Riotinto

Foco contaminación	Superficie (ha)
Escombreras que quedan fuera del Plan de Restauración del Proyecto Riotinto	130,8 ha

San Telmo

Las aguas ácidas liberadas en la mina de San Telmo constituyen una de las principales fuentes de contaminantes de la zona y suponen la degradación del río Oraque, afluente del Odiel (Galván et al., 2016)

La mina de San Telmo cuenta con una corta principal (Figura 6) que se encuentra inundada debido principalmente a los aportes de agua subterránea y a los aportes de la lluvia (Diez Ercilla et al. 2009). El embalse de la corta tiene una profundidad máxima de 130 m aproximadamente y constituye la mayor acumulación de agua ácida de la Franja Pirítica ($8 \times 10^6 \text{ m}^3$).

Existen dos grandes puntos de generación de drenajes de aguas ácidas, situados al noreste y al este. (Figura 5), con una superficie total de $0,76 \text{ km}^2$. En la parte occidental de la corta, se forma una salida de aguas ácidas en forma de arroyo, el cual aguas abajo confluye con otras aguas ácidas de la zona. Por otro lado, las escorrentías de lixiviados generados en las escombreras al noreste de la corta entrarían a la corta por su lado este (Fuentes-López et al., 2022).

Fuentes-López et al., (2022) estudiaron las principales fuentes de aguas ácidas en la mina San Telmo desde febrero de 2018 hasta febrero de 2020. En este estudio se definen cuatro puntos de muestreo diferentes, correspondientes a las zonas más representativas del área minera de San Telmo (Figura 7):

- Punto aguas arriba de la corta (UPL): situado en la zona noreste de la mina San Telmo, aguas arriba de la corta, donde varios pequeños flujos de aguas ácidas de mina emergen de las escombreras de la mina, entrando posteriormente en el lago de la corta.
- Punto desbordamiento de la corta (PL): situado en la superficie de la corta, justo en la zona de desbordamiento.
- Punto aguas debajo de la corta (DPL): situado aproximadamente a 250 m al oeste del lago de la corta.
- Punto situado al final de la zona minera (EPA)

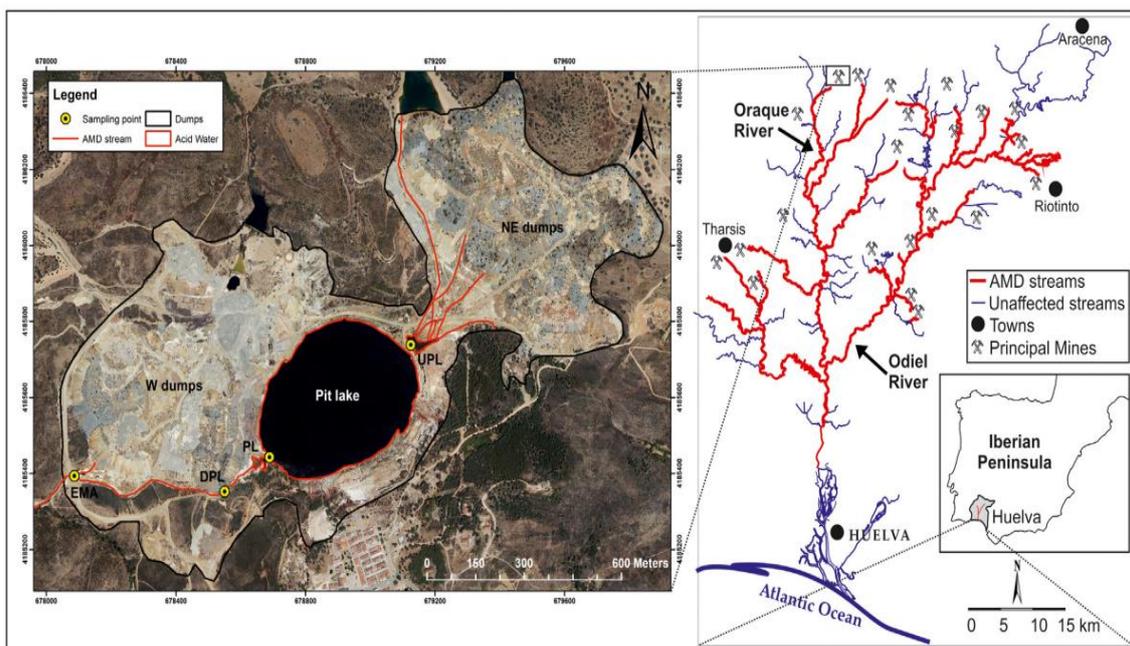


Figura 5. Foto aérea de la mina de San Telmo, indicando la corta principal y escombreras (Fuentes-López et al., 2022)

En la Tabla 8 se muestran los parámetros físico-químicos medidos para cada punto, así como los valores de caudal de drenaje ácido y acidez neta. La zona aguas arriba de la corta registró los valores de caudal más bajos (valor medio de 4,4 L/s), mientras que los valores de los caudales aguas abajo del lago de la corta obtuvieron valores medios de entre 13,4 L/s y 14,2 L/s. En cuanto al pH, se observó una disminución progresiva aguas debajo de la corta, siendo los valores más altos a la entrada de la corta (entre 2,20 y 3,47) y los más bajos al final de la zona minera con valores entre 1,85 y 2,79. Este aumento de la acidez de los lixiviados ácidos de la mina también se hace notar de manera muy representativa a través de la acidez neta, la cual evoluciona desde una concentración media de 1,20 g/L de CaCO_3 aguas arriba de la corta a un valor medio máximo de 4,87 g/L de CaCO_3 para el final de la zona minera. La conductividad también sigue la misma tendencia que el pH y la acidez, con su valor medio más alto en el punto final de la zona minera (9,07 mS/cm). Las condiciones de oxidación más bajas se encontraron aguas arriba y abajo (valores medios entre 620 y 612 mV). Esto puede deberse al mayor tiempo de residencia de las aguas almacenadas en la corta, lo que permite una renovación del oxígeno más eficiente y oxidación del Fe(II) que en las aguas de drenaje en movimiento.

Asimismo, se muestran los resultados de las concentraciones de metales obtenidas en las aguas de drenaje ácido para las diferentes zonas de estudio. Se observa que tanto para los puntos aguas arriba como aguas abajo de la corta, hay un alto contenido de sulfatos en disolución, metales y metaloides, mostrando los valores máximos aguas debajo de la corta (12,9 g/l de sulfatos, 1,7 g/L de Fe, 724 mg/L de Al, 247 mg/L de Zn o 1,9 mg/L de As).

En general, los valores de concentración de metales son más bajos aguas arriba que en el resto de los puntos. Se encuentra un aumento en la propia corta con respecto a la zona aguas arriba, y al final de la zona minera se muestra un notable incremento de las concentraciones de metales.

Tabla 8 Estadística de las analíticas fisicoquímicas y flujos de las aguas de drenaje ácido entre 2018 y 2020 (Fuentes-López et al., 2022)

	Aguas arriba de la corta						Aguas abajo de la corta					
	UPL			Punto de desbordamiento de la corta (PL)			A 250 m del desbordamiento de la corta (DPL)			Punto final zona minera (EMA)		
	Media	Min	Max	Media	Min	Max	Media	Min	Max	Media	Min	Max
CE (mS/cm)	4,56	3,12	7,7	5,34	3,95	6,55	6,21	3,98	9,84	9,07	5,35	12,37
pH	2,84	2,2	3,47	2,48	1,36	2,81	2,43	1,71	3,02	2,36	1,85	2,79
Eh (mV)	620	201	718	734	206	854	675	206	806	612	205	683
Q (L/s)	4,4	0	16,3	-	-	-	13,4	0,03	110	14,2	0,9	117
Acidez Neta (g/L CaCO₃)	1,2	0,6	2,57	1,9	1,56	3,53	2,12	1,41	4,88	4,87	2,3	7,53
Al mg/L	137	71	370	186	165	284	213	160	415	465	210	724
Cu mg/L	13	6	30	24	21	28	28	20	78	65	27	102
Fe mg/l	138	43	357	206	147	230	285	138	1223	997	288	1680
Mg mg/L	444	232	930	533	438	647	515	413	772	805	439	1113
Mn mg/L	34	16	70	45	39	52	44	37	63	69	39	95
Na mg/L	18	11	22	22	17	33	21	15	25	21	16	25
SO₄ mg/L	3398	1802	6822	4523	3822	5270	4843	3828	8773	8926	4842	1293
Si mg/L	27	15	44	36	31	43	43	29	86	54	30	77

Zn mg/L	67	28	148	89	76	110	89	74	175	168	94	247
As µg/L	122	5	622	97	65	149	213	13	1925	200	18	1518
Cd µg/L	147	83	356	203	135	327	215	137	389	420	179	812
Cr µg/L	20	3	218	20	17	24	38	8	119	111	27	514
Ni µg/L	451	194	886	463	186	954	561	98	963	1180	467	2315
Pb µg/L	42	18	125	66	so	105	85	16	186	62	7	195

Aguas debajo de la corta, al final de la zona minera, se recogen todos los contaminantes vertidos por los diferentes drenajes ácidos de la zona de estudio. Los valores medios de la **carga contaminante** para el Fe, Al y Zn fueron 519, 241 y 88 kg/día, respectivamente.

Los principales contaminantes de la zona de estudio (entre el 50 y el 70% para Al, Cd, Mg, Mn, Ni, SO₄ y Zn y más del 70% para Cu, Cr, Fe y V) provienen del drenaje de minas de la zona oeste. Por otro lado, las aguas ácidas correspondientes a la zona del noreste del área minera presentan elevadas concentraciones de Ca, Mg y REE, suponiendo más del 40% de la carga total de esta zona. Las descargas ácidas en la corta suponen menos del 15% de la carga total para la mayoría de los elementos, a excepción de un 54% para el As y un 64% para el Pb. (Fuentes-López et al., 2022)

La Zarza

La superficie de la cuenca del Odiel afectada por la minería de la Zarza es de 128 ha. En la Figura 8 se muestra un esquema de la configuración hidrológica del efluente de lixiviados de la mina de la Zarza aguas abajo. Los lixiviados ácidos de esta mina desembocan, a través de pequeños arroyos, en el barranco de los Cepos, el cual se une a la Rivera del Olivargas aguas abajo del embalse de Olivargas.

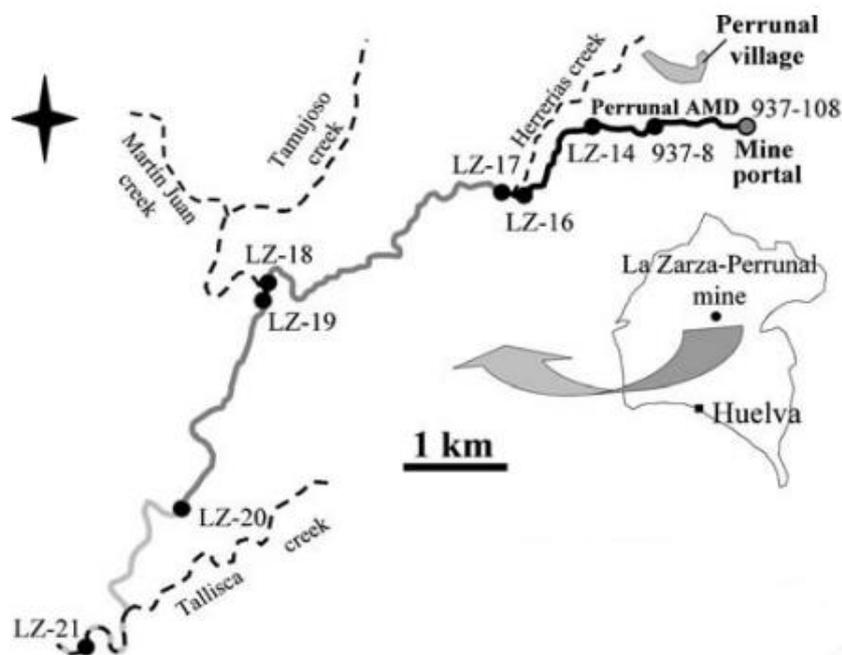


Figura 8 Efluente de lixiviados ácidos de la mina la Zarza (Sánchez et al., 2005)

Sánchez et al. (2005) realizaron un estudio de la caracterización de las aguas ácidas de la mina de la Zarza para este tramo, donde se pueden diferenciar cuatro zonas de muestreo:

- Zona 1: Desde el inicio hasta la confluencia con el arroyo Herrerías: se trata de una zona con pH entre 2,4-3,1, con precipitación de hierro.
- Zona 2: Desde la confluencia con el arroyo Herrerías hasta el punto "LZ-20", continúa siendo una zona de elevada acidez, con valores de pH de entre 2,8 y 3,6.

- Zona 3: Desde el punto “LZ-20” hasta el último punto de muestreo (LZ-21), se trata de una zona de transición, con pH entre 3,6-4,5.
- Zona 4: El último punto, donde confluye con el arroyo Tallisca, tiene valores de pH entre 4,5 y 7,2.

En la Tabla 9 se puede observar la caracterización para las diferentes zonas de estudio, siendo la zona 1 la más característica y de mayor interés, ya que es previa a la confluencia con los arroyos y se corresponde únicamente con el efluente ácido generado en la mina.

Tabla 9 Caracterización efluente de lixiviados ácidos de mina La Zarza (Sánchez et al., 2005)

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
Q (L/s)	2	15	20	41
pH	2,96	2,67	3,64	7,26
Eh (mV)	375	542	420	490
EC (mS/cm)	6,65	1,88	0,88	0,49
Fe (mg/L)	2,36	32	0,7	0,03
SO₄²⁻ (g/L)	7,98	0,89	0,48	0,31
Cl⁻ (g/L)	1,04	0,69	0,21	0,3
Na (mg/L)	4,1	4,1	1,8	1
Ka (mg/L)	34	49	39	30
Ca (mg/L)	200	70	56	37
Mg (mg/L)	397	68	43	21
Mn (mg/L)	84	10	5	1
Al (mg/L)	249	36	25	0,1
Cu (mg/L)	20	2	1,2	0,1
Zn (mg/L)	52	5	3	0,4

Tharsis

El complejo minero de Tharsis constituye una de las explotaciones mineras más importantes de la Franja Pirítica, donde se pueden distinguir cinco cortas a cielo abierto, cuatro de las cuales se encuentran parcialmente inundadas por drenajes ácidos (Filón Norte, Filón Sur, Sierra Bullones y Filón Centro) (Figura 9).

La superficie afectada por los residuos de la minería es de aproximadamente 3,6 km² (Cánovas et al., 2017), como consecuencia, las principales masas de agua en la red de drenaje de la cuenca están altamente contaminadas, las cuales se unen aguas abajo al río Oraque por la parte este, y al río Meca en la parte sur. (Cánovas, et al., 2016).

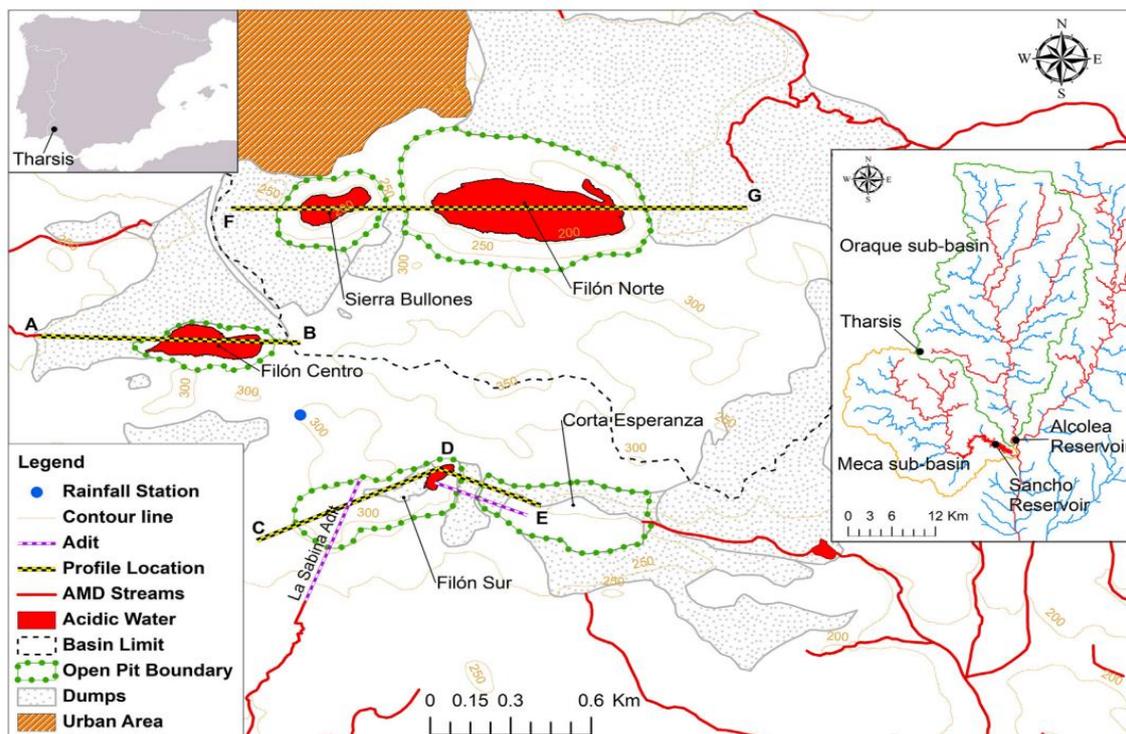


Figura 9 Mapa del complejo minero de Tharsis (Moreno et al., 2018)

Actualmente en el área minera de Tharsis existen cuatro puntos principales de surgencias de aguas ácidas que desembocan al río Odiel y que constituyen la principal fuente de contaminación de la cuenca procedente de este complejo minero. Estos puntos son:

- Salidas de Filón Centro
- Salidas de Filón Sur
- Galería la Sabina
- Arroyo de la Tiesa, el cual recoge el agua de varias surgencias procedentes de las escombreras de la zona norte.

La Tabla 8 muestra la caracterización fisicoquímica y los caudales para las surgencias en estos puntos. Los datos de caracterización están basados en un estudio hidrológico realizado por Tharsis Mining entre los años 2020 y 2022. Se exponen los valores medios de cada parámetro obtenidos en los muestreos al cabo de estos dos años.

En la Figura 10 y la Figura 11 se muestran los mapas de la red hidrológica de las cuencas donde se sitúan las principales surgencias del complejo minero y los puntos de muestreo que se han tomado de base para cada una de ellas en dicho estudio.

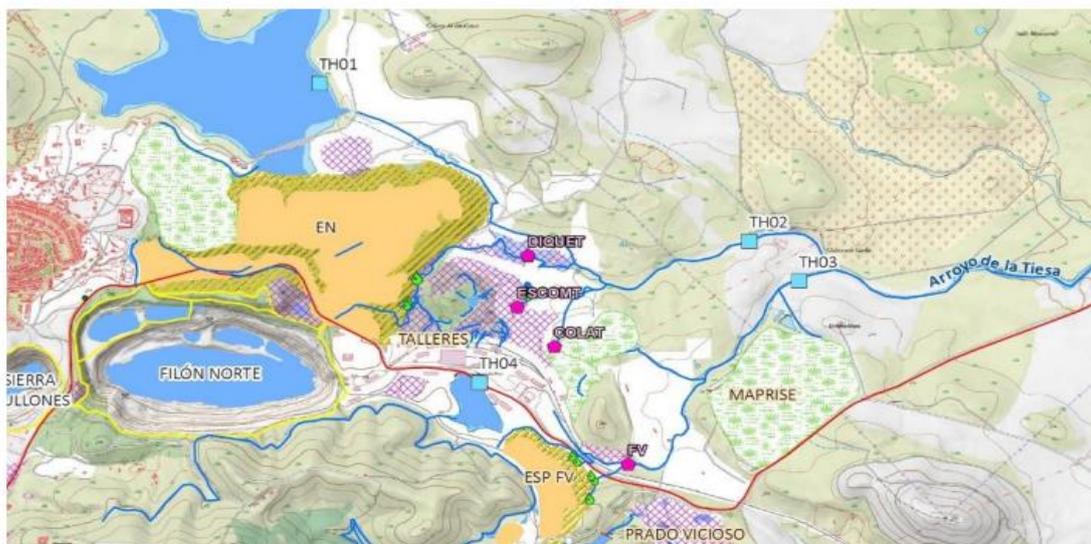


Figura 10 Mapa hidrológico de la cuenca del Arroyo de la Tiesa con las principales surgencias de agua y estaciones de aforo. Puntos de muestreo escombreras zona norte (Cortesía de Tharsis Mining)

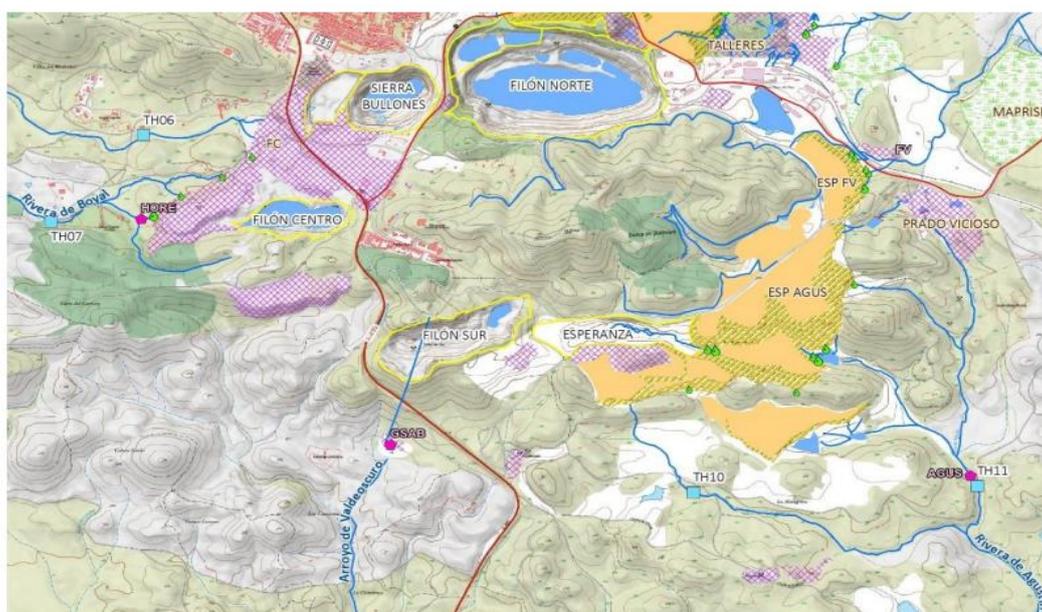


Figura 11 Mapa hidrológico de la cuenca del Arroyo de la Tiesa. Puntos de muestreo de Salidas de Filón Centro y Filón Sur (Cortesía de Tharsis Mining)

El agua con niveles de contaminación más elevados es la procedente de las escombreras de la zona norte, presentando las concentraciones más altas de acidez neta, Fe, Mn, Zn, As, Cd, Co, Cr, Ni y Pb.

Tabla 10 Análisis físico-químico de las aguas de las aguas de la superficie de las cortas de Tharsis (Moreno et al.,2018)

Foco de contaminación	Filón Centro	Arroyo de la Tiesa	Filón Sur
Punto de muestreo	TH06	TH03	TH02
			GSAB

Q (L/s)	0,94 (Drenaje galería)	Aporte escombreras: 0,98 Influencia lluvias: 12,28		Estiaje: 2,2 Precipitación: 12
pH	2,55	2,6	2,5	2,7
CE, mS/cm	5,7	11	18	4,5
Sulfatos, mg/L	6097	22104	32928	1900
Al, mg/L	232,45	568	1621	39
Cu, µg/L	127500	368500	148,8	2061
Fe, mg/L	1239	202,8	5474	139,3
Mn, mg/L	4,16	188,6	274,6	234,24
Zn, mg/L	25,4	876,7	614,5	116,62
As, µg/L	912,5	46	5835	2,6
Cd, µg/L	128	5157	1068	11
Co, µg/L	2258	35140	18550	994
Cr, µg/L	166	256	280	<0,5
Ni, µg/L	553	4924	6117	320
Pb, µg/L	60,75	280	449	35

La Tabla 11 muestra los valores de agua almacenada y de carga de contaminantes acumulada en el agua de las principales cortas de Tharsis.

Las aguas almacenadas en las cortas presentan unos valores de acidez neta de entre 3,6 y 7,1 g CaCO₃ g/L y de pH de entre 2,2 y 2,3, la ausencia de material alcalino en las rocas de las paredes de las cortas provoca una fuerte interacción entre las aguas y los materiales ricos en sulfuros provocando esta elevada acidez. (Moreno et al.,2018)

Tabla 11 Carga de contaminantes acumulada en las cortas de Tharsis (Moreno et al.,2018)

Foco de contaminación	Filón Sur	Filón Norte	Sierra Bullones	Filón Centro	Total
Agua almacenada (x10⁶ m³)	0,02	3,58	0,50	1,10	5,20
Acidez, ton	63	25270	3529	2835	31697
Sulfatos, ton	69	30534	4265	4442	39309
Al, ton	3,9	777	109	152	1041
Cu, ton	0,9	147	21	13	181
Fe, ton	13,5	7350	1027	626	9016
Mn, ton	0,09	143	20	29	192
Zn, ton	0,18	816	114	28	958
As, ton	0,026	40,7	5,68	0,23	46,6
Cd, ton	0,001	2,32	0,32	0,07	2,72
Co, ton	0,066	17,3	2,41	1,45	21,2
Cr, ton	0,002	0,77	0,11	0,04	0,92
Ni, ton	0,009	5,46	0,76	0,74	6,97
Pb, ton	0,003	2,95	0,41	0,05	3,42

4. Soluciones de remediación de los pasivos mineros

En este apartado se realizará una comparación de las principales estrategias de remediación utilizadas para la minimización del impacto de lixiviados ácidos generados en pasivos mineros, así como una estimación económica basada en el tratamiento óptimo resultante.

Mediante los tratamientos activos se logra mejorar la calidad final del agua utilizando métodos que requieren un consumo de energía y de reactivos químicos de forma continua, así como un grado de control y operación y mantenimiento elevados. Por otro lado, los tratamientos pasivos requieren un mantenimiento menor que en los tratamientos activos. Los rendimientos reportados para la eliminación de metales, sulfatos y acidez son relativamente altos. Es importante indicar que el coste de explotación (OPEX) asociado (0,27 - 0,52 €/m³) es significativamente menor al de los tratamientos activos (2,30 - 3,80 €/m³), lo cual permite que pueda ser asumido durante largos periodos de tiempo.

4.1. Tratamientos activos

Los tratamientos activos para aguas ácidas de mina se basan en el abatimiento de metales y sulfatos a través de sistemas fisicoquímicos o biológicos operados en ambientes controlados. Por un lado, las rutas fisicoquímicas abordan dicho abatimiento a través de la dosificación activa de reactivos químicos y/o el uso de membranas densas de filtración como la Nanofiltración (NF) o la Ósmosis Inversa (OI). Por otro lado, las rutas biológicas en bioreactores promueven la sulfato-reducción controlada a partir de bacterias específicas, transformando los sulfatos en sulfuros y provocando una precipitación progresiva de los metales presentes en el agua en forma de sulfuros metálicos (Vincent et al., 2016).

4.1.1. Sistemas fisicoquímicos y membranas

En los procesos fisicoquímicos se utilizan reactivos químicos alcalinos con el fin de aumentar el pH y precipitar metales en forma de hidróxidos o carbonatos. Por otro lado, la adición de calcio permite la reacción del mismo con los sulfatos provocando el abatimiento de estos en forma de yeso (CaSO₄). Estos procesos reciben el nombre de “lodos de alta densidad” (high-density sludge HDS).

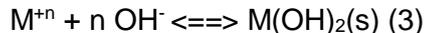
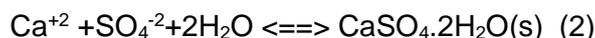
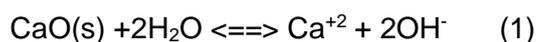
En la Tabla 12 se exponen las principales ventajas y desventajas de los químicos más frecuentes utilizados en este tipo de tratamientos. (Acharya et al., 2020)

Tabla 12 *Ventajas y desventajas de los principales químicos usados para tratamientos activos de AMD.*
(Acharya et al., 2020) (USEPA, 1994)

Reactivo	Ventajas	Desventajas
Carbonato de Calcio (CaCO₃)	<ul style="list-style-type: none"> -Bajo coste -Buena estabilidad -Operatividad del lodo relativamente sencilla -Facilidad de almacenaje 	<ul style="list-style-type: none"> - Dureza de los efluentes debida al Ca - Baja solubilidad y requerimiento de aplicación a largo plazo.

<p>Hidróxido de calcio (Ca(OH)₂)</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Bajo coste -Buena estabilidad -Disponible en estado sólido y líquido -Buena efectividad en condiciones extremas 	<ul style="list-style-type: none"> - Genera precipitados del lodo a altas concentraciones de sulfatos. -Tiempo de tratamiento requerido alto. -Necesario un almacenaje apropiado.
<p>Óxido de calcio (CaO)</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Bajo coste -Aplicable a bajos caudales con altos valores de acidez 	<ul style="list-style-type: none"> -No recomendable largos periodos de almacenaje. -Necesario equipo de medición -Se generan precipitados que pueden ocasionar obstrucciones. -Problemas de operatividad por la generación de calor.

El uso de cal (CaO(s)) es un proceso muy eficiente, y de bajo coste que gracias a su capacidad de llegar a regular el pH hasta valores de 12/12,5 elimina a su vez el sulfato y los metales de transición presentes en las aguas ácidas de mina, comúnmente resulta en la formación de yeso tal como describen las ecuaciones (1-3).



Si bien la reacción 3 describe la eliminación de la mayoría de los metales de transición a través de la formación de hidróxidos metálicos (M(OH)_n(s)), la presencia de sulfatos en las aguas hace que las reacciones de eliminación sean mucho más complejas. Estas implican la formación de fases minerales en base a hidroxí-sulfatos como se explicará con posterioridad en el apartado 4, para el caso del Fe(III) y del Al(III) como elementos más representativos (por ejemplo, Fe₈O₈(OH)_x(SO₄)_y s) y Al₄(SO₄)₄(OH)₁₀).

La relativa elevada solubilidad del yeso, tal como describe la reacción 2, supone valores de concentraciones de sulfatos para aguas equilibradas en yeso cercanas a los 1200-1600 mg SO₄²⁻/L dependiendo de la composición del agua (Geldenhuis, 2003, Johnson, 2005). Estos valores, que como observamos en determinadas normativas aplicables a la industria minera posibilitaría su vertido a medio, pueden no ser aptos para algunos casos cuando la necesidad de reducir las concentraciones de sulfatos que impactan sobre los recursos hídricos debe ser menor a 1200 mg/L. Esta limitación ha motivado una gran actividad de investigación que ha supuesto el buscar fases minerales en sulfato mucho más insolubles que el yeso, siendo etringita y el sulfato de bario (BaSO₄(s)) (Guimaraes, 2014; Silva, 2012; Wolkersdorfer, 2008; Pinto, 2016;) los dos minerales seleccionados para alcanzar valores de sulfatos por debajo de 200-2050 mg/L.

El proceso de precipitación de etringita, patentado y desarrollado inicialmente en RSA como tecnología SAVMIN (INAP, 2003), utiliza una mezcla de CaO(s) y Al(OH)₃(s) que

favorecen el incremento del pH hasta valores de 12, donde se produce la formación de etringita (Smit, 1999, Van, 2014). Este proceso cuenta con dos grandes problemas:

- i) la necesidad de reducir la basicidad del efluente hasta valores neutros que posibiliten su descarga tras la etapa de filtración que supone un elevado consumo de ácido.
- ii) los elevados volúmenes de lodos que se generan, ya que, solo si atendemos a la estequiometría de la reacción de eliminación por cada tonelada de sulfatos, se general casi 19 toneladas de etringita ($\text{Ca}_6(\text{Al}(\text{OH})_6)_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 26\text{H}_2\text{O}(\text{s})$), si tenemos en cuenta que por cada 3 moles de sulfato se forma 1 mol de etringita y que la relación de masas moleculares es 1014/288.

En el primer caso, todo y que la bibliografía lo ha identificado siguiendo las propuestas realizadas para el caso del $\text{BaSO}_4(\text{s})$, no se han descrito propuestas concretas, sin embargo, sí que hay una actividad muy importante en poder introducir tecnologías de ósmosis inversa (OI) y nanofiltración (NF) como técnicas de concentración. Ambas aproximaciones, han mostrado unos buenos rendimientos de concentración, que se hallan limitados por los elevados valores de pH, que conllevan elevados costes de operación debido a los procesos de ensuciamiento de las membranas. En la actualidad, cualquier prospectiva de implementación requerirá solventar estos problemas, bien modificando las propiedades de las membranas, o bien introduciendo una etapa de eliminación de $\text{Ca}(\text{II})$ y la reducción de los niveles de $\text{Al}(\text{III})$ residual. Otra opción diferente, para plantear tratar estos concentrados de procesos de membranas utilizando procesos de cristalización o procesos térmicos pero se está muy alejados de las condiciones de operación de ambas tecnologías. En el caso de los tratamientos de membranas, especialmente en el caso de la ósmosis inversa, se produce un agua de una elevada calidad que requería poderse integrar en algún uso dentro del proceso industrial. En el caso de la NF, la calidad del agua, al no sufrir tanta desmineralización podría suponer su uso en un rango de aplicaciones mayores dentro de la industria, que podrían alcanzar hasta la agricultura, pero la ausencia de bicarbonatos, requeriría su remineralización con calcita y dióxido de carbono.

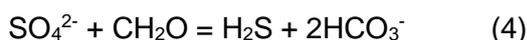
La precipitación de sulfato utilizando minerales de bario es una propuesta que se han planteado con fuerza en la última década y que conlleva como gran limitación el coste de la misma, dada la baja disponibilidad de minerales de bario en el planeta (Torres et al, 2016; Silva et al., 2012). El uso de $\text{BaCO}_3(\text{s})$ ha sido el mineral propuesto para el proceso de precipitación de $\text{BaSO}_4(\text{s})$ generado. El poder hacer este proceso más sostenible ha llevado a una propuesta de regeneración in-situ del reactivo, donde el $\text{BaSO}_4(\text{s})$ es tratado en un horno a 1050°C , donde en presencia de $\text{C}(\text{s})$, da lugar a $\text{BaS}(\text{s})$, que es utilizado para producir $\text{BaCO}_3(\text{s})$ utilizando $\text{CO}_2(\text{g})$. (Guimaraes, 2014). Todo y que el proceso se ha patentado en RSA y que se han realizado estudios a escala piloto, los indicadores económicos y de sostenibilidad de esta aproximación no indican una implementación a corto plazo. Se propone la regeneración in-situ que supone disponer de una instalación compleja de la cual no se dispone de madurez tecnológica.

Dentro de las aproximaciones físico-químicas, que han sido utilizado a escala industrial, pero en escalas de tratamiento de $1\text{-}5\text{ m}^3/\text{h}$, son la eliminación mediante procesos de intercambio iónico, si bien, no hay resinas con elevada selectividad para sulfatos (Guimeraes, 2014), procesos de concentración con membranas (por ejemplo, ósmosis

inversa, nanofiltración, electrodiálisis (CH2MHILL, 2010) o más recientes propuestas en base a electroquímica donde los reactivos de precipitación se generación in-situ (Nariyan, 2017). Ninguna de ellas se ha reportado en aplicaciones en minería para tratar caudales por encima de 2000-4000 m³/d.

4.1.2. Sistemas biológicos

En el caso de las aplicaciones de eliminación en base a procesos biológicos se ha de citar los procesos de sulfato reducción, en los que se promueve la conversión de sulfato (SO₄²⁻) a sulfuro (HS⁻). Bajo condiciones favorables las bacterias reductoras de sulfato convierten el sulfato en sulfuro catalizando la oxidación de carbono orgánico asociada con la reducción de sulfato:



donde el CH₂O representa un carbón orgánico simple. Esta reacción de reducción tiene como resultado un aumento en la alcalinidad y el pH. Los incrementos en la concentración de H₂S disuelto acrecientan la precipitación de metal como sulfuros metálicos:



y donde Mⁿ⁺ representa un metal n-valente, todo y que es posible la formación de sulfuros con elementos no metálicos como el As.

La reacción de reducción del sulfato tiene lugar de forma eficiente con bacterias sulfato-reductoras y está acompañada con la formación de bicarbonato a partir de la fuente de carbono utilizada (por ejemplo, etanol o acetato como fuentes más económicas) tal como indica la reacción 4. La formación de bicarbonato sirve para neutralizar la acidez de las aguas, y si no es suficiente se puede utilizar un álcali como CaCO₃(s). Este proceso, para tener un valor ambiental apreciable, debe ser acompañado con la necesidad de que las aguas ácidas tengan un contenido de metales de transición que equilibren de forma equimolar la cantidad de sulfuro formado, para que pueda ser estabilizado como sulfuros metálicos (MS(s)). Si esta condición no se alcanza, el exceso de sulfuro formado, mucho más tóxico que el sulfato, y con valores normativos más estrictos, debe ser oxidado a S(s) (Semblante, 2018).

Todo y que esta tecnología se ha licenciado y aplicado a escala industrial en plantas industriales con caudales que no se acercan a las necesidades de la industria minera, y en ejemplos que el sulfuro formado debe ser eliminado en forma de sulfuro metálico. En los años 90, esta tecnología se evaluó a escala piloto en diferentes plantas de minería del cobre en Chile, pero no se tradujeron en plantas a escala industrial. Recientemente Ayansina et al, (2018) han realizado una revisión del estado del arte de esta tecnología y las conclusiones más importantes del estudio indican que, todo y que identifican la sulfato-reducción como una técnica efectiva y que permite propiciar un enfoque ambientalmente sostenible para reducir la contaminación generada por las aguas de minas, destacan como grandes limitaciones que:

- 1) Existe una necesidad en el ámbito de la investigación para identificar organismos reductores de sulfato adecuados para cumplir el objetivo económico de la biorremediación, ya que se deben vencer las limitaciones asociadas a los valores elevados de acidez y de concentraciones de metales de las aguas ácidas de mina.

- 2) El diseño del consorcio microbiano y del reactor biológico puede mejorar la eficacia del proceso de remediación más allá de las productividades observadas en consorcio, pero todavía no se han reportado experiencias a escala industrial relevantes

4.2. Tratamientos pasivos

Los tratamientos pasivos para la remediación de pasivos mineros se basan en la combinación de procesos fisicoquímicos, geoquímicos y/o biológicos aplicados de forma pasiva, donde se lleva a cabo la modificación de ciertas características de las aguas con el objetivo de mejorar su calidad, mediante la neutralización del pH y la eliminación de metales. Entre los métodos más estudiados destacan los humedales aerobios, los humedales anaerobios o balsas orgánicas, los drenajes anóxicos calizos (ALD, Anoxic Limestone Drains), los sistemas sucesivos de producción de alcalinidad (SAPS, Successive Alkalinity Producing Systems) y las barreras reactivas permeables cuando son aguas subterráneas (PRB, Permeable Reactive Barriers).

En la Tabla 13 se puede observar los factores limitantes para los tratamientos pasivos de aguas ácidas mencionados, tomando como referencia criterios para caracterizar la eficiencia basados en la acidez o metales que el tratamiento es capaz de eliminar por metro cuadrado y día, y también en el tiempo mínimo de tratamiento o de retención en el sistema (para ALD y SAPS).

Tabla 13 *Parámetros de diseño para tratamientos pasivos de AMD basados en su eficiencia de eliminación de acidez neta y de metales (Skousen et al., 2016)*

Tipo de Sistema de tratamiento pasivo	Valores de carga ácida y metálica recomendados para las aguas a tratar
Biológicos	
Humedal aerobio	10 g Fe/m ² día 1g Mn/m ² día
Humedal anaerobio	3,5 g CaCO ₃ / m ² día 10 g Fe/m ² día
Sistema de producción sucesiva de alcalinidad (SAPS)	30-50 g CaCO ₃ / m ² día Tiempo de residencia: 12-15 h
Geoquímicos	
Drenaje anóxico calizo (ALD)	Tiempo de residencia: 15h 50 g CaCO ₃ /tdía

Los sistemas de tratamiento pasivos convencionales basados en la disolución de los granos de calcita toleran solo bajas concentraciones de metales y de acidez equivalente, esto es debido a que se producen efectos de pasivación (pérdida de reactividad debido al “coating”) y de obstrucción por la formación de precipitados, con la consecuente disminución de la permeabilidad (Rötting et al., 2008).

El sistema de Sustrato Disperso Alcalino (DAS), desarrollado posteriormente a los tratamientos convencionales con el objetivo de subsanar estos problemas en el tratamiento de aguas con elevada acidez y concentración metálica, ha mostrado buenos resultados en este campo, logrando disminuciones de acidez neta de hasta 4 veces más que los sistemas de tratamientos pasivos convencionales (Rötting et al., 2008). Esto se debe a que se origina una mayor superficie reactiva que previene la pasivación del sustrato y una mayor permeabilidad debido al tamaño de poro de la matriz inerte. En el Anexo A.4. se ha incluido una descripción de cada uno de los sistemas.

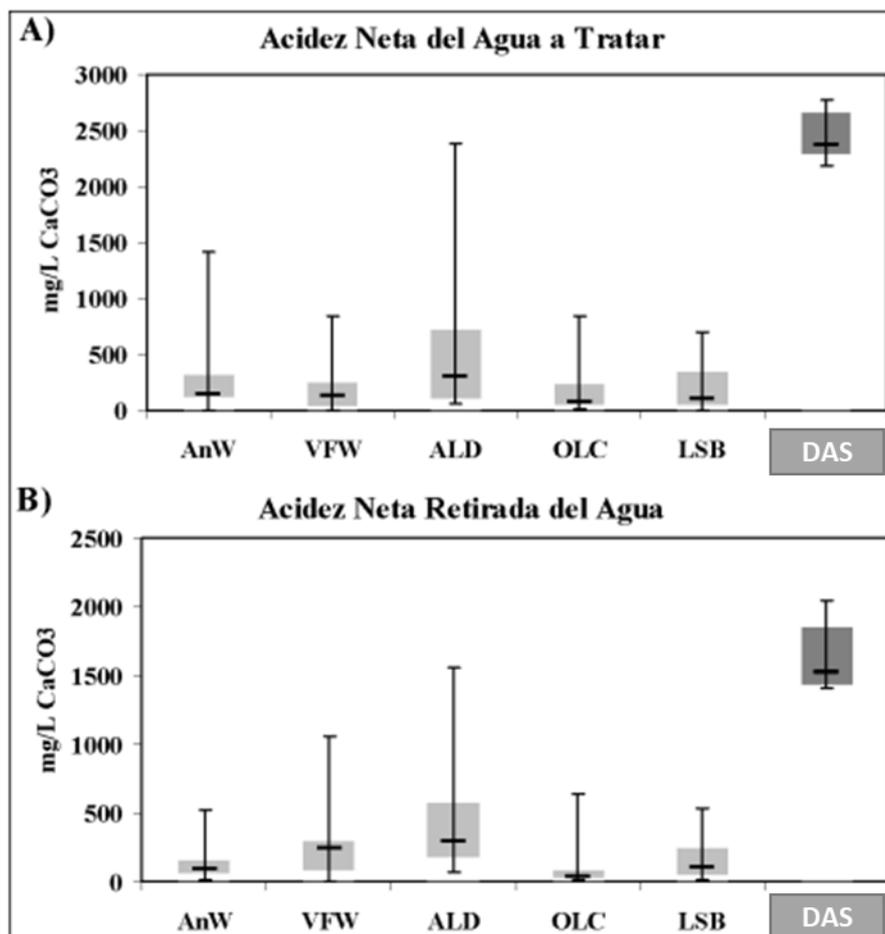


Figura 12 Comparación de la eficiencia de eliminación de la acidez neta para diferentes tratamientos pasivos (Carballo et al., 2010)

En la Figura 12 se muestran las eficiencias en la eliminación de la acidez neta para varios tratamientos pasivos convencionales. AnW (Humedal anaerobio), VFW (Humedal de flujo vertical), ALD (Drenaje anóxico calizo), OLC (Canal calizo abierto) y LSB (Capa de lixiviado calizo) y del sustrato disperso alcalino en mina Esperanza. Para los datos correspondientes a los sistemas de tratamiento pasivos convencionales se han evaluado datos de más de 80 tratamiento instalados en los EE. UU. (Carballo et al., 2010). Se puede observar cómo los sistemas convencionales están diseñados para tratar aguas con unos valores de acidez bajos o medios, mientras que se tratan con el DAS poseen una carga de acidez neta un orden de magnitud por encima de la que pueden soportar el resto de los sistemas de tratamiento. Del mismo modo puede observarse como **el sistema DAS logra retirar del agua de entrada una**

concentración de acidez neta superior a lo observado en el resto de los sistemas de tratamiento pasivos convencionales.

En la actualidad, existen plantas de tratamiento de Sustrato Disperso Alcalino implementadas en varias minas de la FPI. Una planta piloto en la mina Monte Romero (actualmente este piloto no se encuentra activo) y dos plantas de tratamiento a escala real, una en mina Esperanza y otra en mina Concepción. En la Tabla 14 se muestran los resultados de calidad de agua obtenidos en ambos casos de estudio

En el sistema de tratamiento con DAS-CaCO₃ los metales trivalentes, Al y Fe (III), se eliminan casi completamente, ya que la disolución de la caliza provoca un aumento de pH de las aguas ácidas a valores de entre 5 y 6, condiciones en las que se produce la precipitación de estos metales. Sin embargo, la eliminación de metales divalentes (por ejemplo, Zn, Mn, Ni, Cd, Co) presenta una baja efectividad ya que la mayoría no son solubles en este rango de pH. Para ello, con el objetivo de optimizar la secuencia de la tecnología DAS para el tratamiento de aguas con elevada acidez neta y concentración de metales, se desarrolló otra alternativa usando óxido de magnesio (MgO) como un segundo paso, que al solubilizarse sube el pH de las aguas a valores en torno a 8,5 y 10, generando las condiciones óptimas para que se produzca la precipitación de los metales divalentes, ya que su solubilidad en estos rangos de pH es muy baja (Cortina et al., 2003; Rötting et al., 2008). Esta secuencia DAS-CaCO₃+MgO se emplea actualmente a escala real en mina Concepción.

Tabla 14 Condiciones de operación y eficiencia de los tratamientos DAS en las minas Monte Romero, Esperanza y Concepción (Larraguibel et al., 2020).

Parámetros		DAS - CaCO ₃	DAS CaCO ₃ + MgO
Referencia		Mina Esperanza	Mina Concepcion & Mina Montero Romero.
Caudal		0,50 L/s	0,80 L/s
Tiempo de residencia (h)		54	70-160
pH	Entrada	2,65	3,58 – 2,70
	Salida	5,70	7,20 – 9,80
Al (mg/L)	Entrada	147	80– 119
	Salida	2,00	<0,20
Fe (mg/L)	Entrada	900	260- 286
	Salida	600	25
Zn (mg/L)	Entrada	26	20 – 350
	Salida	15	<0,05
Mn (mg/L)	Entrada	5	13,50
	Salida	3	<0,20

Parámetros		DAS - CaCO ₃	DAS CaCO ₃ + MgO
Cu (mg/L)	Entrada	18	2,70
	Salida	0,50	<0,01
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Entrada	3900	3450
	Salida	3500	2800
Acidez neta (mgCaCO ₃ eq./L)	Entrada	2500	1300– 1609
	Salida	900	0- 50

4.3. Otras estrategias de remediación

Además de las tecnologías de remediación activas o pasivas para el tratamiento de lixiviados generados en pasivos mineros, existen otras estrategias que se pueden considerar como **el sellado y la impermeabilización de los focos de contaminación**, evitando de esta forma la generación de estas corrientes de agua ácida de mina. Una tecnología emergente que permite alcanzar este propósito y además generar oportunidades de renaturalización es la tecnología de tecnosuelos que se describe a continuación. Por otro lado, la capacidad autodepurativa de los recursos hídricos disponibles permite de forma natural la eliminación de una parte significativa de la contaminación.

4.3.1. Tecnosuelos

La World Reference Base for Soil Resources define el concepto de tecnosuelo como un suelo que está formado por una cantidad significativa (>30 %) de materiales técnicos modificados de forma artificial por el hombre.

Estos sistemas permiten el sellado de zonas con material técnico que dispone de propiedades diferentes a las de la roca natural o contiene geomembranas para facilitar la impermeabilización. De esta manera es posible aislar hidráulicamente residuos que pueden generar escorrentía en presencia de agua subterránea o lluvia y mejorar a través de los lixiviados las características geoquímicas de los residuos mineros, y por lo tanto ralentizar o parar los procesos oxidativos y la generación de drenaje ácido. El agua al entrar en contacto con el material fragmentado se hiperacidifica y disuelve metales. A través del tecnosuelo se lleva a cabo una modificación del pH, el cual aumenta, como consecuencia, se produce la precipitación de los metales disueltos con lo que se evita que lleguen a los cauces. (Lucheta et al., 2013) (CONSELLERÍA DE MEDIO AMBIENTE E DESENVOLVEMENTO SOSTIBLE. 2008.)

Por otro lado, las características de estos suelos permiten que en la capa superficial (aislada del residuo sellado) se pueda cultivar, al ser materiales con un elevado poder fertilizante, siendo posible la renaturalización del terreno con especies de flora local.

A través de los tecnosuelos se consiguen importantes objetivos en términos de mejora de las condiciones ambientales tales como:

- **Mejorar la calidad de las aguas:** el uso de tecnosuelos permite corregir la calidad del agua evitando la disolución de metales en las aguas, tanto superficiales como subterráneas.
- **Valorizar residuos** a través de su integración en los ciclos biogeoquímicos (el uso de materias primas valorizables estabiliza la máxima cantidad de C y N con modelos similares a los de los suelos naturales, minimizando así la cantidad de materiales valorizables que acaban en vertederos) y reducir emisiones de CO₂, CH₄, CO y NO_x a la atmósfera.
- **Restaurar suelos degradados por actividades mineras**, industriales etc., con un relevante ahorro de recursos naturales (especialmente “turbas y tierra vegetal”) en las labores de recuperación de estos espacios.
- **Favorecer la producción de la biomasa y obtención de materia orgánica de mayor estabilidad.**
- Mejorar la **fertilidad de los suelos distróficos** debido al aprovechamiento de los nutrientes de las materias primas y a su capacidad para fijar nitrógeno, reciclar nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio, calcio y otros macro y micronutrientes, lo cual conlleva una reducción en los costes de fertilizantes químicos (Proyecto Green Soil Solutions en Minas de Riotinto).
- No se produce generación de residuos, tal como ocurre con otras técnicas de gestión medioambiental.

Una de las principales aplicaciones de esta tecnología es en la renaturalización de suelos afectados por actividades mineras. Específicamente, esta tecnología está siendo utilizada en la actualidad en los trabajos de renaturalización de las minas de Riotinto. En este proyecto se aplica la tecnología de Tecnosoles mediante un proceso de compostaje que logra la obtención de suelos con una materia orgánica estable obtenida por procesos de estabilización similares a los existentes en los suelos naturales, de modo que el tecnosol evolucionará con el tiempo al contener una forma química en la que los materiales orgánicos están mezclados y unidos a los inorgánicos, como los sedimentos de suelos. Por ello, mediante los tecnosuelos se consigue cumplir con las funciones ambientales requeridas a los suelos y un rápido favorecimiento del desarrollo de la revegetación.

4.3.2. Dry Covers

Otro método para minimizar el impacto de los drenajes ácidos de minas es colocar un recubrimiento seco sobre los depósitos de residuos piríticos. El objetivo de este tipo de recubrimientos es limitar el flujo de oxígeno y agua a través del recubrimiento hasta el residuo y, por tanto, minimizar la tasa de oxidación del material pirítico, responsable de la formación de los drenajes ácidos. (Borghetti et al., 2009) Generalmente están diseñados utilizando suelos locales de la zona. El rendimiento del tratamiento con dry covers depende tanto de las características de los materiales utilizados, como de las condiciones climáticas de la zona.

Los “dry covers” se diferencian de los “wet covers”, los cuales hacen referencia a estrategias de inundación de los materiales ricos en sulfuros.

Los Dry Covers o recubrimientos pueden estar formados por una única capa de suelo o una estructura compuesta por diferentes capas de suelos o de materiales sintéticos. En la Tabla 15 se exponen las propiedades y dureza de la estructura de las capas que

conforman los dry covers así como la gestión del agua de las áreas. (Kauppila et al., 2013)

Tabla 15. Clasificación de diferentes tipos recubrimientos (dry covers) y su compatibilidad con los diferentes tipos de residuos a tratar (Kauppila et al., 2013)

Tipo de dry cover	Principio del método	Compatibilidad para diferentes tipos de residuos
Recubrimiento de una capa	El área a tratar se cubre con un suelo mineral que contiene materia orgánica (de espesor 0.5-1 metro), lo cual permite una óptima vegetación de la zona.	Estos métodos son adecuados para un suelo de un área que no tenga generación de lixiviados ácidos (tailings, residuos rocosos) y para zonas donde la solubilidad a largo plazo de las sustancias contaminantes es mínima o manejable mediante el tratamiento de aguas.
Recubrimiento doble capa		Este método es adecuado para la restauración de suelos donde haya nula o baja generación de aguas ácidas (incluyendo metales pesados/metaloideos)
Recubrimiento multicapa incluyendo una capa que previene el paso de oxígeno y retiene el agua	El recubrimiento está formado por una estructura multicapa que limita el flujo de oxígeno a los residuos.	Este método es adecuado para la restauración de suelos donde haya nula o baja generación de aguas ácidas (incluyendo metales pesados/metaloideos)
Recubrimiento multicapa incluyendo una capa que disminuye el paso de oxígeno e incrementa su consumo.	Recubrimiento formado por una estructura multicapa que evita el flujo de oxígeno hacia los residuos. Contiene una capa que tiene materia orgánica que consume oxígeno, evitando así que el oxígeno llegue a los residuos que contienen sulfuros. La capa consumidora de oxígeno puede ser una depresión de un humedal en forma de cuenca, donde la descomposición de las reacciones de las plantas consumen oxígeno.	Método adecuado para la rehabilitación de escombreras con generación de lixiviados ácidos (incluyendo metales pesados/metaloideos)
Recubrimiento con carbonato-conteniendo tailings/residuos de	El recubrimiento está formado por carbonato que contiene, restos de	Método adecuado para la restauración de escombreras con

<p>grano fino que aumentan la neutralización y disminuyen el paso de oxígeno</p>	<p>grano fino, roca o polvo mineral (Mg y/o silicato de Ca ± carbonato), el cual retiene el agua de lluvia y tiene agua gravitacional alcalina. La estructura de la cubierta desacelera la difusión de oxígeno y potencia la capacidad neutralizante de los residuos.</p>	<p>generación de lixiviados ácidos.</p>
<p>Recubrimiento impermeable (incluye materiales sintéticos)</p>	<p>La estructura del recubrimiento incluye una capa que previene el agua de percolación. Una estructura de cubierta sintética requiere una parte superior (protección de la luz solar, medio de crecimiento) y una capa protectora inferior (prevención de la carga puntual, evita la interacción) así como un cuidadoso sellado. La capa impermeable evita que el oxígeno acceda a los residuos. Requiere que la estructura no se seque (grietas de desecación) y que no haya reacciones de intercambio catiónico).</p>	<p>Este método es adecuado para la restauración de suelos con generación de lixiviados ácidos y estanques de lodos de precipitados minerales.</p>

4.3.3. Autodepuración

Otra de las formas de elevar el pH y conseguir la precipitación de los metales es a través de la dilución con la propia agua de lluvia. También se puede producir la precipitación de los iones de hierro mediante la oxidación a presión superior a 2 atmósferas (esto se produciría a condiciones de más de 15 metros de profundidad) o mediante la oxidación a pH igual o mayor de 5. En la presa de Olivargas y la presa del río Agrio se dan estas condiciones, que unidas al elevado contenido en oxígeno de las aguas de lluvia y al contacto de la superficie de agua con el oxígeno del aire, producen una precipitación de los iones de hierro. En cuanto a los iones sulfato no precipitados, quedarían en forma de ácido sulfúrico, que tendría que ser neutralizado bien por la neutralización con las propias arcillas arrastradas por las escorrentías de las aguas de lluvia o neutralización con algún reactivo final cuyo uso sea apto para el riego agrícola (por ejemplo, amoniaco, que generaría sulfato de amonio, utilizado como abono).

Para que se produzca esta precipitación de metales y la reducción de los iones sulfato a un valor óptimo para aguas de riego ($< 960 \text{ mg/L}$) (FAO, 1987), la dilución necesaria es de un mínimo de 1:10 de agua ácida de mina con agua de escorrentía de lluvia. En el caso del río Odiel, su caudal de aguas ácidas es de aproximadamente 3 Hm^3 al año, siendo el caudal previsto para la presa de Alcolea de 275 Hm^3 , se conseguiría la dilución necesaria para las condiciones de pH necesarias para que se lleve a cabo la eliminación de metales.

4.4. Evaluación económica de los tratamientos de remediación evaluados.

La Tabla 16 y la Tabla 17 muestra el desglose de los costes asociados en la construcción y operación de los principales tratamientos activos y pasivos evaluados para la neutralización y abatimiento de sulfatos y metales en aguas ácidas de mina.

Tabla 16 Evaluación económica de los tratamientos de remediación activos.

Tratamientos Activos	CAPEX (€/m ³ /día)	CAPEX (€/L/s)	OPEX (€/m ³)
Sistemas fisicoquímicos	200 - 250	17.280 – 21.600	2,30 - 2,50
Sistemas biológicos	320 - 370	27.648 – 31.968	2,40 - 2,70
Nanofiltración*	430 - 540	37.152 – 46.656	2,50 - 3,80

Tabla 17 Evaluación económica de los tratamientos de remediación pasivos.

Tratamientos Pasivos	CAPEX (€/m ³ /día)	CAPEX (€/L/s)	OPEX (€/m ³)
Humedal aerobio	750 - 790	64.800 – 68.256	0,35-0,39
Humedal anaerobio	1420 - 1550	122.688 – 133.920	0,47-0,52
Drenaje anóxico calizo (ALD)	600 - 650	51.840 – 56.160	0,35 – 0,40
Sustrato Disperso Alcalino (DAS)	900 - 1100	77.760 – 93.060	0,27 – 0,35

Tal y como se puede observar, los tratamientos activos cuentan con un CAPEX significativamente menor al de los tratamientos pasivos evaluados; no obstante, el orden de magnitud del OPEX es significativamente superior. La localización de los pasivos mineros (habitualmente ubicados en zonas que no están en explotación) puede dificultar significativamente el despliegue de soluciones de tratamiento activas que requieran un alto grado de control operativo, personal de forma continua para la operación y mantenimiento, y disponibilidad de acceso para el suministro continuo de reactivos químicos y la retirada de lodos.

Por otro lado, en los tratamientos pasivos evaluados, el **DAS supone la opción más viable tanto de un punto de vista técnico** (tal y como se ha indicado en la sección 4.2) así como **económico; por ello es la tecnología que se propone para los escenarios de remediación desarrollados en la sección 5.**

Específicamente, en la Figura 13 se exponen las diferentes tareas a ejecutar en la instalación de una planta DAS especificando cuánto influye cada una de ellas en el coste capital final. Para la estimación de los costes del DAS se ha tenido en cuenta la planta de tratamiento de Sustrato Disperso Alcalino construida en Mina Esperanza, para el resto de los tratamientos se ha calculado a través de un software de modelización de costes (Orden et al., 2021).

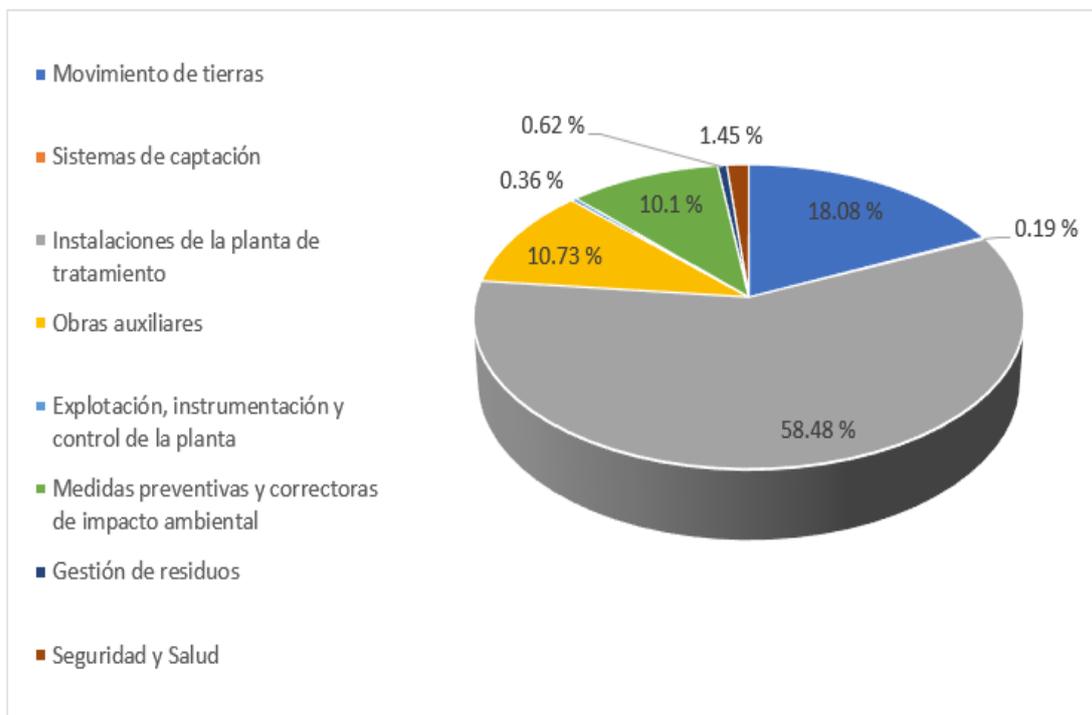


Figura 13 Desglose de los costes (en %) del capital total de instalación asociados a una planta DAS (Fuente: Consejería del medio ambiente y ordenación del territorio)

Los costes asociados a la **aplicación de tecnosuelos** en las escombreras se ha basado en un estudio donde se estima el coste medio del recubrimiento de escombreras para distintos casos de estudio en Australia con materiales muy similares a las de los pasivos mineros de la provincia de Huelva. Cabe señalar que este dato es una estimación aproximada debido a la limitada información disponible y a que los costes de implantación de los tecnosuelos son dependientes de la disponibilidad de materiales, las características del suelo, el grado de impermeabilidad necesario, las necesidades de renaturalización de las capas superficiales, la orografía y el transporte (J.Harries, 1997). El informe estima un coste medio de rehabilitación de suelos afectados de 0,1 M€/ha, el cual encaja en la horquilla de coste aproximado de **0,05-0,15 M€/ha** suministrado por empresas especializadas en la implantación de este tipo de sistemas.

También se han evaluado los costes asociados al sellado de escombreras mediante recubrimientos (**dry covers**) tomando como referencia un informe del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico de Metodología para el cálculo de Garantías Financieras para la restauración del espacio afectado por Actividades Mineras, en el cual se estima una horquilla de entre **15,24-41,47€/m²** para el coste de la aplicación de esta tecnología.

5. Propuestas de remediación y evaluación económica de los escenarios definidos

Con el objetivo de abordar la remediación de los pasivos mineros que se detallan en el presente informe se definirá un plan de remediación con su correspondiente evaluación económica.

Se proponen dos fases de remediación para cada una de las cuales se ha realizado una evaluación económica preliminar basada en los costes relativos expuestos en la sección 4.4. En una primera fase se propone el despliegue de soluciones de remediación para los principales focos de contaminación que afectan a la cuenca del río Odiel y, en una segunda fase, se propone la remediación del restante de pasivos mineros inventariados.

- 1) **FASE 1:** Remediación de los principales focos de contaminación que afectan a la cuenca del Odiel (Riotinto, Tharsis, San Telmo y La Zarza)
- 2) **FASE 2:** Remediación del resto de pasivos mineros del perímetro de estudio.

La propuesta de remediación del presente estudio se basa en la implantación de **soluciones de tratamiento pasivo y al sellado y renaturalización de escombreras** mediante tecnología de tecnosuelos. Esto responde a que los principales focos de contaminación están ubicados en zonas mineras actualmente abandonadas y en el que el despliegue de tratamientos activos supondría una dificultad añadida desde el punto de vista técnico en cuanto operación y mantenimiento.

Como tratamiento pasivo para los efluentes generados por el desbordamiento de cortas inundadas en la surgencia de lixiviados se propone un tratamiento mediante la aplicación de la tecnología de Sustrato Disperso Alcalino (DAS) con el fin de alcanzar altos rendimientos en la neutralización de la acidez presente y el abatimiento de los metales. Tal y como se ha demostrado en estudios anteriores (ver detalle en sección 4.2), mediante el sistema DAS en dos etapas ($\text{CaCO}_3 + \text{MgO}$) se espera un abatimiento total de los principales metales disueltos que reduciría significativamente la carga contaminante en la cuenca del Odiel. Es importante exponer la limitación en la precipitación de sulfatos para este tipo de sistemas, alcanzándose únicamente eliminaciones de hasta el 20%, y siendo 1200-1500 mg/L la mínima concentración de sulfatos en los efluentes tratados. En los casos de escorrentía que estén próximas a zonas de minas operativas, los efluentes tratados podrán ser derivadas a las plantas de tratamiento de aguas de dichas minas para su gestión centralizada mediante tratamientos activos con el objetivo de minimizar la concentración de metales y sulfatos.

Paralelamente, se propone **la aplicación de tecnosuelos para el sellado de escombreras**, las cuales suponen un importante foco de contaminación en la FPI favoreciendo la infiltración de agua con la consecuente generación de lixiviados ácidos.

- **FASE 1: Remediación de los pasivos mineros de RíoTinto, Tharsis, San Telmo y La Zarza**

A continuación, se exponen las propuestas de remediación para los principales focos de contaminación identificados:

RíoTinto

En el caso de las minas de RíoTinto, al encontrarse dentro del plan de restauración del Proyecto RíoTinto (Atalaya Mining), existe ya un listado de acciones a realizar respecto a los pasivos mineros de la zona (tanto abandonada como operativa).

En la Tabla 18 se resumen los planes de restauración de los pasivos que están incluidos en el Proyecto RíoTinto. Atalaya Mining ha realizado ya algunas actuaciones de corrección hidrológica para reducir hasta en un 70% la carga contaminante que alcanza el Odiel. Por otro lado, existen ya actuaciones de sellado identificadas, así como la posibilidad derivar algunos de los drenajes ácidos a la zona operativa del Proyecto RíoTinto y centralizar su gestión en la planta de tratamiento de aguas (PTA).

Tal y como se puede ver, en la Tabla 18, se ha realizado una estimación económica aproximada de las **actuaciones ya identificadas y necesarias en el área minera no operada por el Proyecto Río Tinto.**

Tabla 18 Evaluación económica de las actuaciones propuestas para la remediación de pasivos mineros en RíoTinto

Actuación	Superficie (ha) / Caudal (L/s)	CAPEX (M€)	OPEX (M€/año)
Escombreras que quedan fuera del Plan de Restauración del Proyecto RíoTinto (Tecnosuelos)	130,8* ha	6,54 – 19,52 M€	N/A
Escombreras que quedan fuera del Plan de Restauración del Proyecto RíoTinto (Dry Covers)	130,8* ha	19,93 – 54,24 M€	N/A

(*) Información proporcionada por Atalaya Mining. La estimación de los costes asociados a la unificación y tratamiento de los drenajes ácidos no se ha tenido en cuenta ya que estas acciones estarían incluidas dentro del plan de restauración del Proyecto RíoTinto.

San Telmo (Subcuenca Oraque)

La mina de San Telmo cuenta con descargas significativas de lixiviados ácidos que, como se ha mencionado anteriormente, suponen un aporte de contaminantes muy relevante al río Odiel. Con el objetivo de neutralizar estas descargas se ha estimado el **coste de implementación y operación de una planta de tratamiento DAS** para la gestión de los lixiviados generados en la zona este y que se desbordan desde la corta, así como el **sellado de las escombreras** para evitar la generación de lixiviados en periodos de lluvia.

Tabla 19 Evaluación económica de las actuaciones propuestas para la remediación de pasivos mineros en San Telmo.

Actuación	Superficie (ha) / Caudal (L/s)	CAPEX (M€)	OPEX (M€/año)
Instalación de un sistema DAS para el tratamiento de drenajes ácidos	117 L/s	9,1 – 10,8 M€	0,9 – 1,3 M€/año
Sellado de la escombrera de la zona Este (Tecnosuelos)	100 ha	5 – 15 M€	N/A
Sellado de la escombrera de la zona Este (Dry covers)	100 ha	15,2 – 41,5	N/A

La Zarza (Subcuenca Olivargas)

Se plantea la instalación de un sistema DAS para la neutralización del drenaje ácido de lixiviados que impacta posteriormente en los arroyos que confluyen hasta el Odiel. Se propone actuar aguas arriba en la Zona 1 tratando un caudal relativamente pequeño, pero altamente concentrado.

Tabla 20 Evaluación económica de las actuaciones propuestas para la remediación de pasivos mineros en La Zarza

Actuación	Superficie (ha) / Caudal (L/s)	CAPEX (M€)	OPEX (M€/año)
Instalación de un sistema DAS para el tratamiento de drenajes ácidos en la Zona 1.	2 L/s	0,14 – 0,18 M€	0,017 – 0,022 M€/año

Tharsis (Subcuenca Meca)

Del mismo modo que en los casos anteriores, se propone actuar mediante la implantación de sistemas DAS para neutralizar los puntos principales de surgencias. Por un lado, se actuará sobre la surgencia de las galerías de Filón Centro y Filón Sur, así como de las escorrentías generadas en la escombrera norte y que se centralizan en el

Arroyo de la Tiesa. Por otro lado, también se propone el sellado de la escombrera para evitar la generación continua de lixiviados.

Tabla 21 Evaluación económica de las actuaciones propuestas para la remediación de pasivos mineros en Tharsis

Actuación	Superficie (ha) / Caudal (L/s)	CAPEX (M€)	OPEX (M€/año)
Instalación de un sistema DAS para el tratamiento de drenajes ácidos de la Corta Filón Centro .	0.94	0,07 – 0,09 M€	0,008 – 0,01 M€/año
Instalación de un sistema DAS para el tratamiento de drenajes ácidos de la Corta Filón Sur .	12	0,93 – 1,12 M€	0,102 – 0,132 M€/año
Instalación de un sistema DAS para el tratamiento de drenajes ácidos del Arroyo de la Tiesa .	12.28	0,95 – 1,14 M€	0,104 – 0,135
Sellado de escombreras (Tecnosuelos)	390 ha	19,5 – 58,5 M€	N/A
Sellado de escombreras (Dry covers)	390 ha	59,4 – 161,7	N/A

Coste Total Fase 1

A continuación, se presentan los costes totales estimados para la Fase 1.

Tabla 22. Evaluación económica de las actuaciones de remediación Fase 1

Sumatorio de actuaciones	CAPEX (M€) *tecnosuelos para el sellado de escombreras	CAPEX (M€) *dry covers para el sellado de escombreras	OPEX (M€/año)
RioTinto	6,60 – 17,30 M€	19,93 – 54,24 M€	--
San Telmo	14,10 – 25,80 M€	24,3 – 52,3 M€	0,90 – 1,30 M€/año
La Zarza	0,14 – 0,18 M€	0,14 – 0,18 M€	0,017 – 0,022 M€/año
Tharsis	21,45 – 60,85 M€	61,5 – 164,05 M€	0,214 – 0,277 M€/año
TOTAL FASE 1	42,29 – 104,13 M€	105,87 – 270,77 M€	1,13 – 1,6 M€/año

- FASE 2: Remediación del resto de pasivos mineros históricos abandonados del perímetro de estudio.

En la Tabla 24 se desglosan los costes de rehabilitación de las escombreras de todas las minas incluidas en el perímetro de estudio de la cuenca del Odiel.

La Mina Almagrera cuenta con una superficie afectada por la actividad minera de unas 120 ha, pero no se ha incluido en la evaluación económica ya que actualmente se están realizando labores de restauración por parte de la Dirección General de Industria. Tanto la mina Almagrera como la mina de Aguas Teñidas cuentan con una planta de tratamiento activo donde se neutralizan todos los lixiviados generados.

El coste total de restauración de los pasivos mineros abandonados derivados de la minería histórica dentro del perímetro de estudio se corresponde con los costes atribuidos a la remediación de los suelos afectados por las actividades de la minería histórica y el número de plantas de tratamiento DAS que son necesarias construir para tratar las descargas ácidas relevantes de la zona, que en este caso aplica a las minas de Tharsis, La Zarza y San Telmo.

Tabla 23 Evaluación económica de las actuaciones de remediación Fase 2 mediante la tecnología de Tecnosuelos

Actuaciones de sellado de escombreras (Tecnosuelos)	Superficie (ha)	CAPEX (M€)
Mina Angelita	0,3	0,02 – 0,05 M€
Mina Angostura	5,7	0,28 – 0,85 M€
Mina Antigua almagrera	0,9	0,05 – 0,13 M€
Mina Campanario	5,7	0,28 – 0,85 M€
Mina Castillo del Buitrón	10	0,50 – 1,50 M€
Mina Concepción	18	0,90 – 2,70 M€
Mina Confesionario	29	1,45 – 4,35 M€
Mina Cruz Infante	No se dispone de datos	N/A
Mina Cueva de la Mora	62	3,10 – 9,30 M€
Mina El Carpio	4	0,20 – 0,60 M€
Mina El Soldado	1,5	0,07 – 0,22 M€
Mina Esperanza	3	0,15 – 0,45 M€
Mina Gloria	1,5	0,07 – 0,22 M€
Mina La Descamisada	1	0,05 – 0,15 M€
Mina La Joya	14	0,70 – 2,10 M€
Mina La Lapilla	15	0,75 – 2,25 M€

Mina La Torerera	7	0,35 – 1,05 M€
Mina El Perrunal	7	0,35 – 1,05 M€
Mina Lomero-Poyatos	17	0,85 – 2,55 M€
Mina Los Bueyes	1	0,05 – 0,15 M€
Mina Poderosa	17	0,85 – 2,55 M€
Mina Prado Vicioso	0,4	0,02 – 0,06 M€
Mina San Miguel	37	1,85 – 5,55 M€
Mina San Platón	3,5	0,17 – 0,52 M€
Mina Sorpresa	No se dispone de datos	-
Mina Sotiel Coronada	29	1,45 – 4,35 M€
Mina Tinto-Santa Rosa	15	0,75 – 2,25 M€
Mina Vulcano	0,3	0,01 – 0,04 M€
Mina Las Viñas	26	1,30 – 3,90 M€
TOTAL FASE 2 (M€):		16,6 – 49,8 M€

(*) Superficie que no está incluida en el Plan de Restauración del Proyecto Riotinto.

Tabla 24. Evaluación económica de las actuaciones de remediación Fase 2 mediante dry covers

Actuaciones de sellado de escombreras (Dry covers)	Superficie (ha)	CAPEX (M€)
Mina Angelita	0,3	0,05 – 0,12 M€
Mina Angostura	5,7	0,87 – 2,36 M€
Mina Antigua almagrera	0,9	0,14 – 0,37 M€
Mina Campanario	5,7	0,87 – 2,36 M€
Mina Castillo del Buitrón	10	1,52 – 4,15 M€
Mina Concepción	18	2,74 – 7,46 M€
Mina Confesionario	29	4,42 – 12,03 M€
Mina Cruz Infante	No se dispone de datos	N/A
Mina Cueva de la Mora	62	9,45 – 25,71 M€
Mina El Carpio	4	0,61 – 1,66 M€
Mina El Soldado	1,5	0,23 – 0,62 M€
Mina Esperanza	3	0,46 – 1,24 M€

Mina Gloria	1,5	0,23 – 0,62 M€
Mina La Descamisada	1	0,15 – 0,41 M€
Mina La Joya	14	2,13 – 5,81 M€
Mina La Lapilla	15	2,29 – 6,22 M€
Mina La Torerera	7	1,07 – 2,9 M€
Mina El Perrunal	7	1,07 – 2,9 M€
Mina Lomero-Poyatos	17	2,59 – 7,05 M€
Mina Los Bueyes	1	0,15 – 0,41 M€
Mina Poderosa	17	2,59 – 7,05 M€
Mina Prado Vicioso	0,4	0,06 – 0,17 M€
Mina San Miguel	37	5,64 – 15,34 M€
Mina San Platón	3,5	0,53 – 1,45 M€
Mina Sorpresa	No se dispone de datos	–
Mina Sotiel Coronada	29	4,42 – 12,03 M€
Mina Tinto-Santa Rosa	15	2,29 – 6,22 M€
Mina Vulcano	0,3	0,05 – 0,12 M€
Mina Las Viñas	26	3,96 – 10, 78 M€
TOTAL FASE 2 (M€):		50,57 – 137,6 M€

6. Conclusiones y próximos pasos

El presente estudio ha permitido **inventariar** y **caracterizar** los pasivos mineros históricos abandonados que impactan directamente sobre los recursos hídricos de la Cuenca del Odiel, así como **proponer y cuantificar en coste una serie de soluciones de remediación** a implementar para disminuir la carga contaminante asociada.

El inventariado y caracterización (basada en un análisis bibliográfico), **exponen que la carga contaminante que impacta en la Cuenca del Odiel no está asociada a la actividad minera de la zona, sino que está asociada a una herencia de pasivos mineros históricos abandonados** (en su mayoría relativos a pequeñas explotaciones abandonadas desde hace siglos). Específicamente, existen **cuatro focos principales de pasivos mineros históricos abandonados (RioTinto, San Telmo, La Zarza y Tharsis)**, responsables de la mayor parte de la carga contaminante. Por otro lado, el restante está principalmente ligado a la **contaminación difusa asociada a las escorrentías generadas en las escombreras** del resto de pasivos mineros. Es importante remarcar que, lejos de contribuir a la carga contaminante, **las empresas mineras de la zona juegan un papel clave en la remediación de estos pasivos históricos, habiendo ya desarrollado algunas acciones específicas para mitigar su impacto como es el caso de Proyecto RioTinto.**

Para la propuesta de soluciones de remediación, se ha realizado una revisión del estado del arte de las **principales rutas y sistemas (activos y pasivos) de tratamiento de aguas ácidas de mina, así como otras estrategias de renaturalización y tratamiento como es el uso de dry covers y tecnosuelos en el sellado de escombreras.**

Los pasivos mineros identificados pertenecen a explotaciones mineras abandonadas y están ubicados en zonas aisladas, por lo tanto, la gestión y coste de estas aguas ácidas de mina cuentan con una dificultad añadida dada la falta de infraestructura cercana en la que centralizar efluentes o la disponibilidad de mano de obra para un control, operación y mantenimiento continuo. Estos argumentos **posicionan en muchos de los casos evaluados a los sistemas de remediación pasivos como los más adecuados**, dado que el coste operativo de los mismos es significativamente menor (0,27-0,52 €/m³) al de los sistemas de remediación activos (2,30 - 3,80 €/m³).

Como tratamiento pasivo de referencia para este estudio, se ha identificado la tecnología de **Sustrato Disperso Alcalino (DAS)** que propone desde un punto de vista técnico-económico una mejora significativa al resto de tecnologías de remediación pasiva dada su **flexibilidad para la gestión de altas cargas de acidez y altas concentraciones de metales sin riesgo a la obstrucción**. Referencias a escala real de la tecnología muestran que se alcanzan eficiencias totales tanto para la eliminación de metales disueltos como en la neutralización de la acidez, sin embargo, la concentración de sulfatos no se vio reducida a menos de 2000 mg/L.

Por otro lado, se proponen otras estrategias de remediación como el uso de tecnosuelos que no solamente permite el sellado de las escombreras (y por lo tanto minimizar la generación del volumen de escorrentía) sino también la opción de renaturalizar dichas zonas desde un punto de vista ecológico, productivo y paisajístico.

La propuesta de soluciones de remediación se ha planteado en 2 fases a modo de priorización de inversiones y actuaciones:

- **Fase 1: Remediación de los pasivos mineros en RíoTinto, San Telmo, La Zarza y Tharsis.** Se han propuesto soluciones de remediación para los distintos focos de contaminación para cada una de las zonas. En el Proyecto RíoTinto existe ya un Plan de Restauración en el que existen actuaciones realizadas, en curso o planificadas y para las que se ha estimado un CAPEX y un OPEX, específicamente para la gestión de los pasivos de la zona no operativa. Por otro lado, en San Telmo, La Zarza y Tharsis se ha propuesto la implantación de sistemas DAS para el abatimiento total de los metales y la alcalinidad, así como el sellado de escombreras. Para la Fase 1 se ha estimado una horquilla de CAPEX total de **42,3 - 104,1 M€ para el escenario en el que se tiene en cuenta el sellado de escombreras mediante tecnosuelos y de 105,87 – 270,77 M€ para el escenario en el que se evalúa el recubrimiento de escombreras mediante dry covers, y un OPEX total de 7,6 – 9,4 M€/año**, principalmente ligado a la unificación de drenajes y tratamiento centralizado con sistema fisicoquímico en PTA de los lixiviados.
- **Fase 2: Remediación del resto de los pasivos mineros.** Se ha cuantificado el coste del sellado tanto mediante el uso de tecnosuelos como de dry covers del restante de pasivos mineros identificado en el perímetro. Para la Fase 2 se ha estimado una horquilla de CAPEX total de **19,1 y 57,3 M€ en el caso de la tecnología de tecnosuelos y de 50,57 – 137,6 M€ para el uso de dry covers.**

El abatimiento coste-efectivo de los sulfatos sigue siendo un punto a resolver en el tratamiento de aguas ácidas de mina. Los tratamientos activos fisicoquímicos permiten alcanzar concentraciones de sulfatos en torno a los 1200-1500 mg/L (solubilidad del yeso), y es difícil alcanzar valores menores, al menos en términos de rentabilidad.

No obstante, a esta disminución de aportes hay que unir que en los cursos afectados por drenaje ácido o lixiviados de mina, a medida que nos alejamos de los focos contaminantes se produce una recuperación de la calidad del agua por procesos de atenuación natural. La experiencia acumulada sobre embalses ya existentes que demuestra que estos podrían actuar como sumideros de contaminantes, produciendo una atenuación natural de la contaminación sobre las aguas embalsadas, basada fundamentalmente en mecanismos de dilución, por los cambios del pH y por la precipitación de sulfuros metálicos en las zonas anóxicas de los embalses o en la interfase agua-sedimento.

Más allá, y en combinación a los tratamientos identificados para remediar los pasivos mineros abandonados, se podría plantear acciones innovadoras como la **implementación de tecnologías emergentes para la recuperación de metales así como ácidos y otros recursos de valor añadido** aguas arriba. Este tipo de acercamiento innovador estaría alineado con la estrategia de la Comisión Europea de autonomía estratégica en materias primas críticas, que incluye la recuperación de las mismas de fuentes secundarias, como es el caso de los pasivos objeto de estudio. Debido a ello, **estas acciones, si se llevan a cabo en conjunto con las ya identificadas de remediación en el presente estudio, estarían bien posicionadas para recibir financiación de la Comisión Europea a través de los Fondos NextGenEU.** Estas aportaciones económicas pueden jugar un papel clave en la viabilidad de la implantación y gestión de este tipo de sistemas de tratamiento. La adecuación de las acciones específicas identificadas en el estudio -en conjunto con otras más innovadoras ya mencionadas- con convocatorias dotadas de Fondos NextGenEU que se abrirán en el marco temporal de 2023-2025 tendrá que ser evaluado caso a caso.

7. Referencias bibliográficas

- Acharya, Bharat Sharma, and Gehendra Kharel. "Acid mine drainage from coal mining in the United States—An overview." *Journal of Hydrology* 588 (2020): 125061.
- Acharya, Bharat Sharma, and Gehendra Kharel. "Acid mine drainage from coal mining in the United States—An overview." *Journal of Hydrology* 588 (2020): 125061.
- Acid mine drainage in the Iberian Pyrite Belt: 1. Hydrochemical characteristics and pollutant load of the Tinto and Odiel rivers. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, vol. 20, no 11, p. 7509-7519
- Ali, Housseem E. Ben, et al. "Performance of passive systems for mine drainage treatment at low temperature and high salinity: A review." *Minerals Engineering* 134 (2019): 325-344.
- ÁLVAREZ, Manuel Olías, et al. Caracterización de lixiviados mineros de la cuenca del río Odiel (SO España) para el diseño de plantas de tratamiento pasivo con tecnología DAS. *Geotemas* (Madrid), 2016, no 16, p. 127-130.
- AYANGBENRO, Ayansina S.; OLANREWAJU, Oluwaseyi S.; BABALOLA, Olubukola O. Sulfate-reducing bacteria as an effective tool for sustainable acid mine bioremediation. *Frontiers in microbiology*, 2018, p. 1986.
- Ayora, Carlos, et al. "Drenaje ácido de minas en la Faja Pirítica Ibérica: Geoquímica, tratamiento pasivo y sus residuos en una economía circular." *Recursos minerales y medioambiente: una herencia que gestionar y un futuro que construir* (2020).
- Brodie, G.A. 1993. Staged, aerobic constructed wetlands to treat acid drainage: Case history of Fabius Impoundment 1 and overview of the Tennessee Valley Authority's Program. En: G. A. Moshiri (ed.), *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*, CRC Press, Boca Raton, 157-166.
- Cánovas, C. R., et al. "Metal-fluxes characterization at a catchment scale: Study of mixing processes and end-member analysis in the Meca River watershed (SW Spain)." *Journal of Hydrology* 550 (2017): 590-602.
- Cánovas, C. R., et al. "Water acidification trends in a reservoir of the Iberian Pyrite Belt (SW Spain)." *Science of The Total Environment* 541 (2016): 400-411.
- Caraballo, Manuel A., et al. "Tratamiento pasivo con un sustrato alcalino disperso de drenajes ácidos de mina con alta carga metálica en la cuenca del río Odiel (Faja Pirítica Ibérica, SO España)." *Geogaceta* 48 (2010): 111-114.
- Carlos Ayora, Salud Orden, Francisco Macías y José Miguel Nieto. 2020. DRENAJE ÁCIDO DE MINAS EN LA FRANJA PIRÍTICA IBÉRICA: GEOQUÍMICA, TRATAMIENTO PASIVO Y SUS RESIDUOS EN UNA ECONOMÍA CIRCULAR. [aut. libro] Jorge Loredó. *Recursos Minerales y Medioambiente: Una Herencia que gestionar y un futuro que construir*. 2020, págs. 59-68.

- Castendyk, D. N., et al. "Modeling and management of pit lake water chemistry 2: Case studies." *Applied Geochemistry* 57 (2015): 289-307.
- CH2M HILL, (2010) Review of available technologies for the removal of selenium from water – Final report prepared for North American Metals Council
- CONSELLERÍA DE MEDIO AMBIENTE E DESENVOLVEMENTO SOSTIBLE. 2008. Resolución de 8 de xaneiro referente a elaboración de solos (Tecnosoles) derivados de residuos.
- Eger, P. 1994. Wetland treatment for trace metal removal from mine drainage: the importance of aerobic and anaerobic processes. *Water, Science and Technology*, 29, (4), 249-256. Wildeman, T., Gusek, J. y Brodie, G. 1991. Wetland design for mining operations. Draft handbook presented at the 1991 American Society for Surface Mining and Reclamation Conference, Durango, CO.
- Espana, Javier Sánchez, et al. "Acid mine drainage in the Iberian Pyrite Belt (Odiel river watershed, Huelva, SW Spain): geochemistry, mineralogy and environmental implications." *Applied geochemistry* 20.7 (2005): 1320-1356.
- Espana, Javier Sánchez, et al. "The acidic mine pit lakes of the Iberian Pyrite Belt: An approach to their physical limnology and hydrogeochemistry." *Applied Geochemistry* 23.5 (2008): 1260-1287.
- España, Javier Sánchez, et al. "The natural attenuation of two acidic effluents in Tharsis and La Zarza-Perrunal mines (Iberian Pyrite Belt, Huelva, Spain)." *Environmental Geology* 49.2 (2005): 253-266.
- Evangelou, V.P. 1998. Environmental soil and water chemistry. Principles and applications. Wiley-Interscience Publication, 564 pp.
- FLORES, H., et al. UAS-Based Hyperspectral Environmental Monitoring of Acid Mine Drainage Affected Waters. *Minerals* 2021, 11, 182. 2021.
- Fripp, J., Ziemkiewicz, P. y Charkavorki, H. 2000. Acid mine drainage treatment. Ecosystem Management and Restoration Research Program (ERDC TN-EMRRP-SR14), U. S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS, 7 pp. Kepler, D. y McCleary, E. 1994. Successive alkalinity producing systems (SAPS) for the treatment of acidic mine drainage. International Land Reclamation and Mine Drainage Conference and Third International Conference on the Abatement of Acidic Drainage, Pittsburgh, April, 195-204.
- Fuentes-López, J. M., Olías, M., León, R., Basallote, M. D., Macías, F., Moreno-González, R., & Cánovas, C. R. (2022). Stream-pit lake interactions in an abandoned mining area affected by acid drainage (Iberian Pyrite Belt). *Science of The Total Environment*, 833, 155224.
- Fuentes-López, J. M., Olías, M., León, R., Basallote, M. D., Macías, F., Moreno-González, R., & Cánovas, C. R. (2022). Stream-pit lake interactions in an abandoned mining area affected by acid drainage (Iberian Pyrite Belt). *Science of The Total Environment*, 833, 155224.
- Galván, L., Olías, M., Cánovas, C.R., Sarmiento, A.M., Nieto, J.M., 2016. Hydrological model-ing of a watershed affected by acid mine drainage (Odiel

- River, SW Spain). Assessment of the pollutant contributing areas. *J. Hydrol.* 540, 196–206
- GALVÁN, LAURA; OLÍAS, MANUEL. Estudio de la contaminación por drenaje ácido de minas en la cuenca del Río Odiel. *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía*, 2015, vol. 20, p. 51-52.
 - Geldenhuys, A.J., Maree, J.P., De Beer, M., Hlabela, P., 2003. An integrated limestone/ lime process for partial sulphate removal. *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.* 103, 345– 354.
 - GELLER, Walter, et al. (ed.). *Acidic pit lakes: the legacy of coal and metal surface mines*. Springer Science & Business Media, 2012.
 - González, Raúl Moreno, et al. "Hydrological characterization and prediction of flood levels of acidic pit lakes in the Tharsis mines, Iberian Pyrite Belt." *Journal of Hydrology* 566 (2018): 807-817.
 - GONZÁLEZ, Raúl Moreno, et al. Hydrological characterization and prediction of flood levels of acidic pit lakes in the Tharsis mines, Iberian Pyrite Belt. *Journal of Hydrology*, 2018, vol. 566, p. 807-817.
 - GRANDE GIL, JOSÉ ANTONIO (ed.). *Drenaje Ácido de Mina en la Faja Pirítica Ibérica: Técnicas de estudio e inventario de explotaciones*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Huelva, 2016.
 - Grande, José A., et al. "Odiel River (SW Spain), a Singular Scenario Affected by Acid Mine Drainage (AMD): Graphical and Statistical Models to Assess Diatoms and Water Hydrogeochemistry Interactions." *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18.16 (2021): 8454.
 - Guimaraes, D., Leao, V.A., 2014. Fundamental aspects related to batch and fixed-bed sulfate sorption by the macroporous type 1 strong base ion exchange resin Purolite A500. *J. Environ. Manag.* 145, 106–112
 - HARRIES, John. *Acid mine drainage in Australia: Its extent and potential future liability*. Canberra: Supervising Scientist, 1997
 - Hedin, R. 1997. Passive mine water treatment en the Eastern United States. CIWEM National Conference, Minewater treatment using wetlands. Newcastle, 1, 1- 15.
 - Hedin, R.S. y Watzlaf, G.R. 1994. The effects of anoxic limestone drains on mine water chemistry. International Land Reclamation and Mine Drainage Conference and Third International Conference on the Abatement of Acidic Drainage, Pittsburgh, April, 185-194
 - INAP. International Network for Acid Prevention. Treatment of sulphate in mine effluents. Lorax Environmental, 2003.
 - Johnson, D.B., Hallberg, K.B., 2005. Acid mine drainage remediation options: a review. *Sci. Total Environ.* 338, 3–14.
 - Kauppila, Päivi, Marja Liisa Räsänen, and Sari Myllyoja. "Best Environmental Practices in Metal Ore Mining (Metallimalmikaivostoiminnan parhaat ympäristökäytännöt)." (2013).

- Larraguibel, Alfonso, et al. "Exploring sulfate and metals removal from Andean acid mine drainage using CaCO₃-rich residues from agri-food industries and witherite (BaCO₃)." *Journal of Cleaner Production* 274 (2020): 123450.
- LUCHETA, A. R.; OTERO, X.L.; MACIAS, F.; LAMBAIS, M.R. 2013. Bacterial and archaeal communities in the acid pit lake sediments of a chalcopyrite mine. *Extremophiles*
- Macías Suárez, Francisco. "Estudio mineralógico y geoquímico de la optimización de un sistema de tratamiento pasivo de drenaje ácido de mina con alta carga metálica." (2013).
- Macías, Francisco, et al. "A geochemical approach to the restoration plans for the Odiel River basin (SW Spain), a watershed deeply polluted by acid mine drainage." *Environmental Science and Pollution Research* 24.5 (2017): 4506-4516.
- Manuel Olías Álvarez, Jose Miguel Nieto Liñán, Francisco Macías Suarez. 2018. PROPUESTA PARA EL PLAN DE RESTAURACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN MINERA EN LA CUENCA DEL RÍO ODIEL. Universidad de Huelva : s.n., 2018.
- Nariyan, Elham, Sillanpää, Mika, Wolkersdorfer, Christian, 2017. Electrocoagulation treatment of mine water from the deepest working European metal mine – performance, isotherm and kinetic studies. *Separ. Purif. Technol.* 177, 363–373
- Orden, Salud, et al. "Eco-sustainable passive treatment for mine waters: Full-scale and long-term demonstration." *Journal of environmental management* 280 (2021): 111699.
- Ostalé, Eva Pérez. 2014. Caracterización ambiental de estructuras mineras en la Faja Pirítica Ibérica como soporte metodológico de la gestión territorial. Huelva : s.n., 2014.
- Pinto, Patricio X., Al-Abed, Souhail R., Balz, David A., Butler, Barbara A., Landy, Ronald B., Smith, Samantha J., 2016. Bench-scale and pilot-scale treatment technologies for the removal of total dissolved solids from coal mine water: a review. *Mine Water Environ.* 35, 94–112.
- Pocięcha, Agnieszka, et al. "Rotifer diversity in the acidic pyrite mine pit lakes in the Sudety Mountains (Poland)." *Mine Water and the Environment* 37.3 (2018): 518-527.
- Proyecto de Planta de Tratamiento Pasivo para Drenajes Ácidos de Mina. LIFE-ETAD. Mina Concepción.
- Ramstedt, Madeleine, Erik Carlsson, and Lars Lövgren. "Aqueous geochemistry in the Udden pit lake, northern Sweden." *Applied Geochemistry* 18.1 (2003): 97-108.
- Rötting, T.S., J. Cama, C. Ayora, J.L. Cortina, and J. De Pablo. 2006. Use of caustic magnesia to remove cadmium, nickel, and cobalt from water in passive treatment systems: Column experiments. *Environ. Sci. Technol.* 40:6438–6443.
- Rötting, Tobias S., et al. "Passive treatment of acid mine drainage with high metal concentrations using dispersed alkaline substrate." *Journal of Environmental Quality* 37.5 (2008): 1741-1751.

- Sánchez-España, Javier, et al. "Hydrological investigation of a multi-stratified pit lake using radioactive and stable isotopes combined with hydrometric monitoring." *Journal of Hydrology* 511 (2014): 494-508.
- Semblante, Galilee Uy, Lee, Jonathan Zhiqiang, Lee, Lai Yoke, Ong, Say Leong, Ng, How Yong, 2018. Brine pre-treatment technologies for zero liquid discharge systems. *Desalination* 441, 96–111.
- Silva, A.M., Lima, R.M.F., Leão, V.A., 2012. Mine water treatment with limestone for sulfate removal. *J. Hazard. Mater.* 221–222, 45–55.
- Skousen, J., Rose, A., Geidel, G., Foreman, J., Evans, R. y Hellier, W. 1998. Handbook of technologies for avoidance and remediation of acid mine drainage. Published by The National Mine Land Reclamation Center, West Virginia University, Morgantown, West Virginia, 123 pp
- Skousen, J., Sexstone, A., Garbutt, K. y Sencindiver, J. 1994. Acid mine drainage treatment with wetlands and anoxic limestone drains. En: Kent, D.M. (ed). *Applied wetlands science and technology*. Lewis Publishers, Boca Raton, 263-281.
- Skousen, Jeff, Carl E. Zipper, Arthur Rose, Paul F. Ziemkiewicz, Robert Nairn, Louis M. McDonald, and Robert L. Kleinmann. "Review of passive systems for acid mine drainage treatment." *Mine Water and the Environment* 36, no. 1 (2017): 133-153.
- SOARES, Anderson Borghetti, et al. Design of a Dry Cover Pilot Test for Acid Mine Drainage Abatement in Southern Brazil. I: Materials Characterization and Numerical Modeling. *Mine Water & the Environment*, 2009, vol. 28, no 3.
- Solutions, Green Soil. Proyecto Green Soil Solutions en Minas de Riotinto.
- U.S. EPA 2000. Coal remining best management practices guidance manual. Office of Science and Technology Engineering and Analysis Division. Washington DC. EPA 821-R-00-007. Watzlaf, G. y Hyman, D. 1995. Limitations of passive systems for the treatment of mine drainage. 17 th Annual National Association of Abandoned Mine Lands Conference, Indiana, October, 186-199.
- US Environmental Protection Agency (US EPA), 1994. Technical Document: Acid Mine Drainage Prediction. US EPA Report #EPA-530-R-94-036, US EPA Office of Solid Waste, Washington, DC.
- Vincent, Simon, et al. "Gold mine effluent treatment: cyanide compounds and total nitrogen biodegradation using moving bed biofilm reactor." *Proceedings of the Water Environment Federation* 2016.7 (2016): 5636-5651.
- Wolkersdorfer, C. (2008). *Water management at abandoned flooded underground mines: fundamentals, tracer tests, modelling, water treatment*. Springer Science & Business Media.
- Zipper, Carl, and Jeff Skousen. "Passive treatment of acid mine drainage." *Acid mine drainage, rock drainage, and acid sulfate soils: causes, assessment, prediction, prevention, and remediation* (2014): 339-353.

8. Anexos

- **A.1. Descripción, fichas técnicas y cartografía de las estructuras mineras**

Subcuenca Oraque

Lomero-Poyatos

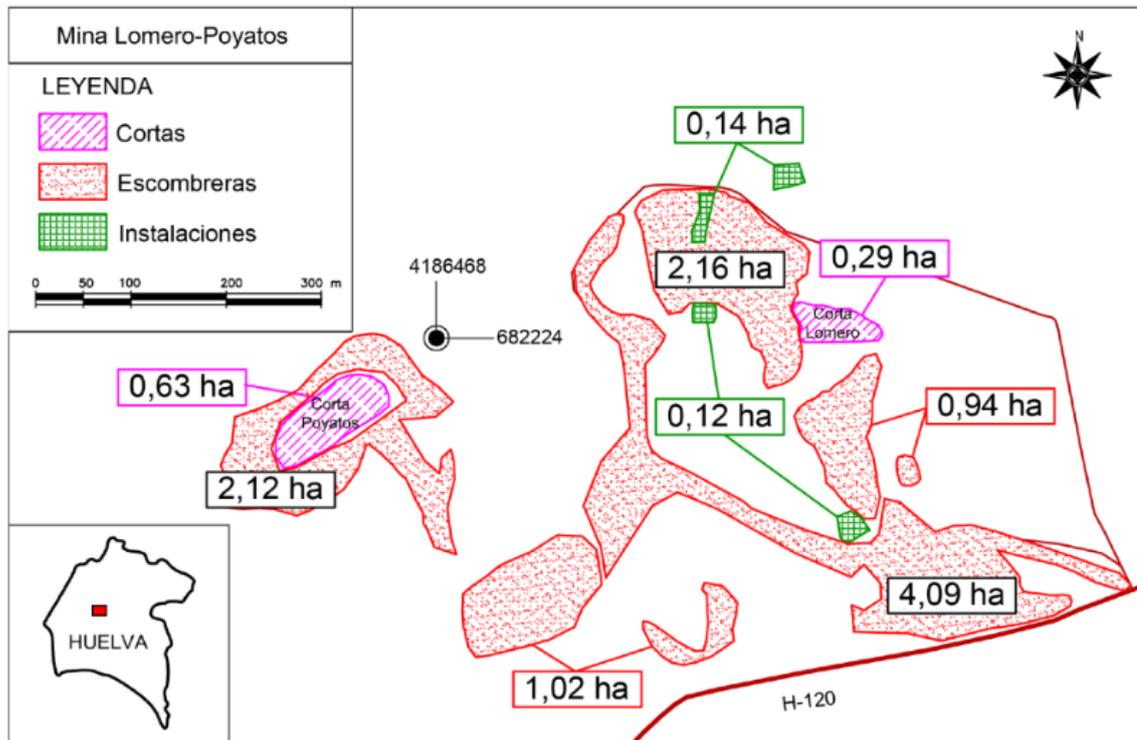
La actividad de esta mina cesó en 1984, se realizó sobre todo explotación subterránea, pero también hubo excavación a cielo abierto por pequeñas cortas.

Esta mina presenta una descarga ácida constante proveniente de una antigua galería, así como lixiviados por contaminación difusa de toda la zona afectada por la minería. Los lixiviados de esta mina drenan hacia la rivera de la Pelada, constituyendo su primera descarga ácida.

Ficha técnica

1. Identificación de la Mina			
Nombre de la Mina A/P		Mina Lomero-Poyatos	
Mapa Topográfico N°	937-II	Nombre:	Valdelamusa
		Escala:	1:25.000
2. Estado y Tipo de la Mina			
Estado:	<input type="checkbox"/> Abandonada		
	<input type="checkbox"/> Activa		
	<input checked="" type="checkbox"/> Proyecto reapertura		
Tipo:	<input type="checkbox"/> Subterránea	Labores accesibles	Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
	<input checked="" type="checkbox"/> Cielo abierto	Inundada	No <input type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/>
3. Estructuras Mineras Observadas			
Escombreras	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Socavones	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Pozos	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Galerías	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
4. Entorno Geológico			
Sulfuros, pizarras, cuarcitas y rocas volcánicas del Carbonífero Inferior			
La mineralización aparece en forma de sulfuros masivos, sulfuros complejos y pirita cobriza			
Paragénesis mineral: pirita, tetraedrita, galena, calcopirita, pirrotina, esfalerita			

Cartografía estructuras mineras



Mina San Telmo

La explotación minera de Mina San Telmo cesó en 1989 y desde el año 2001 aproximadamente la corta rebosa por su extremo oeste y recibe aportes superficiales por zona este. La superficie de la corta inundada ocupa un diámetro de entre 380 y 510 m aproximadamente, y supera los 160 m de profundidad, con una acumulación de aguas ácidas de unos 6 hm³. (Ollás y Nieto, 2018) Esto hace de Mina San Telmo uno de los principales focos de contaminación de la Franja Pirítica Ibérica, concretamente, constituye el **4º potencial contaminante de la cuenca del río Odiel** y supone el aporte contaminante más importante de la zona norte de la cuenca del río Oraque.

En esta mina hay dos zonas de escombreras principales, que se sitúan al noreste (39,42 ha) y al oeste (34,06 ha) de la corta, esta última tiene una mayor altura y mayor potencial contaminante.

Los caudales de lixiviados ácidos se mantienen elevados incluso en verano y la mayoría desembocan en el Rivera de la Fresnera (cuenca del río Oraque).

Ficha técnica

1. Identificación de la Mina			
Nombre de la Mina A/P	<input type="text" value="Mina San Telmo"/>		
Mapa Topográfico N°	<input type="text" value="937-II"/>	Nombre:	<input type="text" value="Valdelamusa"/>
		Escala:	<input type="text" value="1:25.000"/>
2. Estado y Tipo de la Mina			
Estado:	<input checked="" type="checkbox"/> Abandonada		
	<input type="checkbox"/> Activa		
	<input type="checkbox"/> Proyecto reapertura		
Tipo:	<input type="checkbox"/> Subterránea	Labores accesibles	Si <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>
	<input checked="" type="checkbox"/> Cielo abierto	Inundada	No Si <input type="checkbox"/> Si <input checked="" type="checkbox"/>
3. Estructuras Mineras Observadas			
Escombreras	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Socavones	No <input checked="" type="checkbox"/>	Si <input type="checkbox"/>	
Pozos	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Galerías	No <input checked="" type="checkbox"/>	Si <input type="checkbox"/>	
4. Entorno Geológico			
Sulfuros y rocas volcánicas ácidas del Carbonífero Inferior. A techo Grupo Culm.			
La mineralización se presenta en forma de sulfuros masivos y complejos			
Paragénesis mineral: pirita, esfalerita, calcopirita, galena y magnetita			

Cartografía estructuras mineras

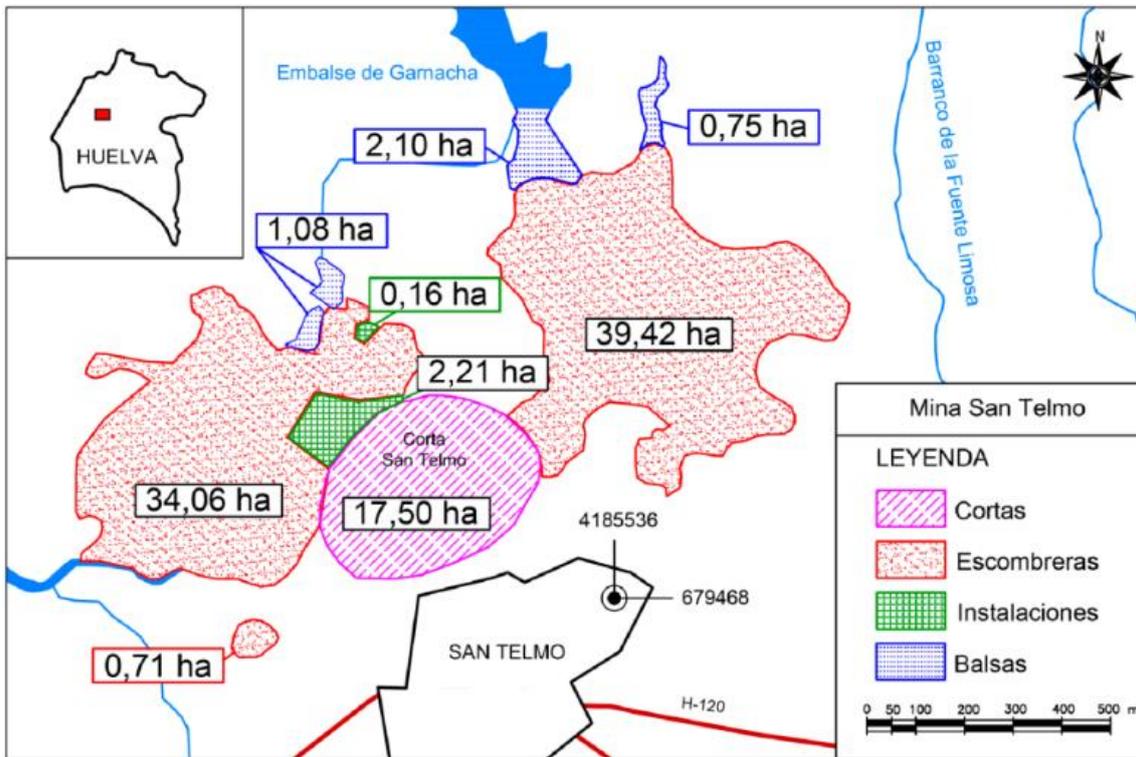


Figura 18. Cartografía estructuras mineras de mina San Telmo (Grande, 2016)

El Carpio

Se trata de una mina de interior que cesó su actividad en 1921. La superficie afectada por la minería es de aproximadamente 4 ha. (Figura 4)

Presenta caudales elevados en invierno con bajos niveles de contaminación, mientras que en verano no tiene salidas de lixiviados ácidos. Los lixiviados llegan a un afluente de la riera de la Fresnera a través de un arroyo que pasa por la zona contaminada, este arroyo tiene niveles de contaminación moderados hasta que a 2 km aguas abajo recibe la descarga de mina San Telmo.

Ficha técnica

1. Identificación de la Mina			
Nombre de la Mina A/P		<input type="text" value="Mina El Carpio"/>	
Mapa Topográfico N°	<input type="text" value="937-II"/>	Nombre:	<input type="text" value="Valdelamusa"/>
		Escala:	<input type="text" value="1:25.000"/>
2. Estado y Tipo de la Mina			
Estado:	<input checked="" type="checkbox"/> Abandonada		
	<input type="checkbox"/> Activa		
	<input type="checkbox"/> Proyecto reapertura		
Tipo:	<input type="checkbox"/> Subterránea	Labores accesibles	Si <input type="checkbox"/>
	<input checked="" type="checkbox"/> Cielo abierto	Inundada	No <input checked="" type="checkbox"/>
			No Si <input type="checkbox"/>
3. Estructuras Mineras Observadas			
Escombreras	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Socavones	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Pozos	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Galerías	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
4. Entorno Geológico			
Pizarras del Devónico Superior. Paquetes pizarroso-cuarcíticos y sulfuros masivos y rocas volcánicas del Carbonífero Inferior			
Paragénesis mineral: Pirita y Calcopirita. Altas leyes de cobre.			

Cartografía estructuras mineras

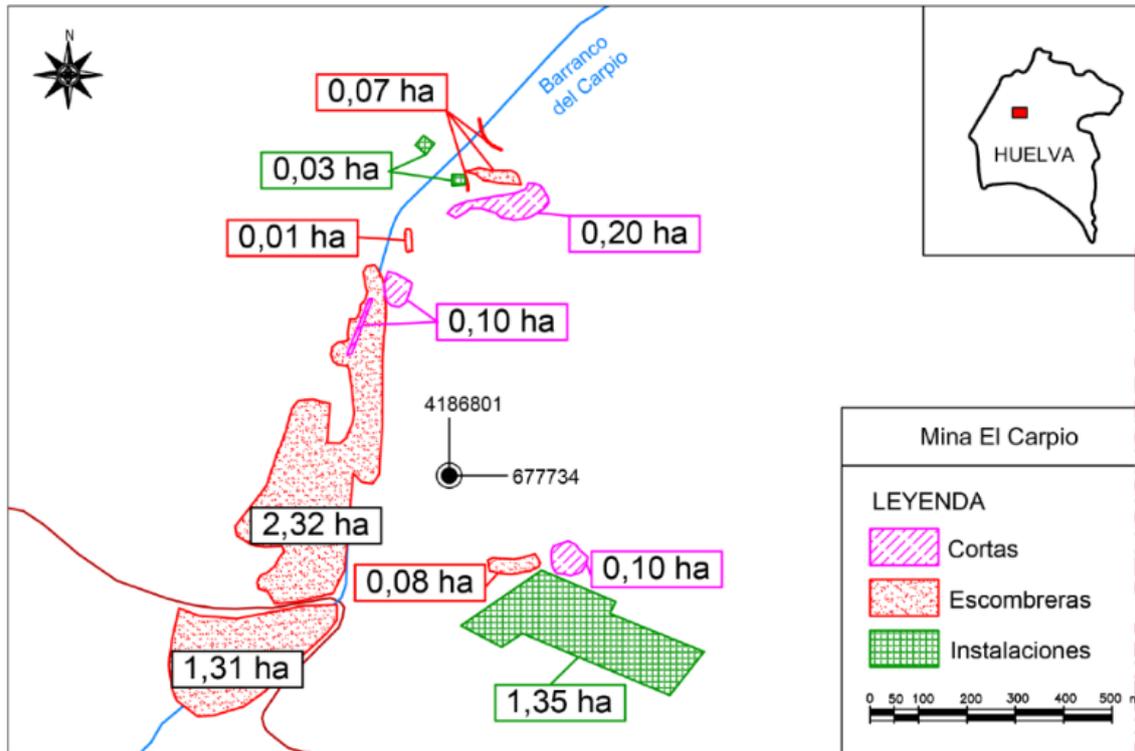


Figura 19. Cartografía estructuras mineras de la mina El Carpio (Grande, 2016)

La Joya

La explotación minera de mina La Joya cesó en 1980.

La superficie afectada por las escombreras de la mina es de aproximadamente 14 ha. La corta de mayores dimensiones se encuentra inundada por un lago (210 x 50 m). Los lixiviados procedentes de La joya desembocan en un afluente de la riera de la Fresnera, previamente contaminado por los lixiviados del Carpio y San Telmo.

Ficha técnica

1. Identificación de la Mina			
Nombre de la Mina A/P		<input type="text" value="Mina La Joya"/>	
Mapa Topográfico N°	<input type="text" value="938-I"/>	Nombre:	<input type="text" value="El Patrás"/>
		Escala:	<input type="text" value="1:25.000"/>
2. Estado y Tipo de la Mina			
Estado:	<input checked="" type="checkbox"/> Abandonada		
	<input type="checkbox"/> Activa		
	<input type="checkbox"/> Proyecto reapertura		
Tipo:	<input type="checkbox"/> Subterránea	Labores accesibles	Si <input type="checkbox"/>
	<input checked="" type="checkbox"/> Cielo abierto	Inundada	No <input type="checkbox"/>
3. Estructuras Mineras Observadas			
Escombreras	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Socavones	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Pozos	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Galerías	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
4. Entorno Geológico			
Sulfuros masivos y rocas volcánicas del Carbonífero Inferior. A techo Grupo Culm.			
Paragénesis mineral: pirita, arsenopirita y esfalerita como principales, y galena, pirrotina, calcopirita, sulfosales de plomo y covellina como secundarios			

Cartografía de estructuras mineras

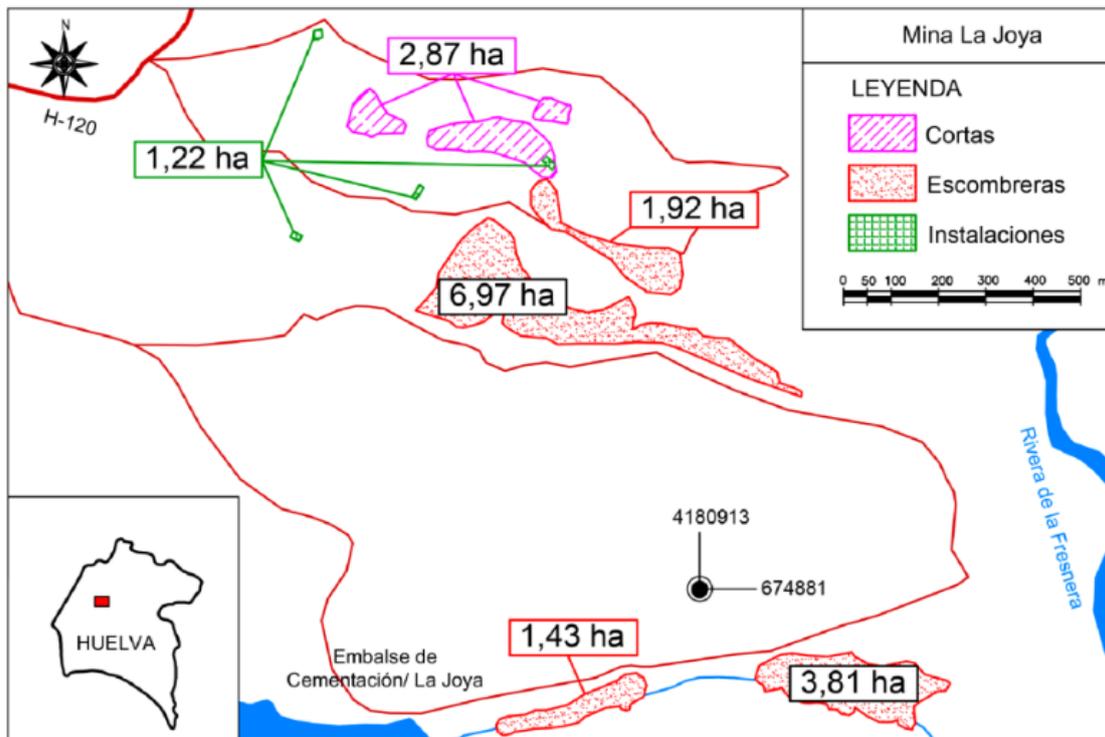


Figura 20. Cartografía de estructuras mineras de mina La Joya (Grande, 2016)

Subcuenca Odiel

Mina Concepción

El último periodo de explotación de mina Concepción fue desde 1952 hasta 1989. El sellado del túnel por el que se extraía el mineral provocó la inundación de la corta, cuyo volumen de agua almacenado es de 0,4 hm³ aproximadamente. (Olias y Nieto, 2018)

Los principales focos contaminantes derivados de esta mina provienen de las salidas de agua ácida de la corta a través de una galería, de las surgencias en la base de unas escombreras de aproximadamente 5 ha al norte y de los materiales generados en la zona de tratamiento y transporte de mineral próxima al río Odiel. Los lixiviados que se generan en la corta y en las escombreras del norte llegan al río Odiel a través del Barranco de los Diques. La balsa de lodos (0,85 ha) ha sido restaurada y genera una cantidad reducida de lixiviados. (Figura 6)

Tiene implementada una planta de tratamiento pasivo basada en la tecnología DAS (Dispersed Alkaline Substrate) desde 2016 que presenta una capacidad de tratamiento de 4 L/s, aunque todavía sigue existiendo contaminación por lixiviados ácidos que surgen de la parte baja de las escombreras norte y en la zona de tratamiento de mineral situada junto al cauce del río Odiel.

Ficha técnica

1. Identificación de la Mina			
Nombre de la Mina A/P	<input type="text" value="Mina Concepción"/>		
Mapa Topográfico N°	<input type="text" value="938-II"/>	Nombre:	<input type="text" value="Campofrío"/>
		Escala:	<input type="text" value="1:25.000"/>
2. Estado y Tipo de la Mina			
Estado:	<input checked="" type="checkbox"/> Abandonada		
	<input type="checkbox"/> Activa		
	<input type="checkbox"/> Proyecto reapertura		
Tipo:	<input type="checkbox"/> Subterránea	Labores accesibles	Si <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>
	<input checked="" type="checkbox"/> Cielo abierto	Inundada	Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
3. Estructuras Mineras Observadas			
Escombreras	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Socavones	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Pozos	No <input checked="" type="checkbox"/>	Si <input type="checkbox"/>	
Galerías	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
4. Entorno Geológico			
Rocas volcánicas alteradas y sulfuros masivos del Carbonífero Inferior. A techo Grupo Culm.			
Paragénesis mineral: Pirita, Calcopirita, Esfalerita, Galena, Tetraedrita, Magnetita, Boulangerita, Covellina, Calcosina, y Malaquita			

Cartografía estructuras mineras

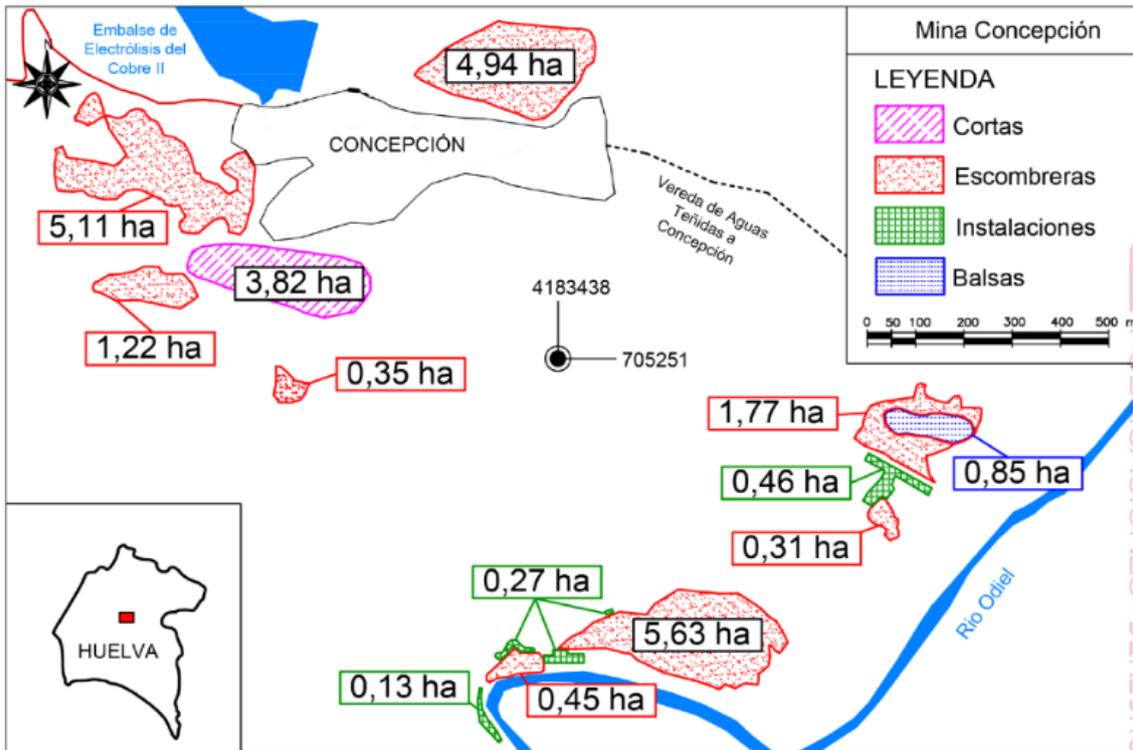


Figura 21. Cartografía estructuras mineras de mina Concepción (Grande, 2016)

Mina Angelita

Se trata de una mina subterránea con una escasa superficie afectada por la minería (aproximadamente 0,5 ha).

Los caudales de lixiviados son inferiores a 0,3 L/s y presentan bajas concentraciones de contaminantes. Drenan hacia un arroyo que va hacia la mina del Monte Romero.

- *Ficha técnica*

1. Identificación de la Mina			
Nombre de la Mina A/P		<input type="text" value="Mina Angelita"/>	
Mapa Topográfico N°	<input type="text" value="938-I"/>	Nombre:	<input type="text" value="El Patrás"/>
		Escala:	<input type="text" value="1:25.000"/>
2. Estado y Tipo de la Mina			
Estado:	<input checked="" type="checkbox"/> Abandonada		
	<input type="checkbox"/> Activa		
	<input type="checkbox"/> Proyecto reapertura		
Tipo:	<input checked="" type="checkbox"/> Subterránea	Labores accesibles	Si <input type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/> Cielo abierto	Inundada	No <input checked="" type="checkbox"/>
3. Estructuras Mineras Observadas			
Escombreras	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Socavones	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Pozos	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Galerías	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
4. Entorno Geológico			
Pizarras y cuarcitas del Grupo Culm. Sulfuros polimetálicos y rocas volcánicas del Carbonífero Inferior			
Los sulfuros aparecen de forma diseminada			
Paragénesis mineral: pirita, calcopirita, galena y esfalerita como principales, y bornita y tetraedrita de forma secundaria			

Cartografía estructuras mineras

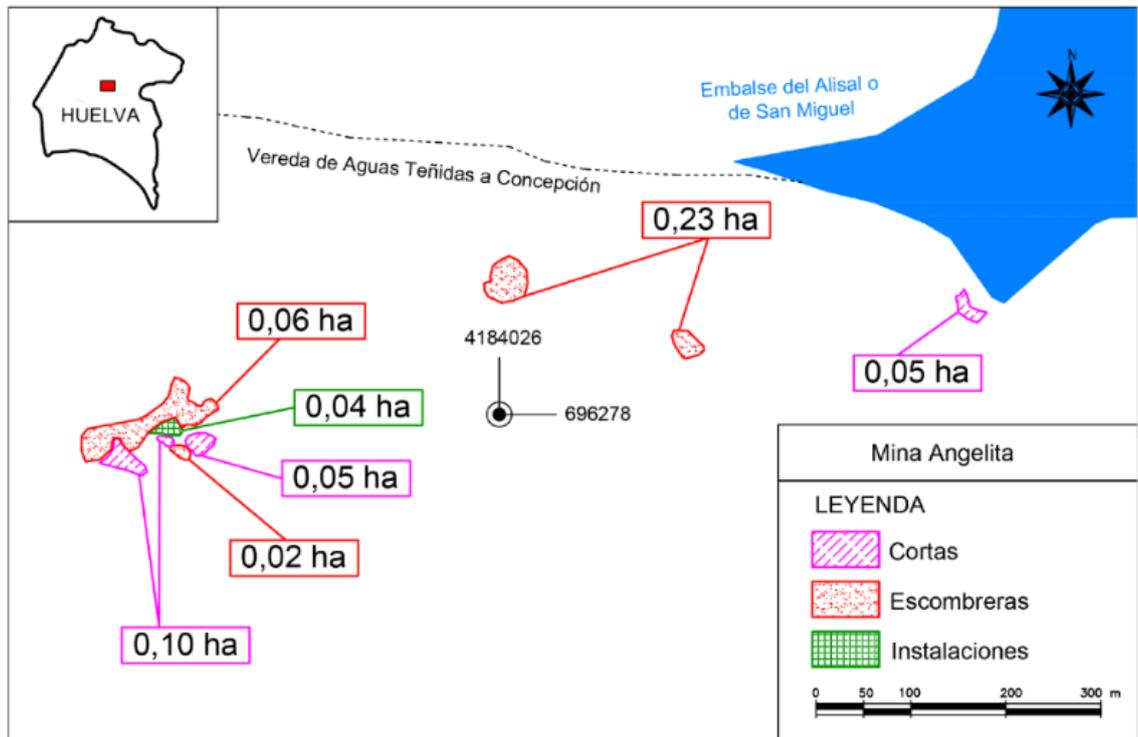


Figura 22. Cartografía estructuras mineras de la mina de Angelita (Grande, 2016)

Mina Angostura

En las estructuras mineras de Mina Angostura se puede observar una corta minera que está inundada por un lago de aproximadamente 100 m de diámetro y una profundidad máxima estimada de 40 m (López Pamo et al., 2008), y varias escombreras que presentan una superficie de aproximadamente 6 ha. (Figura 8).

Esta mina produce contaminación difusa hacia la rivera Seca, sin presentar descargas ácidas relevantes.

-Ficha técnica

1. Identificación de la Mina			
Nombre de la Mina A/P	<input type="text" value="Mina Angostura"/>		
Mapa Topográfico N°	<input type="text" value="938-I"/>	Nombre:	<input type="text" value="El Patrás"/>
		Escala:	<input type="text" value="1:25.000"/>
2. Estado y Tipo de la Mina			
Estado:	<input checked="" type="checkbox"/> Abandonada		
	<input type="checkbox"/> Activa		
	<input type="checkbox"/> Proyecto reapertura		
Tipo:	<input type="checkbox"/> Subterránea	Labores accesibles	Si <input type="checkbox"/>
	<input checked="" type="checkbox"/> Cielo abierto	Inundada	No <input type="checkbox"/>
			No Si <input checked="" type="checkbox"/>
3. Estructuras Mineras Observadas			
Escombreras	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Socavones	No <input checked="" type="checkbox"/>	Si <input type="checkbox"/>	
Pozos	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Galerías	No <input checked="" type="checkbox"/>	Si <input type="checkbox"/>	
4. Entorno Geológico			
Pizarras y Cuarcitas del Grupo Culm. Sulfuros masivos y rocas volcánicas del Carbonífero Inferior			
Paragénesis mineral: pirita, calcopirita y calcosina			

Cartografía estructuras mineras

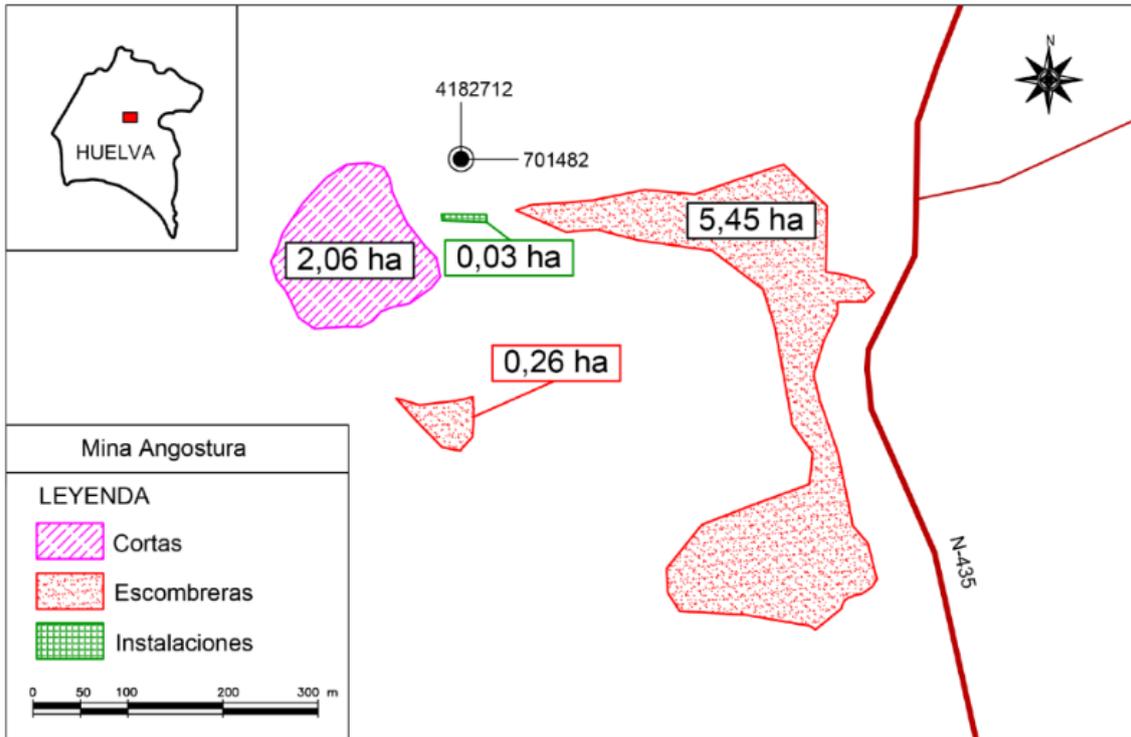


Figura 23. Cartografía estructuras mineras de la mina de Angostura (Grande, 2016)

Mina Campanario

Se explotó mediante minería de interior entre 1876 y 1916 y se localiza entre las minas La Descamisada y Cibeles-Cruz.

La superficie afectada de esta zona es de unas 6 ha y cuenta con una corta de pequeña superficie sin agua y con surgencias de aguas ácidas de bajo caudal (< 0,5 L) pero con concentraciones relevantes de contaminantes. Estos lixiviados son vertidos a una arroyo que es afluente del Barranco de Aguas Agrias, el cual, a su vez, desemboca en el río Odiel.

- *Ficha técnica*

1. Identificación de la Mina			
Nombre de la Mina A/P	<input type="text" value="Mina Campanario"/>		
Mapa Topográfico N°	<input type="text" value="960-III"/>	Nombre: <input type="text" value="Valverde del Camino"/>	Escala: <input type="text" value="1:25.000"/>
2. Estado y Tipo de la Mina			
Estado:	<input checked="" type="checkbox"/> Abandonada		
	<input type="checkbox"/> Activa		
	<input type="checkbox"/> Proyecto reapertura		
Tipo:	<input type="checkbox"/> Subterránea	Labores accesibles	Si <input type="checkbox"/>
	<input checked="" type="checkbox"/> Cielo abierto	Inundada	No <input checked="" type="checkbox"/>
			No Si <input type="checkbox"/>
3. Estructuras Mineras Observadas			
Escombreras	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Socavones	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Pozos	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Galerías	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
4. Entorno Geológico			
Rocas pizarroso-cuarcíticas del Devónico Superior. Sulfuros masivos y rocas volcánicas ácidas del Carbonífero Inferior. A techo Grupo Culm.			
Paragénesis mineral: pirita, calcopirita, esfalerita y galena como principales y arsenopirita, marcasita y pirrotina como secundarios			

- Cartografía estructuras mineras

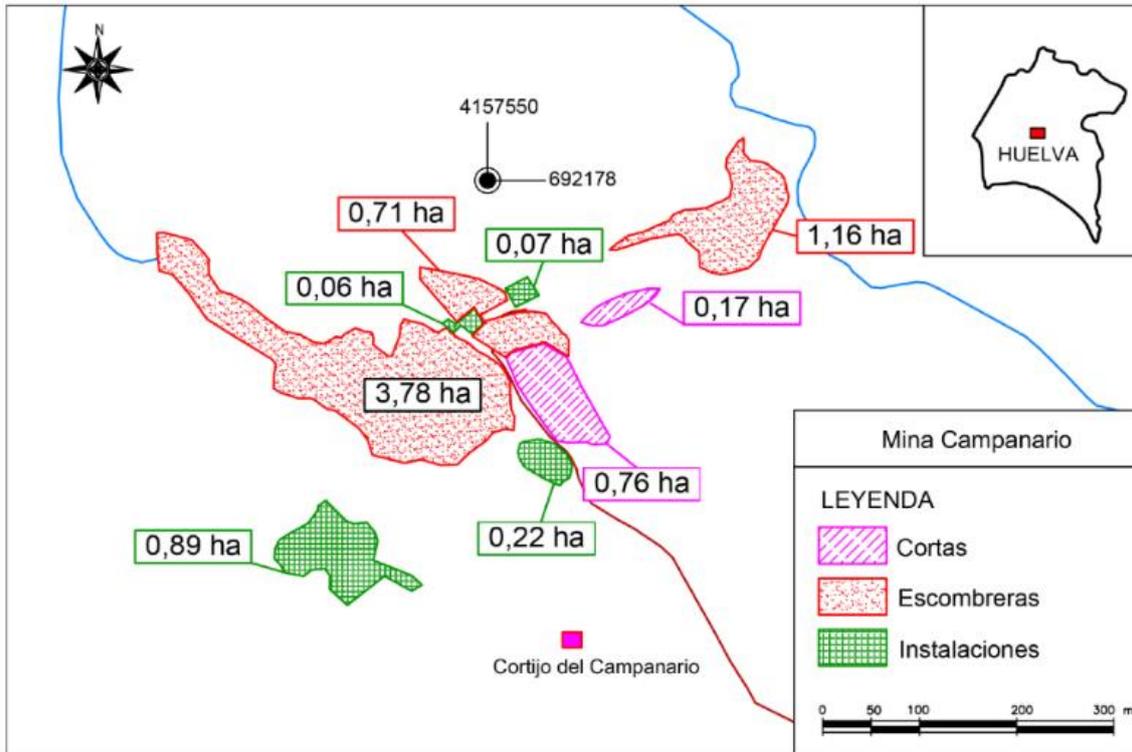


Figura 24. Cartografía estructuras mineras de Mina Campanario (Grande, 2016)

Mina Castillo de Buitrón

Fue explotada a cielo abierto y también por minería de interior hasta 1941, posteriormente las aguas ácidas generadas se utilizaron para la producción de cáscara de cobre por cementación.

La superficie afectada por la minería es de unas 10 ha. Los lixiviados provenientes de la mina Castillo de Buitrón producen un gran aporte de contaminantes al arroyo de Caladeros, pero más adelante se diluyen en la rivera del Villar.

- Ficha técnica

1. Identificación de la Mina			
Nombre de la Mina A/P	<input type="text" value="Mina Castillo del Buitrón"/>		
Mapa Topográfico N°	<input type="text" value="960-I"/>	Nombre:	<input type="text" value="Sotiel Coronada"/>
		Escala:	<input type="text" value="1:25.000"/>
2. Estado y Tipo de la Mina			
Estado:	<input checked="" type="checkbox"/> Abandonada		
	<input type="checkbox"/> Activa		
	<input type="checkbox"/> Proyecto reapertura		
Tipo:	<input type="checkbox"/> Subterránea	Labores accesibles	Si <input type="checkbox"/>
	<input checked="" type="checkbox"/> Cielo abierto	Inundada	No <input checked="" type="checkbox"/>
			Si <input type="checkbox"/>
			No <input type="checkbox"/>
3. Estructuras Mineras Observadas			
Escombreras	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Socavones	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Pozos	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Galerías	No <input checked="" type="checkbox"/>	Si <input type="checkbox"/>	
4. Entorno Geológico			
Pizarras del Devónico Superior y sulfuros masivos y rocas volcánicas del Carbonífero Inferior. A techo Grupo Culm.			
Paragénesis mineral: pirita, calcopirita, esfalerita y galena como principales			

- Cartografía estructuras mineras

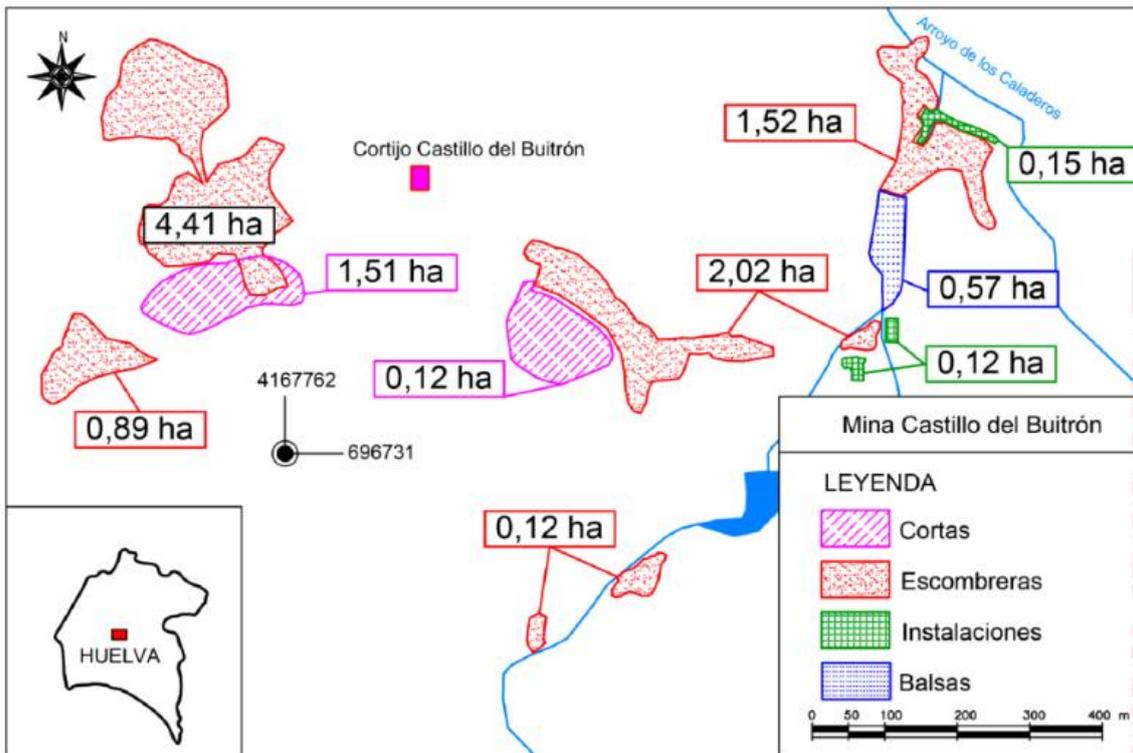


Figura 25. Cartografía estructuras mineras de la mina Castillo de Buitrón (Grande, 2016)

Mina El Soldado

Presenta una superficie afectada de aproximadamente 1,5 ha (Figura 11). Los lixiviados que proceden de esta mina son vertidos al arroyo Palomino, el cual aguas abajo también recibe los contaminantes de Mina Poderosa, previo a su desembocadura al río Odiel.

- Ficha técnica

1. Identificación de la Mina			
Nombre de la Mina A/P		Mina El Soldado	
Mapa Topográfico N°	938-I	Nombre:	El Patrás
		Escala:	1:25.000
2. Estado y Tipo de la Mina			
Estado:	<input checked="" type="checkbox"/> Abandonada		
	<input type="checkbox"/> Activa		
	<input type="checkbox"/> Proyecto reapertura		
Tipo:	<input type="checkbox"/> Subterránea	Labores accesibles	Si <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>
	<input checked="" type="checkbox"/> Cielo abierto	Inundada	Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>
3. Estructuras Mineras Observadas			
Escombreras	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Socavones	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Pozos	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Galerías	No <input checked="" type="checkbox"/>	Si <input type="checkbox"/>	
4. Entorno Geológico			
Grupo Culm a techo. Sulfuros y rocas volcánicas ácidas del Carbonífero Inferior			
La mineralización aparece en forma de sulfuros masivos, gossan, azufrones y pirita cobriza			
Sulfuros con alta ley de Cu			

- Cartografía estructuras mineras

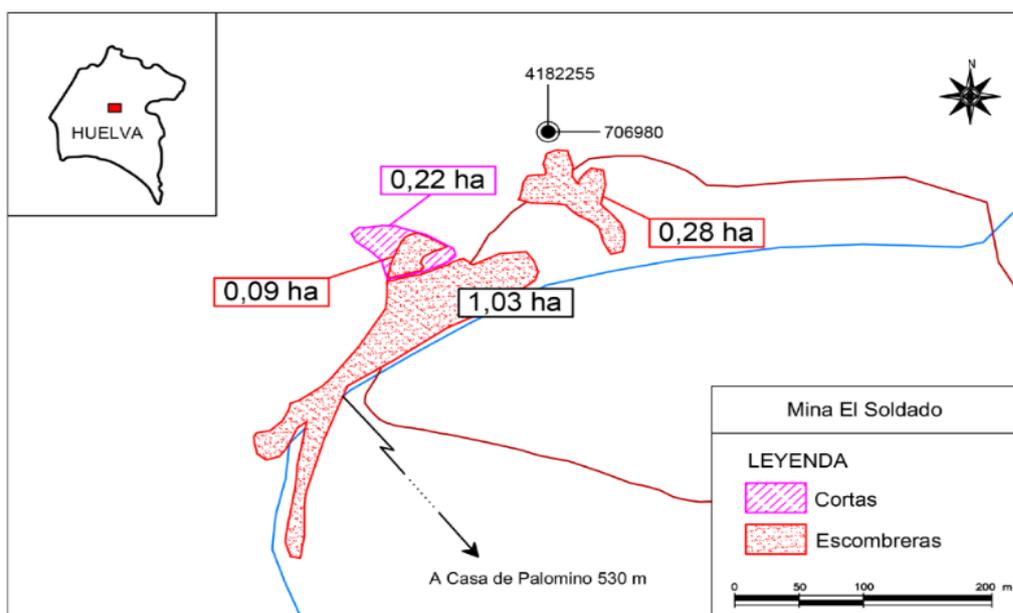


Figura 26. Cartografía estructuras mineras de mina el Soldado (Grande, 2016)

- **Mina Esperanza**

Mina Esperanza estuvo en explotación minera subterránea desde 1906 hasta 1931. Su superficie afectada es de aproximadamente 3 ha y el caudal de lixiviados generado por esta mina es de 1 L/s aproximadamente.

En el año 2000 se construyó una planta piloto con una balsa anaerobia que trató un pequeño caudal con el objetivo de producir la reducción de sulfatos y precipitación de sulfuros SIN resultados positivos, la planta piloto se aprovechó en 2009 para probar la remediación de los lixiviados mediante tecnología DAS, con resultados exitosos, en 2014 se construyó junto a la antigua instalación una nueva planta a escala real de tecnología DAS para el tratamiento de lixiviados ácidos. La planta lleva activa desde 2014 hasta la fecha, aunque necesita un mantenimiento ya que se está agotando el material alcalino y, por tanto, la capacidad de neutralización de los tanques reactivos. Se ha producido una retirada del 100% de Al, As, Cd, Cu, Cu, Pb, Zn y otros metales, un 90% de Fe y aproximadamente un 30% de sulfatos.

Esta zona sigue presentando pequeñas surgencias ácidas en la zona que no son tratadas.

- *Ficha técnica*

1. Identificación de la Mina			
Nombre de la Mina A/P	<input type="text" value="Mina Esperanza"/>		
Mapa Topográfico N°	<input type="text" value="938-II"/>	Nombre:	<input type="text" value="Campofrio"/>
		Escala:	<input type="text" value="1:25.000"/>
2. Estado y Tipo de la Mina			
Estado:	<input checked="" type="checkbox"/> Abandonada		
	<input type="checkbox"/> Activa		
	<input type="checkbox"/> Proyecto reapertura		
Tipo:	<input type="checkbox"/> Subterránea	Labores accesibles	Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
	<input checked="" type="checkbox"/> Cielo abierto	Inundada	No <input checked="" type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/>
3. Estructuras Mineras Observadas			
Escombreras	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Socavones	No <input checked="" type="checkbox"/>	Si <input type="checkbox"/>	
Pozos	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Galerías	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
4. Entorno Geológico			
Sulfuros masivos y rocas volcánicas ácidas del Carbonífero Inferior. A techo Grupo Culm. Mineralización rica en Cu			

- Cartografía estructuras mineras

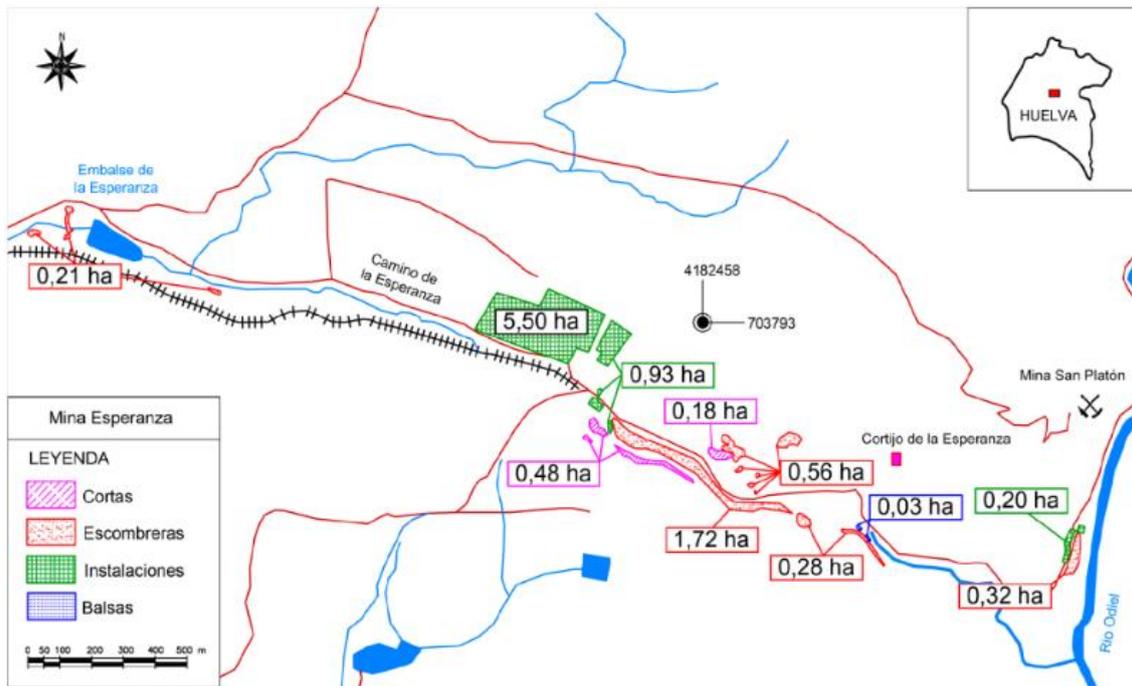


Figura 27. Cartografía de estructuras mineras de mina Esperanza (Grande, 2016)

Mina Gloria

La superficie afectada por la minería es de unas 1,5 ha. Los lixiviados que se generan tienen una afectación ligera a la riera del Villar.

- *Ficha técnica*

1. Identificación de la Mina			
Nombre de la Mina A/P		Mina Gloria	
Mapa Topográfico N°	960-I	Nombre:	Sotiel Coronada
		Escala:	1:25.000
2. Estado y Tipo de la Mina			
Estado:	<input checked="" type="checkbox"/> Abandonada		
	<input type="checkbox"/> Activa		
	<input type="checkbox"/> Proyecto reapertura		
Tipo:	<input type="checkbox"/> Subterránea	Labores accesibles	Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
	<input checked="" type="checkbox"/> Cielo abierto	Inundada	Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
3. Estructuras Mineras Observadas			
Escombreras	No <input type="checkbox"/> Si <input checked="" type="checkbox"/>		
Socavones	No <input type="checkbox"/> Si <input checked="" type="checkbox"/>		
Pozos	No <input type="checkbox"/> Si <input checked="" type="checkbox"/>		
Galerías	No <input checked="" type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/>		
4. Entorno Geológico			
Sulfuros polimetálicos y rocas volcánicas ácidas del Carbonífero Inferior. A techo Grupo Culm. Paragénesis mineral: pirita, calcopirita, boulangerita y galena			

- *Cartografía de estructuras mineras*

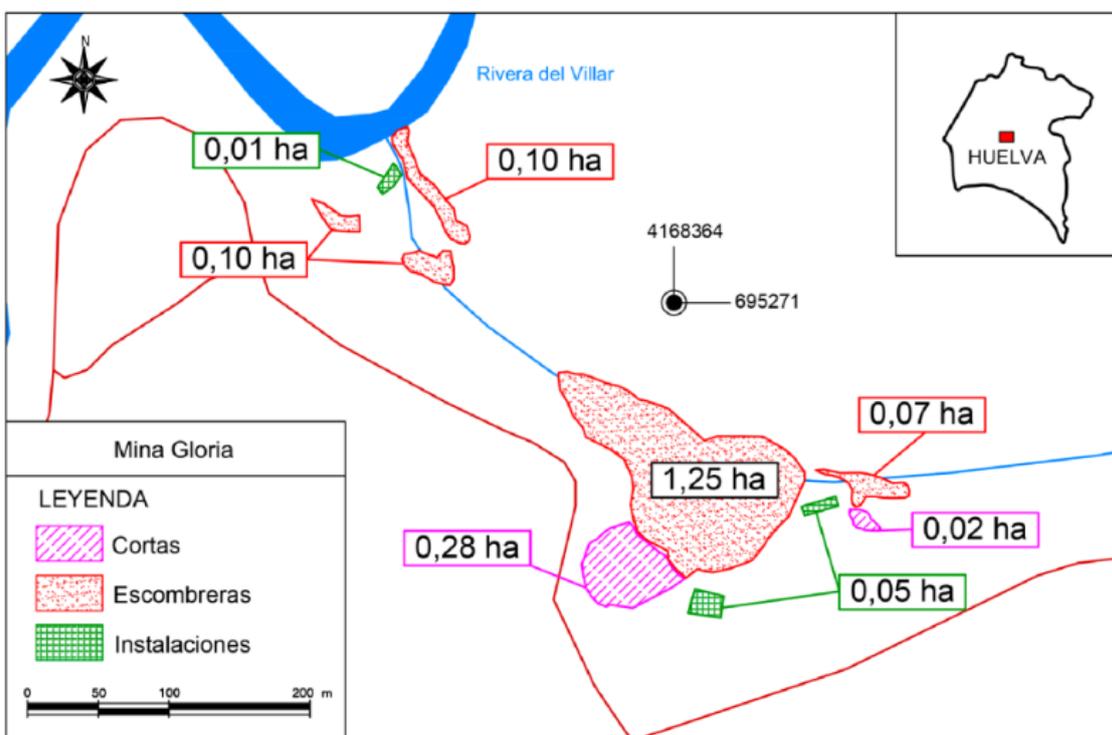


Figura 28. Cartografía estructuras mineras de mina Gloria (Grande, 2016)

- **Mina La Descamisada**

La Mina Descamisada se localiza a 1 km al noroeste de mina Campanario. La superficie afectada por la minería es de aproximadamente 1 ha, y los lixiviados procedentes de esta mina tienen bajos caudales y concentraciones de contaminantes.

- *Ficha técnica*

1. Identificación de la Mina			
Nombre de la Mina A/P	<input type="text" value="Mina La Descamisada"/>		
Mapa Topográfico N°	<input type="text" value="960-III"/>	Nombre: <input type="text" value="Valverde del Camino"/>	Escala: <input type="text" value="1:25.000"/>
2. Estado y Tipo de la Mina			
Estado:	<input checked="" type="checkbox"/> Abandonada		
	<input type="checkbox"/> Activa		
	<input type="checkbox"/> Proyecto reapertura		
Tipo:	<input type="checkbox"/> Subterránea	Labores accesibles	Si <input type="checkbox"/>
	<input checked="" type="checkbox"/> Cielo abierto	Inundada	No <input checked="" type="checkbox"/>
			No <input type="checkbox"/>
			Si <input type="checkbox"/>
3. Estructuras Mineras Observadas			
Escombreras	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Socavones	No <input checked="" type="checkbox"/>	Si <input type="checkbox"/>	
Pozos	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Galerías	No <input checked="" type="checkbox"/>	Si <input type="checkbox"/>	
4. Entorno Geológico			
Rocas pizarroso-cuarcíticas del Devónico Superior y sulfuros masivos y rocas volcánicas ácidas del Carbonífero Inferior. A techo Grupo Culm.			
Paragénesis mineral: pirita, calcopirita, esfalerita y galena como principales, y arsenopirita, marcasita y pirrotina como secundarios. Presencia de Au con leyes de 2,5 a 3,75 gr/Tm			

- Cartografía estructuras mineras

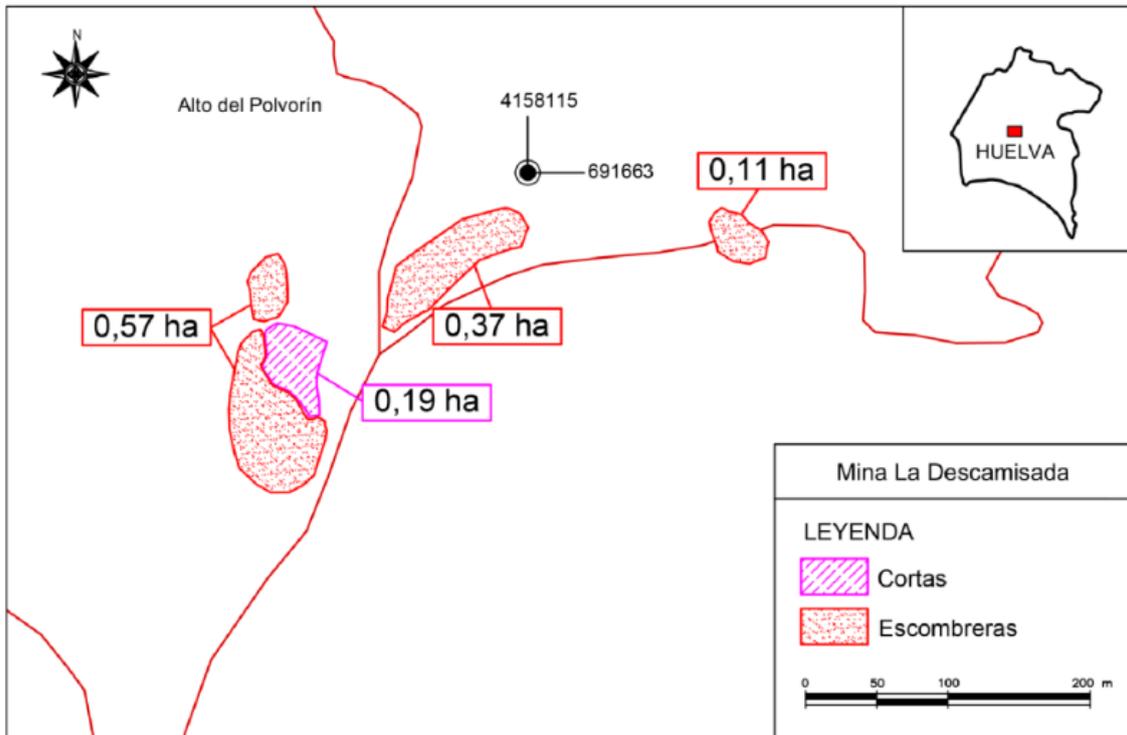


Figura 29. Cartografía estructuras mineras de mina La Descamisada (Grande, 2016)

- **Mina La Torerera**

En el periodo de explotación de Mina La Torerera se construyó una planta de de obtención de ácido sulfúrico y una fábrica subterránea de explosivos, propiedad de Explosivos Río Tinto. Las extracciones de mineral cesaron en 1962 y en 1973 se produjo el cierre de la fábrica de explosivos.

La superficie afectada por la actividad minera de la zona ocupa unas 7 ha.

Se han realizado labores de restauración con el objetivo de mejorar las condiciones de los suelos y revegetar la zona, pero existe contaminación difusa y se generan lixiviados que desembocan al Odiel mediante el arroyo Galaperosa.

- *Ficha técnica*

1. Identificación de la Mina			
Nombre de la Mina A/P	<input type="text" value="Mina La Torerera"/>		
Mapa Topográfico N°	<input type="text" value="959-I"/>	Nombre:	<input type="text" value="Villanueva de las Cruces"/>
		Escala:	<input type="text" value="1:25.000"/>
2. Estado y Tipo de la Mina			
Estado:	<input checked="" type="checkbox"/> Abandonada		
	<input type="checkbox"/> Activa		
	<input type="checkbox"/> Proyecto reapertura		
Tipo:	<input type="checkbox"/> Subterránea	Labores accesibles	Si <input type="checkbox"/>
	<input checked="" type="checkbox"/> Cielo abierto	Inundada	No <input checked="" type="checkbox"/>
			No Si <input type="checkbox"/>
3. Estructuras Mineras Observadas			
Escombreras	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Socavones	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Pozos	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Galerías	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
4. Entorno Geológico			
Pizarras del Devónico Superior y sulfuros y rocas volcánicas del Carbonífero Inferior. A techo Grupo Culm.			
La mineralización aparece en forma de sulfuros masivos y diseminados			
Paragénesis mineral: pirita, calcopirita, galena y esfalerita como principales, y arsenopirita y magnetita como secundarios			

- Cartografía de las estructuras mineras

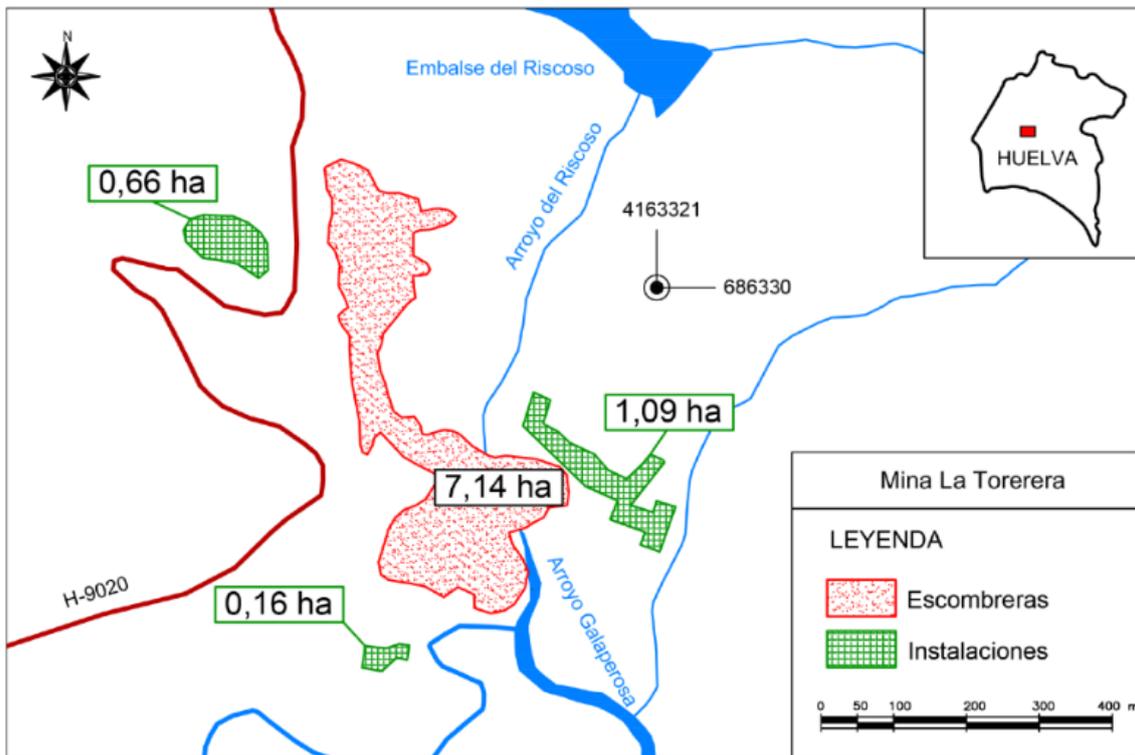


Figura 30. Cartografía de estructuras mineras de mina La Torerera (Grande, 2016)

● **Mina Poderosa**

La superficie afectada de mina Poderosa es de aproximadamente 20 ha. La única corta de esta mina que no está rellena en la actualidad (2,16 ha) drena por medio de los trabajos de interior hacia la galería principal, contaminándose al pasar a través de los sulfuros. Se trata del principal aporte de contaminantes provenientes de esta mina. También hay una contaminación difusa que drena hacia el arroyo Palomino.

El aporte de caudal de esta mina es de aproximadamente 1 L/s (Cánovas et al., 2018), pero en periodos de precipitación puede llegar a ser de 11 L/s. Las concentraciones de contaminantes son muy elevadas tanto para caudales bajos como para altos, debido a las infiltraciones que se producen en las cortas de las aguas de precipitación junto con las aguas de escorrentía superficial.

- Ficha técnica

1. Identificación de la Mina			
Nombre de la Mina A/P	<input type="text" value="Mina Poderosa"/>		
Mapa Topográfico N°	<input type="text" value="938-IV"/>	Nombre: <input type="text" value="Nerva"/>	Escala: <input type="text" value="1:25.000"/>
2. Estado y Tipo de la Mina			
Estado:	<input checked="" type="checkbox"/> Abandonada		
	<input type="checkbox"/> Activa		
	<input type="checkbox"/> Proyecto reapertura		
Tipo:	<input type="checkbox"/> Subterránea	Labores accesibles	Si <input type="checkbox"/>
	<input checked="" type="checkbox"/> Cielo abierto	Inundada	No <input checked="" type="checkbox"/>
			No <input type="checkbox"/>
			Si <input type="checkbox"/>
3. Estructuras Mineras Observadas			
Escombreras	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Socavones	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Pozos	No <input checked="" type="checkbox"/>	Si <input type="checkbox"/>	
Galerías	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
4. Entorno Geológico			
Sulfuros y rocas volcánicas del Carbonífero Inferior. A techo Grupo Culm.			
La mineralización aparece en forma de sulfuros masivos y cobrizos			
Paragénesis mineral: pirita, calcopirita, calcosina y covellina. Sulfuros con alta ley de Cu (35%)			

- Cartografía de estructuras mineras

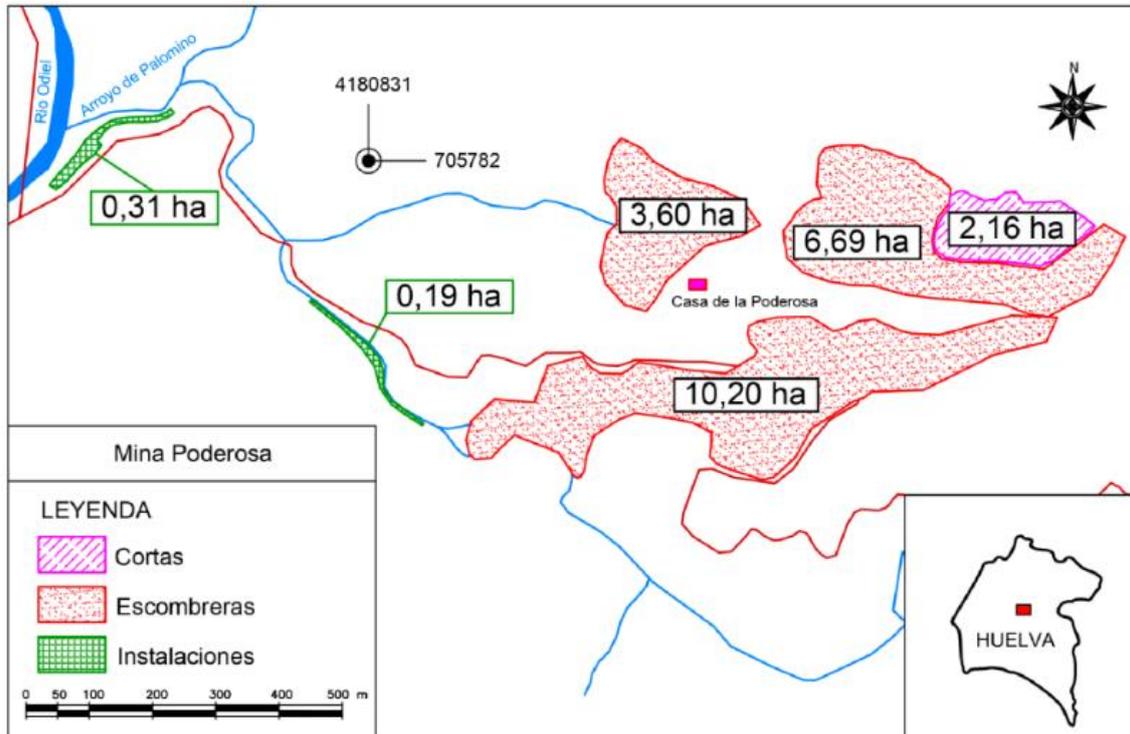


Figura 31. Cartografía de estructuras mineras de Mina Poderosa (Grande, 2016)

- **Mina San Miguel**

Las estructuras mineras de la mina San Miguel ocupan una superficie total de aproximadamente 41 ha (Figura 17). Los lixiviados procedentes de las escombreras e instalaciones mineras drenan hacia la rivera Escalada, aunque dicho río no presenta niveles de contaminación elevados aguas abajo ya que tiene un caudal relativamente alto.

En cuanto a la corta de la mina San Miguel, es posible que tenga filtraciones subterráneas ya que permanece seca.

- *Ficha técnica*

1. Identificación de la Mina			
Nombre de la Mina A/P	<input type="text" value="Mina San Miguel"/>		
Mapa Topográfico N°	<input type="text" value="938-I"/>	Nombre:	<input type="text" value="El Patrás"/>
		Escala:	<input type="text" value="1:25.000"/>
2. Estado y Tipo de la Mina			
Estado:	<input checked="" type="checkbox"/> Abandonada		
	<input type="checkbox"/> Activa		
	<input type="checkbox"/> Proyecto reapertura		
Tipo:	<input type="checkbox"/> Subterránea	Labores accesibles	Si <input type="checkbox"/>
	<input checked="" type="checkbox"/> Cielo abierto	Inundada	No <input checked="" type="checkbox"/>
			No Si <input type="checkbox"/>
3. Estructuras Mineras Observadas			
Escombreras	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Socavones	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Pozos	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Galerías	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
4. Entorno Geológico			
Sulfuros y rocas volcánicas ácidas del Carbonífero Inferior. A techo Grupo Culm.			
La mineralización aparece en forma de sulfuros masivos, stockwork, gossan y azufrones			
Paragénesis mineral: pirita y calcopirita como principales, esfalerita, galena, magnetita, pirrotina y bornita como secundarios.			
Pirita muy cobriza con una ley media del 2,5% de Cu			

- Cartografía de estructuras mineras

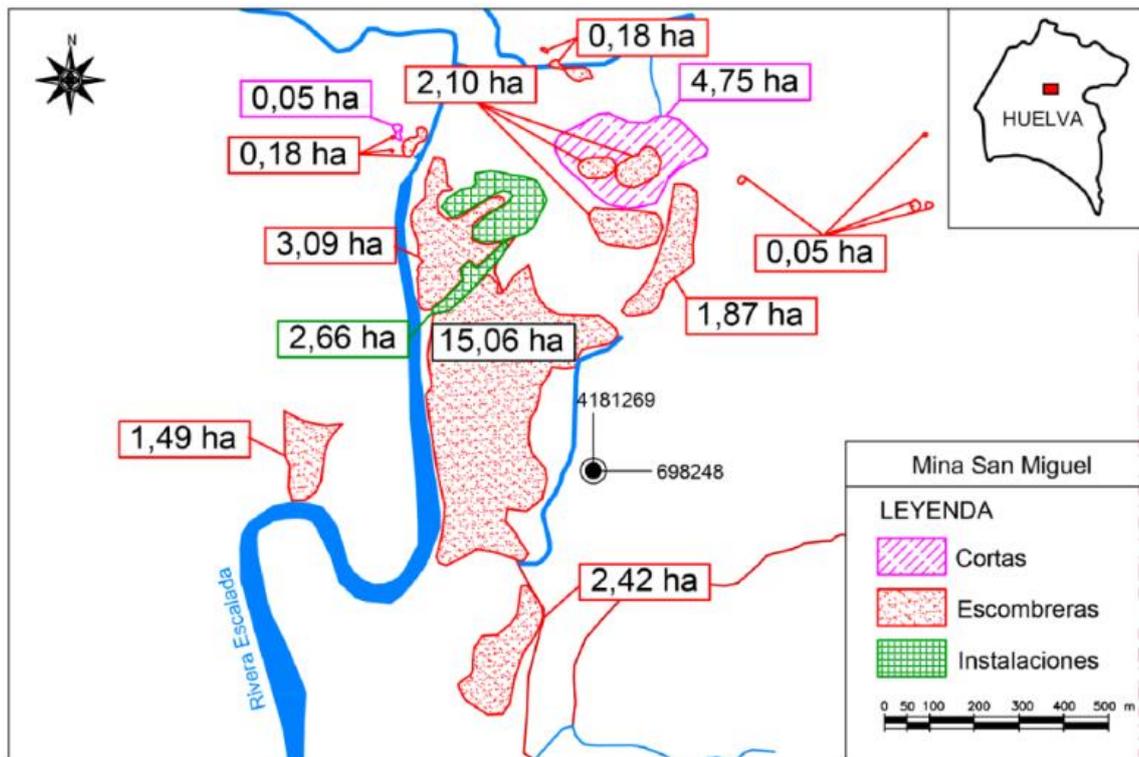


Figura 32. Cartografía de estructuras mineras de Mina San Miguel (Grande, 2016)

- **Mina San Platón**

La mina San Platón fue inundada en 1941 y se trata de una mina de interior que tiene una corta de 0,52 ha en la parte oeste.

La superficie de la mina no es elevada pero supone un importante aporte de contaminantes al río Odiel, ya que presenta concentraciones de contaminantes muy elevadas y se mantienen incluso en periodos de altos caudales. Los caudales de la descarga ácida de esta mina son muy variables, yendo desde valores inferiores a 0.2 L/s durante el estiaje a valores por encima de los 20 L/s en periodos lluviosos, debido a que recoge agua de escorrentía superficial. (Olías et. al, 2018)

- *Ficha técnica*

1. Identificación de la Mina			
Nombre de la Mina A/P	<input type="text" value="Mina San Platón"/>		
Mapa Topográfico N°	<input type="text" value="938-II"/>	Nombre:	<input type="text" value="Campofrío"/>
		Escala:	<input type="text" value="1:25.000"/>
2. Estado y Tipo de la Mina			
Estado:	<input checked="" type="checkbox"/> Abandonada		
	<input type="checkbox"/> Activa		
	<input type="checkbox"/> Proyecto reapertura		
Tipo:	<input type="checkbox"/> Subterránea	Labores accesibles	Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
	<input checked="" type="checkbox"/> Cielo abierto	Inundada	No <input checked="" type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/>
3. Estructuras Mineras Observadas			
Escombreras	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Socavones	No <input checked="" type="checkbox"/>	Si <input type="checkbox"/>	
Pozos	No <input checked="" type="checkbox"/>	Si <input type="checkbox"/>	
Galerías	No <input checked="" type="checkbox"/>	Si <input type="checkbox"/>	
4. Entorno Geológico			
Sulfuros complejos y rocas volcánicas del Carbonífero Inferior. A techo Grupo Culm. Paragénesis mineral: pirita, calcopirita, esfalerita, galena, tetraedrita, barita y cuarcita			

- Cartografía de estructuras mineras

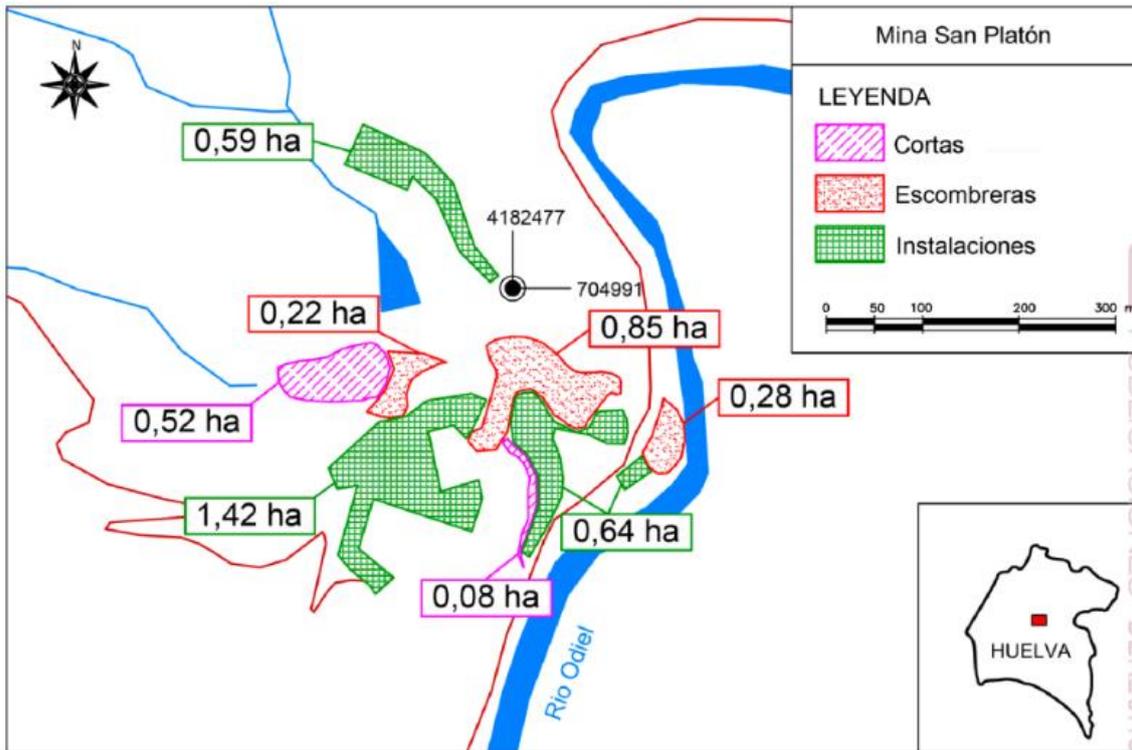


Figura 33. Cartografía de estructuras mineras de mina San Platón (Grande, 2016)

● **Mina Sotiel-Coronada**

La mina Sotiel-Coronada fue explotada de forma subterránea entre 1973 y 2001, formando parte de Almagrera y, posteriormente, de Navan Resources.

La minería en Sotiel-Coronada está en la actualidad en explotación subterránea, bajo la propiedad de la compañía Minas de Aguas Teñidas S.A. desde el año 2015. No obstante, siguen quedando restos de explotaciones anteriores que generan lixiviados que van a desembocar al río Odiel por medio de un arroyo, siendo la superficie afectada por dichos lixiviados de aproximadamente 29 ha.

También cuenta con varias cortas a cielo abierto de pequeña superficie.

- *Ficha técnica*

1. Identificación de la Mina			
Nombre de la Mina A/P	<input type="text" value="Mina Sotiel Coronada"/>		
Mapa Topográfico N°	<input type="text" value="960-I"/>	Nombre: <input type="text" value="Sotiel Coronada"/>	Escala: <input type="text" value="1:25.000"/>
2. Estado y Tipo de la Mina			
Estado:	<input type="checkbox"/> Abandonada		
	<input type="checkbox"/> Activa		
	<input checked="" type="checkbox"/> Proyecto reapertura		
Tipo:	<input type="checkbox"/> Subterránea	Labores accesibles	Si <input type="checkbox"/>
	<input checked="" type="checkbox"/> Cielo abierto	Inundada	No <input checked="" type="checkbox"/>
			No Si <input type="checkbox"/>
3. Estructuras Mineras Observadas			
Escombreras	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Socavones	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Pozos	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Galerías	No <input checked="" type="checkbox"/>	Si <input type="checkbox"/>	
4. Entorno Geológico			
Pizarras y cuarcitas del Devónico Superior. Sulfuros masivos, rocas volcánicas del CVS y materiales del Culm del Carbonífero Inferior			
Paragénesis mineral: Esfalerita y galena principalmente y calcopirita de forma secundaria			

- Cartografía de estructuras mineras

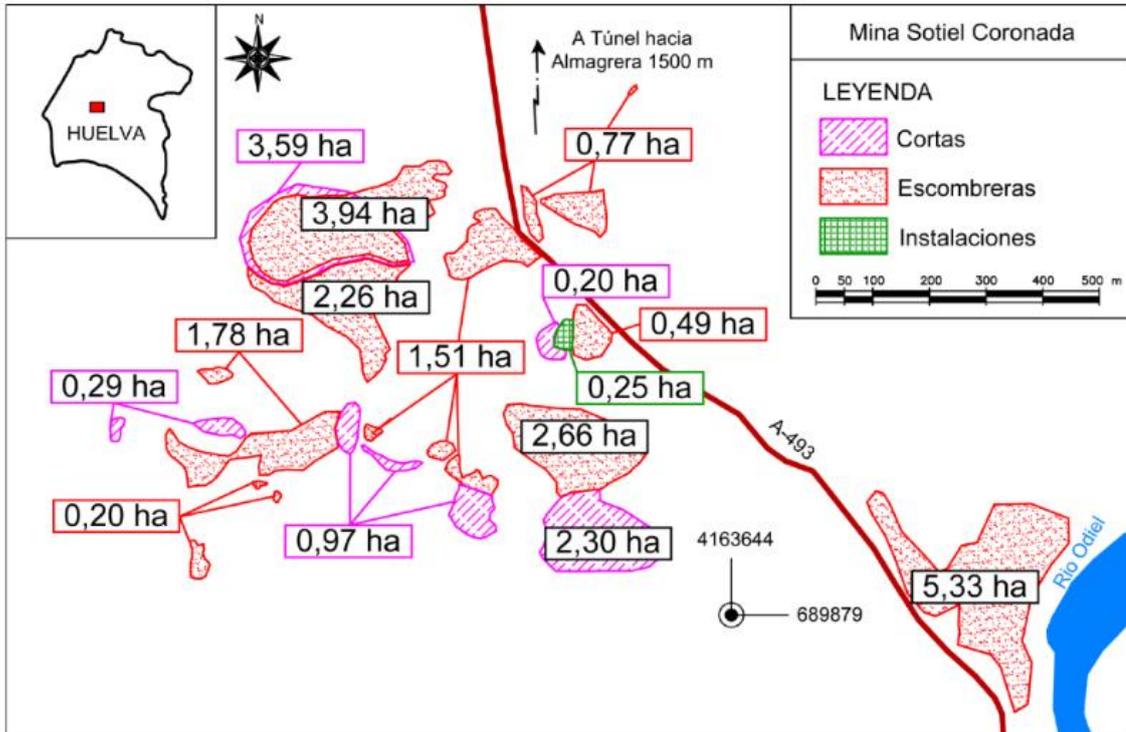


Figura 34. Cartografía de estructuras mineras de mina Sotiel-Coronada (Grande, 2016)

- **Mina las Viñas**

Se trata de una zona de cementación localizada junto al río Odiel, donde se trató el mineral de las minas de Sotiel y, posteriormente, de la mina Tinto Santa Rosa, que cesó su actividad en 1931.

La superficie afectada por la actividad ocupa 26 ha aproximadamente.

La Dirección General de Industria, Energía y Minas está realizando labores de restauración de la zona.

- *Cartografía de estructuras mineras*

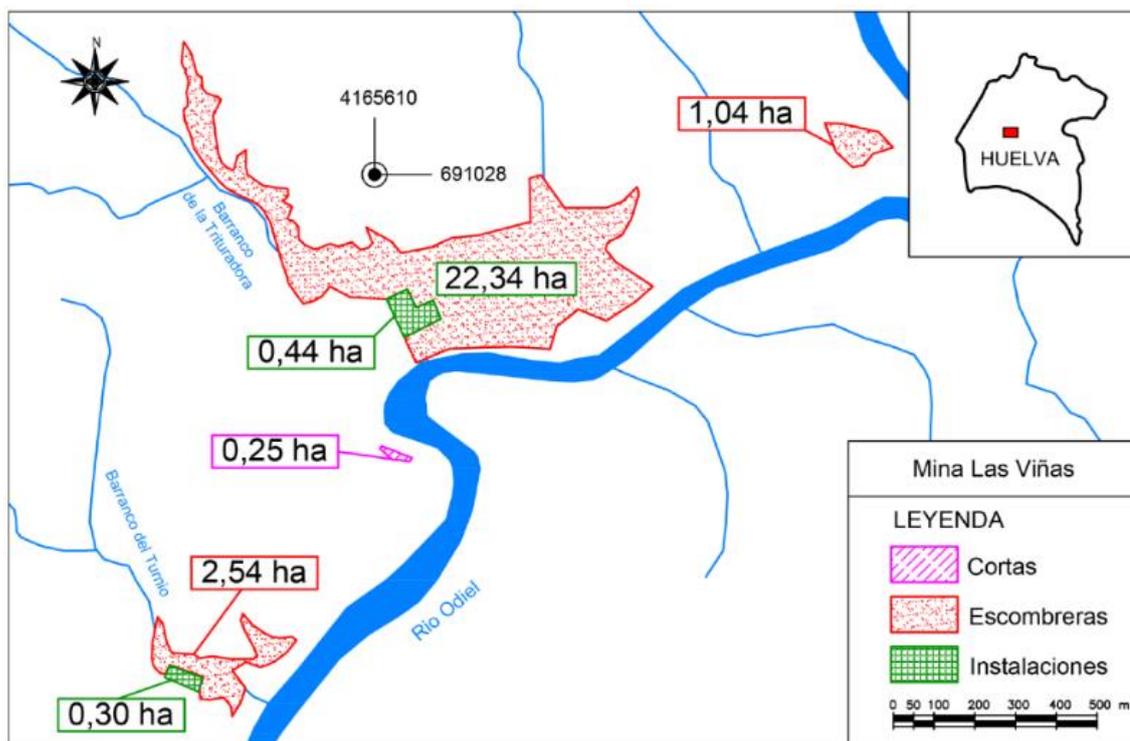


Figura 35. Cartografía de estructuras mineras de Mina Las Viñas (Grande, 2016)

• **Mina Almagrera**

Se trata de unas instalaciones construidas en la década de 1970, donde se procesó mineral extraído de las minas de Sotiel y, más adelante, de Aguas Teñidas. Estas instalaciones contaban con una planta hidrometalúrgica para separar los concentrados de Cu, Pb y Zn mediante flotación y con una planta de producción de ácido sulfúrico. En 2002 se produjo el cese definitivo de estas instalaciones.

La superficie afectada por esta actividad es de unas 137 ha aproximadamente y está compuesta por una balsa de cenizas de piritas, una balsa de residuos de flotación y suelos afectados por la actividad minera. La balsa de cenizas de piritas ha sido sellada y está previsto sellar también la balsa de estériles. También existe una planta de tratamiento activo para la neutralización de los lixiviados que se siguen generando a pie de ambas balsas.

A pesar de que esta mina presenta una superficie elevada, en la actualidad no conlleva un gran impacto para el río Odiel puesto que en estas instalaciones se están realizando labores de restauración por parte de la Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Junta de Andalucía.

- Cartografía de estructuras mineras

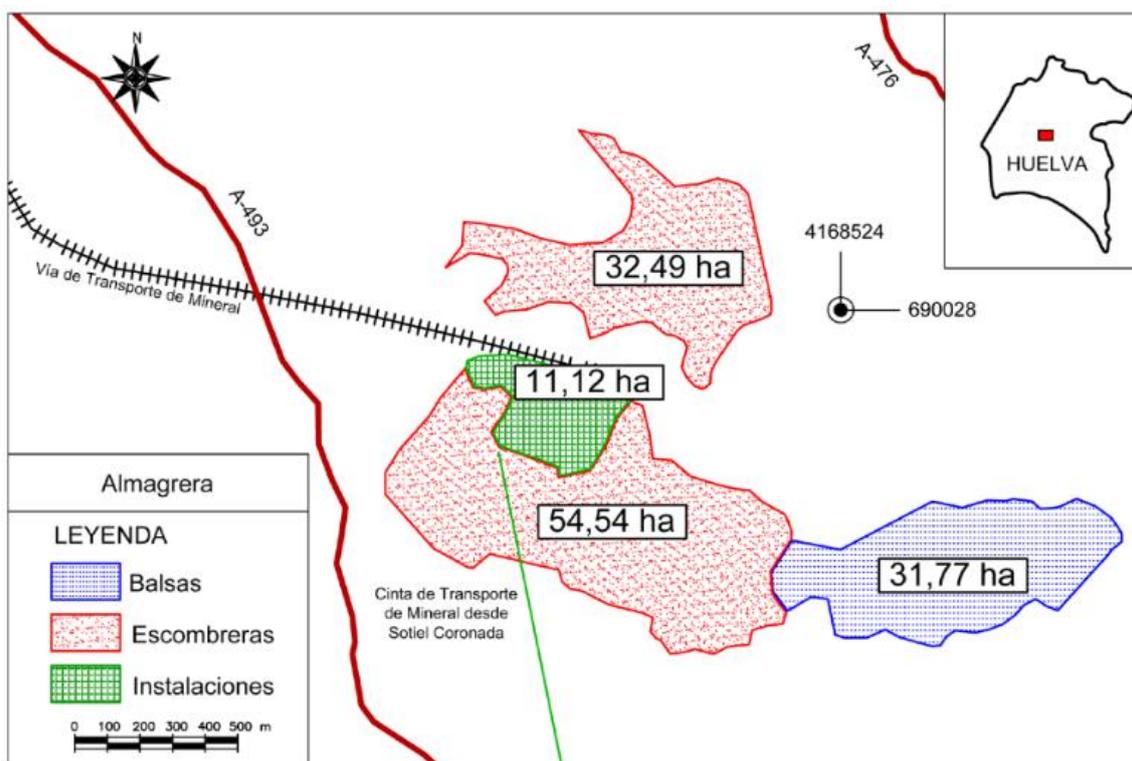


Figura 36. Cartografía estructuras mineras zona Almagrera (Grande, 2016)

● **Mina Tinto Santa Rosa**

La explotación de la Mina Tinto Santa Rosa cesó su actividad en 1931. La corta principal está inundada por un lago de dimensiones 160 x 80 m y 23 m de profundidad. El volumen estimado de la corta es de 0,1 hm³ con concentraciones de contaminantes relativamente bajas.

La superficie afectada por la minería de Tinto Santa Rosa es de aproximadamente 17 ha (Figura 22).

Esta mina tiene una fuga en una galería sellada que produce una descarga ácida puntual a alta presión, el caudal de lixiviados de esta galería es de aproximadamente 0,7 L/s pero generan una contaminación relevante en la rivera del Villar.

- *Ficha técnica*

1. Identificación de la Mina			
Nombre de la Mina A/P	<input type="text" value="Mina Tinto-Santa Rosa"/>		
Mapa Topográfico N°	<input type="text" value="960-I"/>	Nombre:	<input type="text" value="Sotiel Coronada"/>
		Escala:	<input type="text" value="1:25.000"/>
2. Estado y Tipo de la Mina			
Estado:	<input checked="" type="checkbox"/> Abandonada		
	<input type="checkbox"/> Activa		
	<input type="checkbox"/> Proyecto reapertura		
Tipo:	<input type="checkbox"/> Subterránea	Labores accesibles	Si <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>
	<input checked="" type="checkbox"/> Cielo abierto	Inundada	Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
3. Estructuras Mineras Observadas			
Escombreras	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Socavones	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Pozos	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Galerías	No <input checked="" type="checkbox"/>	Si <input type="checkbox"/>	
4. Entorno Geológico			
Sulfuros masivos y rocas volcánicas ácidas del Carbonífero Inferior. A techo Grupo Culm.			
Paragénesis mineral: pirita y calcopirita como principales, y arsenopirita, esfalerita y galena como secundarios			
Sulfuros con leyes del 1,6 % de Cu y 42% de S			

- Cartografía estructuras mineras

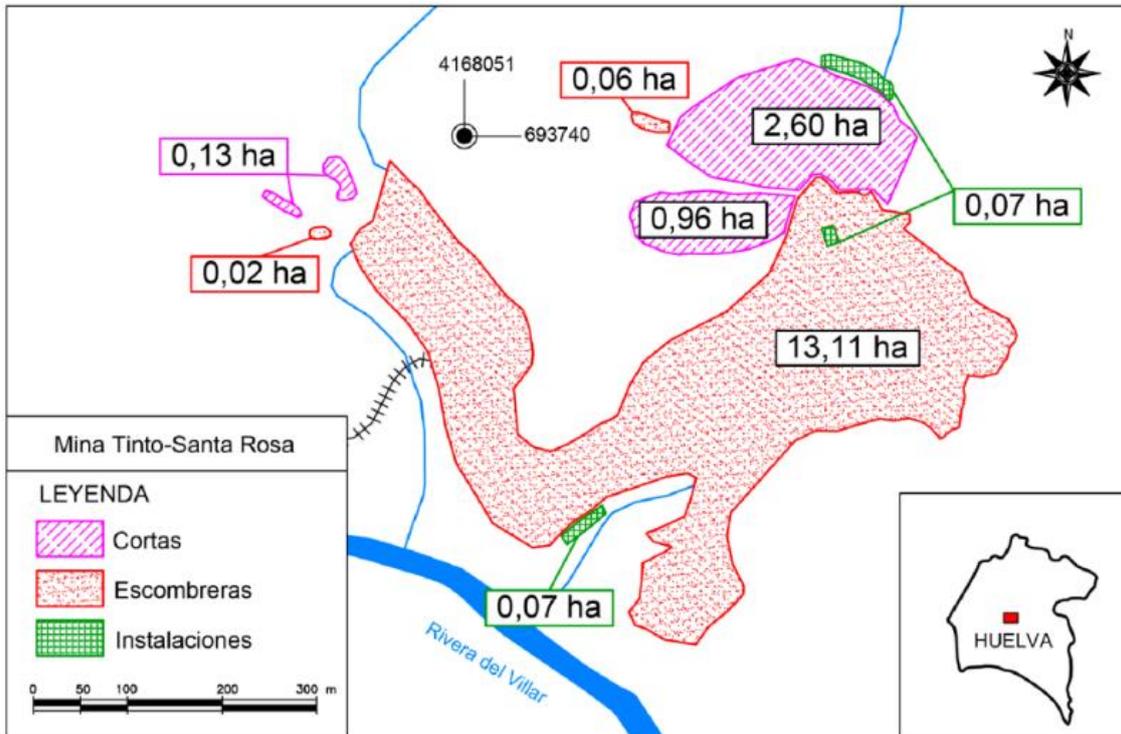


Figura 37. Cartografía de estructuras mineras de Mina Tinto-Santa Rosa (Grande, 2016)

● **Mina Los Bueyes**

Esta mina estuvo en explotación desde 1901 hasta 1911. Las aguas ácidas fueron aprovechadas posteriormente para producir cáscara de cobre mediante cementación.

La superficie afectada por la explotación minera es de aproximadamente 1 ha, por lo que no presenta una afección de contaminantes relevante a la rivera del Villar.

- *Ficha técnica*

1. Identificación de la Mina			
Nombre de la Mina A/P		<input type="text" value="Mina Los Bueyes"/>	
Mapa Topográfico N°	<input type="text" value="960-I"/>	Nombre:	<input type="text" value="Sotiel Coronada"/>
		Escala:	<input type="text" value="1:25.000"/>
2. Estado y Tipo de la Mina			
Estado:	<input checked="" type="checkbox"/> Abandonada		
	<input type="checkbox"/> Activa		
	<input type="checkbox"/> Proyecto reapertura		
Tipo:	<input type="checkbox"/> Subterránea	Labores accesibles	Si <input type="checkbox"/>
	<input checked="" type="checkbox"/> Cielo abierto	Inundada	No <input checked="" type="checkbox"/>
			No Si <input type="checkbox"/>
3. Estructuras Mineras Observadas			
Escombreras	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Socavones	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Pozos	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Galerías	No <input checked="" type="checkbox"/>	Si <input type="checkbox"/>	
4. Entorno Geológico			
Pizarras del Devónico Superior y sulfuros masivos con pizarras, cuarcitas y rocas volcánicas del Carbonífero Inferior			
Paragénesis mineral: pirita, calcopirita			

- Cartografía estructuras mineras

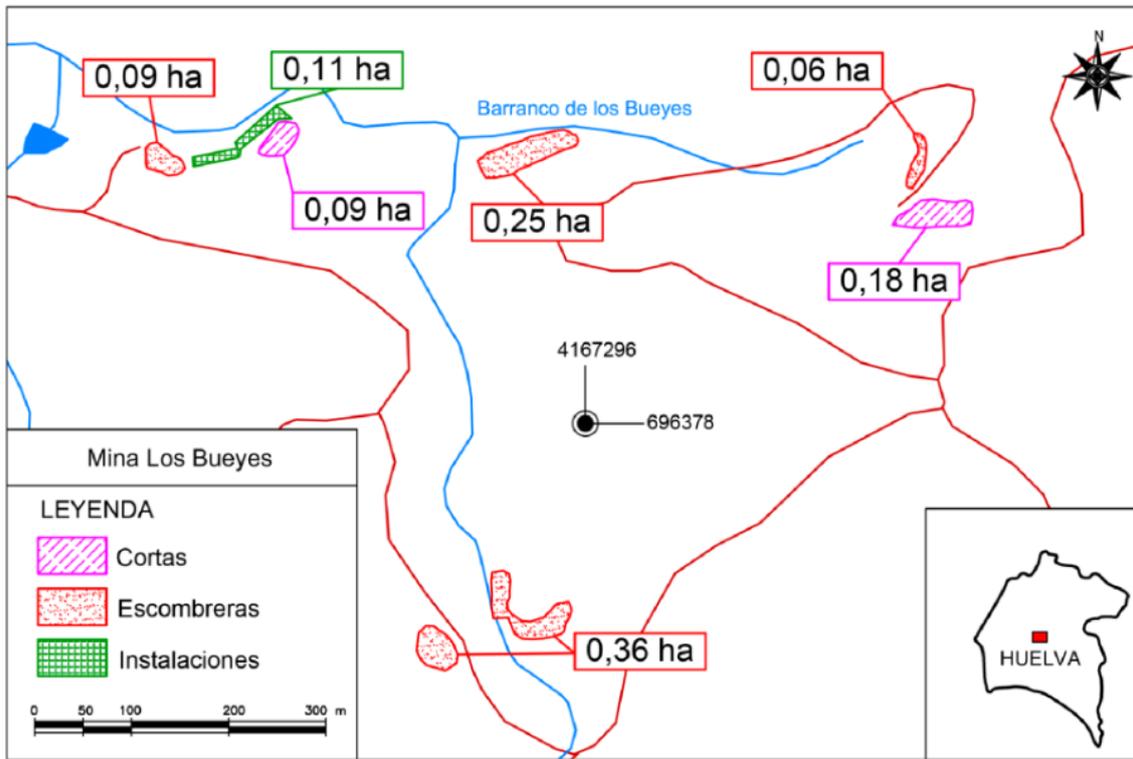


Figura 38. Cartografía de estructuras mineras de Mina Los Bueyes (Grande, 2016)

Subcuenca Olivargas

- **Mina Cueva de la Mora**

La superficie total afectada por la minería es de aproximadamente 67 ha. (Figura 23). Presenta numerosas escombreras, materiales ricos en sulfuros y escorias de una antigua fundición, así como una amplia zona de suelos ligeramente afectada por la actividad minera.

La corta de esta mina permanece inundada por un lago de 300 m de largo, 90 m de ancho y 39 m de profundidad, con un volumen de agua ácido almacenado de unos 0,3 hm³. (López Pamo et al, 2008).

No presenta descargas ácidas significativas, sino numerosos lixiviados difusos que llegan directamente al río Olivargas, la afección es pequeña ya que los lixiviados son neutralizados en el río Olivargas.

- *Ficha técnica*

1. Identificación de la Mina			
Nombre de la Mina A/P		Mina Cueva de la Mora	
Mapa Topográfico N°	938-I	Nombre:	El Patrás
		Escala:	1:25.000
2. Estado y Tipo de la Mina			
Estado:	<input checked="" type="checkbox"/> Abandonada		
	<input type="checkbox"/> Activa		
	<input type="checkbox"/> Proyecto reapertura		
Tipo:	<input type="checkbox"/> Subterránea	Labores accesibles	Si <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>
	<input checked="" type="checkbox"/> Cielo abierto	Inundada	Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
3. Estructuras Mineras Observadas			
Escombreras	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Socavones	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Pozos	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Galerías	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
4. Entorno Geológico			
Pizarras y cuarcitas del Culm a techo. Sulfuros y rocas volcánicas ácidas del Carbonífero Inferior			
La mayor parte del mineral es pirita cobriza			
Paragénesis mineral: pirita, calcopirita, malaquita, esfalerita, galena, magnetita			

- Cartografía estructuras mineras

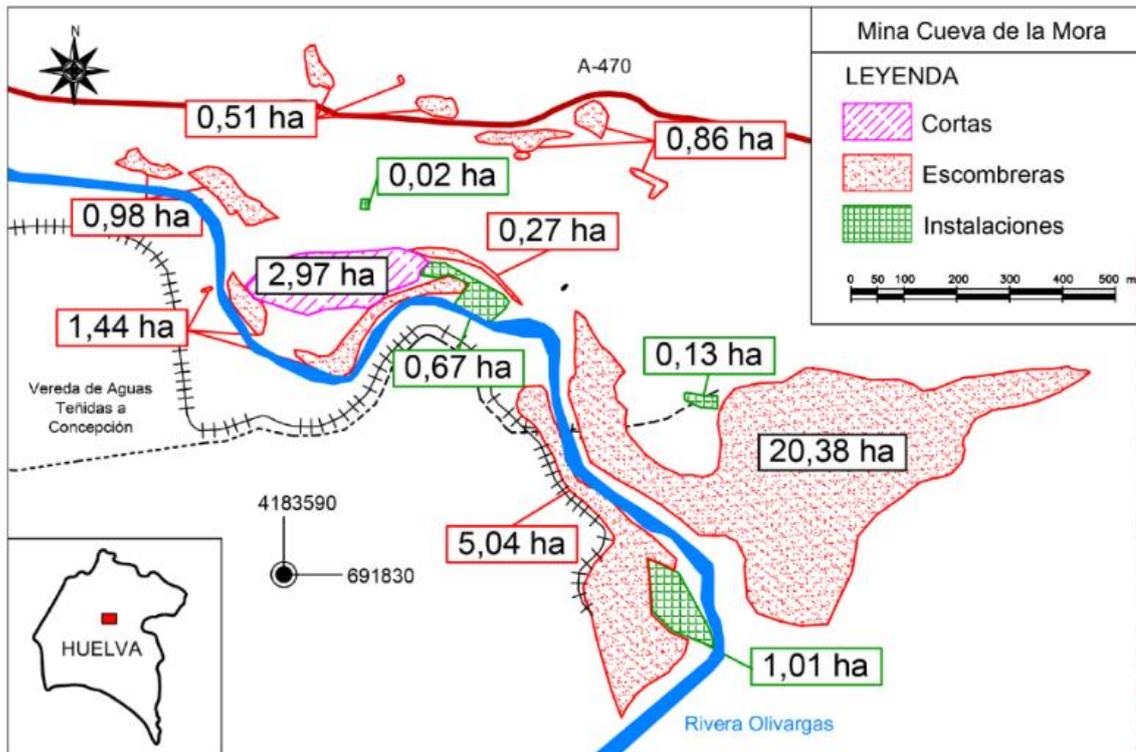


Figura 39. Cartografía estructuras mineras de mina Cueva de la Mora (Grande, 2016)

La Zarza-Perrunal

- La mina El Perrunal está situada al extremo oeste del yacimiento de La Zarza. La explotación de esta mina, que ha sido fundamentalmente de interior, cesó en 1968.

Tiene una superficie afectada por la minería de aproximadamente 7 ha, siendo el principal aporte de lixiviados ácidos una galería de desagüe con un caudal de aproximadamente 1L/s, el cual se mantiene constante durante todo el año. Este foco de contaminación presenta concentraciones altas de elementos tóxicos disueltos que desembocan en el barranco de la Herrería y el arroyo Tamujoso.
- La mina La Zarza cesó su extracción en 1991, continuando con bombeos de desagüe hasta 1995. Se realizó explotación por minería de interior inicialmente y, posteriormente, tras la construcción de una corta se realizó explotación superficial, una vez que la corta alcanzó los 130 m de profundidad se retomó la explotación por minería interior.

La superficie afectada por la minería de la Zarza es de 128 ha. Los lixiviados ácidos desembocan, a través de pequeños arroyos, en el barranco de los Cepos, el cual se une a la Rivera del Olivargas aguas abajo del embalse de Olivargas.

- Ficha técnica

1. Identificación de la Mina			
Nombre de la Mina A/P		Mina La Zarza - El Perrunal	
Mapa Topográfico N°	937-II	Nombre:	Valdelamusa
		Escala:	1:25.000
2. Estado y Tipo de la Mina			
Estado:	<input type="checkbox"/> Abandonada		
	<input type="checkbox"/> Activa		
	<input checked="" type="checkbox"/> Proyecto reapertura		
Tipo:	<input type="checkbox"/> Subterránea	Labores accesibles	Si <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>
	<input checked="" type="checkbox"/> Cielo abierto	Inundada	Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
3. Estructuras Mineras Observadas			
Escombreras	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Socavones	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Pozos	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Galerías	No <input checked="" type="checkbox"/>	Si <input type="checkbox"/>	
4. Entorno Geológico			
Sulfuros, rocas volcánicas del CVS y pizarras del Culm del Carbonífero Inferior			
La mineralización aparece de forma de sulfuros masivos y stockwork			
Paragénesis mineral: pirita, calcopirita, esfalerita y galena de forma mayoritaria			
La pirita masiva tiene leyes del 48-50% de S y del 0,7-0,8 % de Cu			

- Cartografía de estructuras mineras

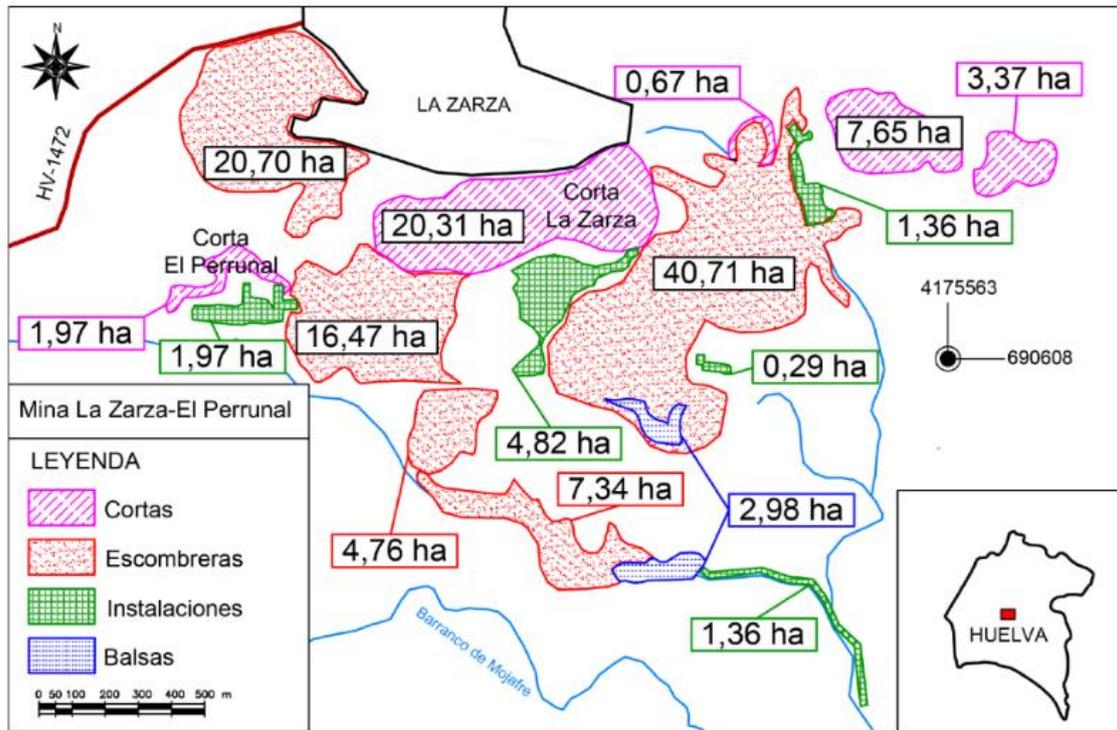


Figura 40. Cartografía de estructuras mineras de Mina La Zarza-El Perrunal (Grande, 2016)

- **Confesionario**
- *Ficha técnica*

1. Identificación de la Mina			
Nombre de la Mina A/P	Mina Confesionario		
Mapa Topográfico N°	937-II	Nombre:	Valdelamusa
		Escala:	1:25.000
2. Estado y Tipo de la Mina			
Estado:	<input checked="" type="checkbox"/> Abandonada		
	<input type="checkbox"/> Activa		
	<input type="checkbox"/> Proyecto reapertura		
Tipo:	<input type="checkbox"/> Subterránea	Labores accesibles	Si <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>
	<input checked="" type="checkbox"/> Cielo abierto	Inundada	Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
3. Estructuras Mineras Observadas			
Escombreras	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Socavones	No <input checked="" type="checkbox"/>	Si <input type="checkbox"/>	
Pozos	No <input checked="" type="checkbox"/>	Si <input type="checkbox"/>	
Galerías	No <input checked="" type="checkbox"/>	Si <input type="checkbox"/>	
4. Entorno Geológico			
Sulfuros y rocas volcánicas del CVS del Carbonífero Inferior. A techo Grupo Culm. Los sulfuros se encuentran de forma masiva y gossanzados Paragénesis mineral: Pirita y Calcopirita			

- *Cartografía estructuras mineras*

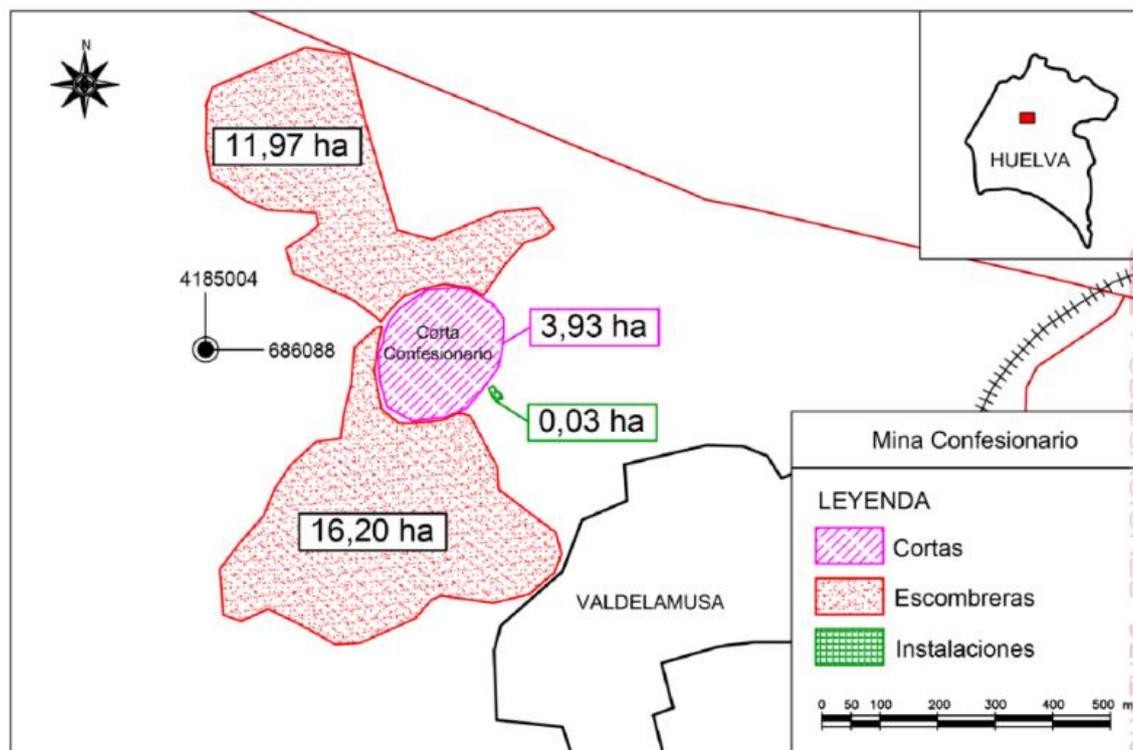


Figura 41. Cartografía estructuras mineras de mina Confesionario (Grande, 2016)

- **Mina de Aguas Teñidas**

Se encuentra activa en la actualidad desde el año 2009. Esta mina es explotada mediante minería interior para la obtención de Cu. Cuenta con una planta de tratamiento del mineral, que anteriormente se trataba en la planta de Almagrera. En esta planta se tratan también los minerales extraídos de las minas Sotiel y Magdalena.

En la mina de Aguas Teñidas se tiene una planta de tratamiento activo para la neutralización de los lixiviados ácidos.

- *Ficha técnica*

1. Identificación de la Mina			
Nombre de la Mina A/P	<input type="text" value="Mina Aguas Teñidas"/>		
Mapa Topográfico N°	<input type="text" value="937-II"/>	Nombre:	<input type="text" value="Valdelamusa"/>
		Escala:	<input type="text" value="1:25.000"/>
2. Estado y Tipo de la Mina			
Estado:	<input type="checkbox"/> Abandonada		
	<input checked="" type="checkbox"/> Activa		
	<input type="checkbox"/> Proyecto reapertura		
Tipo:	<input checked="" type="checkbox"/> Subterránea	Labores accesibles	Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/> Cielo abierto	Inundada	No <input type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/>
3. Estructuras Mineras Observadas			
Escombreras	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Socavones	No <input checked="" type="checkbox"/>	Si <input type="checkbox"/>	
Pozos	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Galerías	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
4. Entorno Geológico			
Pizarras y cuarcitas del Culm. Sulfuros masivos y rocas volcánicas del Carbonífero Inferior			
Paragénesis mineral: Pirita, Calcopirita, Esfalerita, Galena y Magnetita en dos masas de diferentes, una de pirita cuprífera y otra polimetálica. Sulfuros con altas leyes de cobre.			

- Cartografía estructuras mineras

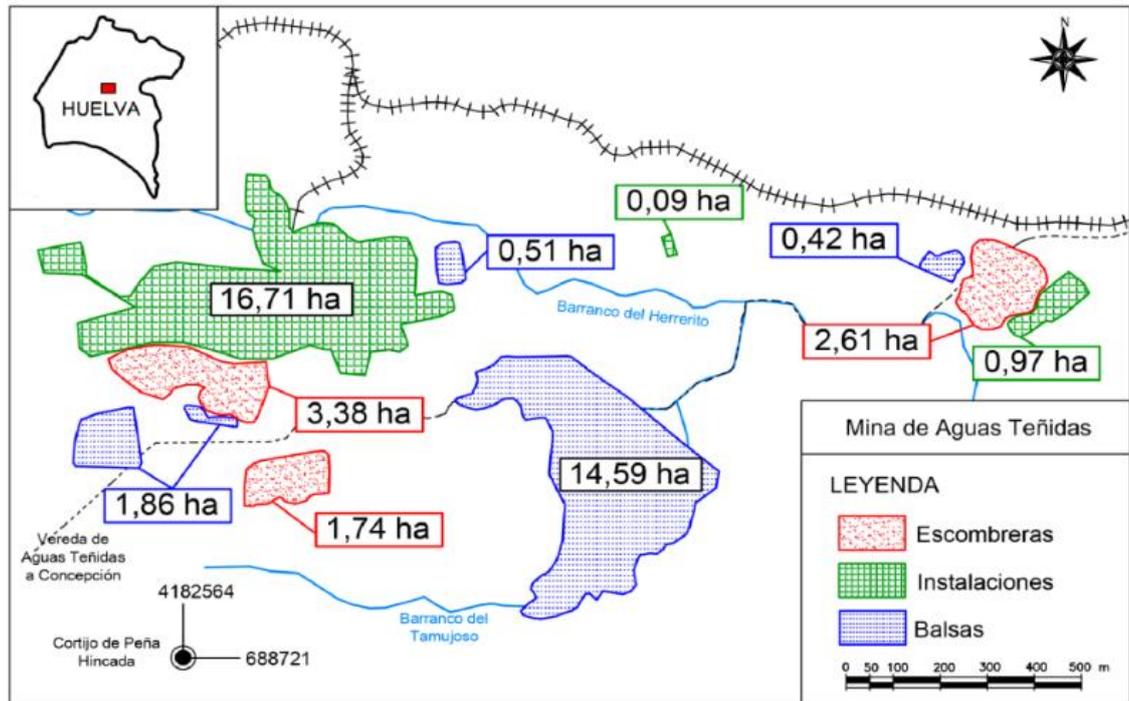


Figura 42. Cartografía estructuras mineras de la mina de Aguas Teñidas (Grande, 2016)

Subcuenca Meca:

Tharsis

Los yacimientos de sulfuros de las minas de Tharsis se distribuyen en masas localizadas, siendo las de mayor importancia: Filón Norte, Masa Guillermo y Sierra Bullones, localizadas al norte, Filón Sur y Filón Centro. Existen, a su vez, otras masas de sulfuros de menor relevancia que también han sido explotadas: antigua Almagrera, Vulcano, Prado Vicioso, La Lapilla.

Las minas de Tharsis tienen cinco cortas a cielo abierto, que son Filón Norte, Sierra Bullones, Filón Centro, Filón Sur y Corta Esperanza. Corta Esperanza está rellena con materiales extraídos de Filón Sur y tratados mediante cianuración para la obtención de Au y Ag así como con otros tipos de escombreras. El resto de cortas se encuentran inundadas, siendo su nivel aproximadamente estable para Filón Sur y Centro, 0,006 y 1 hm³ respectivamente, mientras que para Filón Norte (3,6 hm³) y Sierra Bullones (0,5 hm³) se encuentra en ascenso.

Tharsis cuenta con cuatro focos principales de lixiviados ácidos con altas concentraciones de contaminantes, la mayoría permanentes con caudales habituales de entre 0.9L y 5L/s, incrementándose notablemente en periodos de lluvias intensas. Esto hace que las minas de Tharsis sea **el 2º potencial contaminante de la cuenca del río Odiel**.

Los lixiviados ácidos vierten al arroyo de Aguas Agrias, que desemboca en el río Oraque, y al rivera San Agustín, que desemboca en el río Meca.

- Ficha técnica

1. Identificación de la Mina			
Nombre de la Mina A/P		Mina Tharsis	
Mapa Topográfico N°	959-I	Nombre:	Villanueva de las Cruces
		Escala:	1:25.000
2. Estado y Tipo de la Mina			
Estado:	<input checked="" type="checkbox"/> Abandonada		
	<input type="checkbox"/> Activa		
	<input type="checkbox"/> Proyecto reapertura		
Tipo:	<input type="checkbox"/> Subterránea	Labores accesibles	Si <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>
	<input checked="" type="checkbox"/> Cielo abierto	Inundada	Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
3. Estructuras Mineras Observadas			
Escombreras	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Socavones	No <input checked="" type="checkbox"/>	Si <input type="checkbox"/>	
Pozos	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Galerías	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
4. Entorno Geológico			
Sulfuros y rocas volcánicas del Carbonífero Inferior. A techo Grupo Culm.			
La mineralización aparece en forma de sulfuros masivos y stockwork			
Paragénesis mineral: pirita (90%), esfalerita, calcopirita y galena como principales			
Sulfuros con altas leyes de Zn, Cu, Pb, Ag y Au			

- Cartografía de estructuras mineras

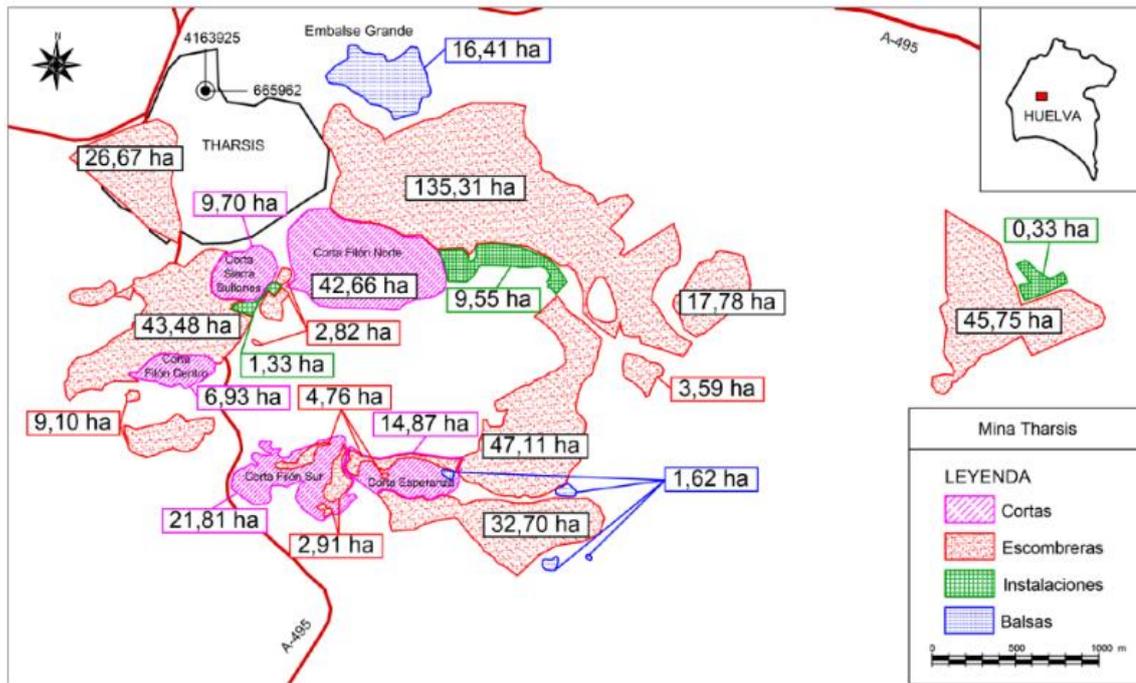


Figura 43. Cartografía de estructuras mineras de Mina Tharsis (Grande, 2016)

- **Vulcano**

La mina Vulcano está localizada a unos 500 m al sur de Filón Sur (Mina Tharsis). Se realizaron trabajos de explotación a cielo abierto en la segunda mitad del siglo XIX.

La superficie afectada por la actividad minera es inferior a 1 ha. Cuenta con una pequeña corta que se inunda en periodos lluviosos, que son los únicos momentos en los que se producen lixiviados, con unos niveles de contaminación reducidos. Los lixiviados llegan al arroyo de Valdeoscuro.

- **Mina antigua Almagrera**

La mina Antigua Almagrera fue explotada para la obtención de Cu. Consta de una corta de pequeña superficie en la que **se han realizado trabajos de remediación** y posee un recubrimiento por hormigón proyectado en las paredes.

La superficie afectada por la minería es de aproximadamente 1 ha y el caudal de lixiviados generados es muy bajo, desembocando a la Rivera de San Agustín.

- Ficha técnica

1. Identificación de la Mina			
Nombre de la Mina A/P		Mina Antigua Almagrera	
Mapa Topográfico N°	959-III	Nombre:	Alosno
		Escala:	1:25.000
2. Estado y Tipo de la Mina			
Estado:			
<input checked="" type="checkbox"/>	Abandonada		
<input type="checkbox"/>	Activa		
<input type="checkbox"/>	Proyecto repaertura		
Tipo:		Labores accesibles	
<input type="checkbox"/>	Subterránea	Inundada	Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	Cielo abierto		No <input type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/>
3. Estructuras Mineras Observadas			
Escombreras	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Socavones	No <input checked="" type="checkbox"/>	Si <input type="checkbox"/>	
Pozos	No <input checked="" type="checkbox"/>	Si <input type="checkbox"/>	
Galerías	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
4. Entorno Geológico			
Sulfuros masivos y pizarras del Culm del Carbonifero Inferior con rocas volcánicas del CVS.			

- Cartografía estructuras mineras

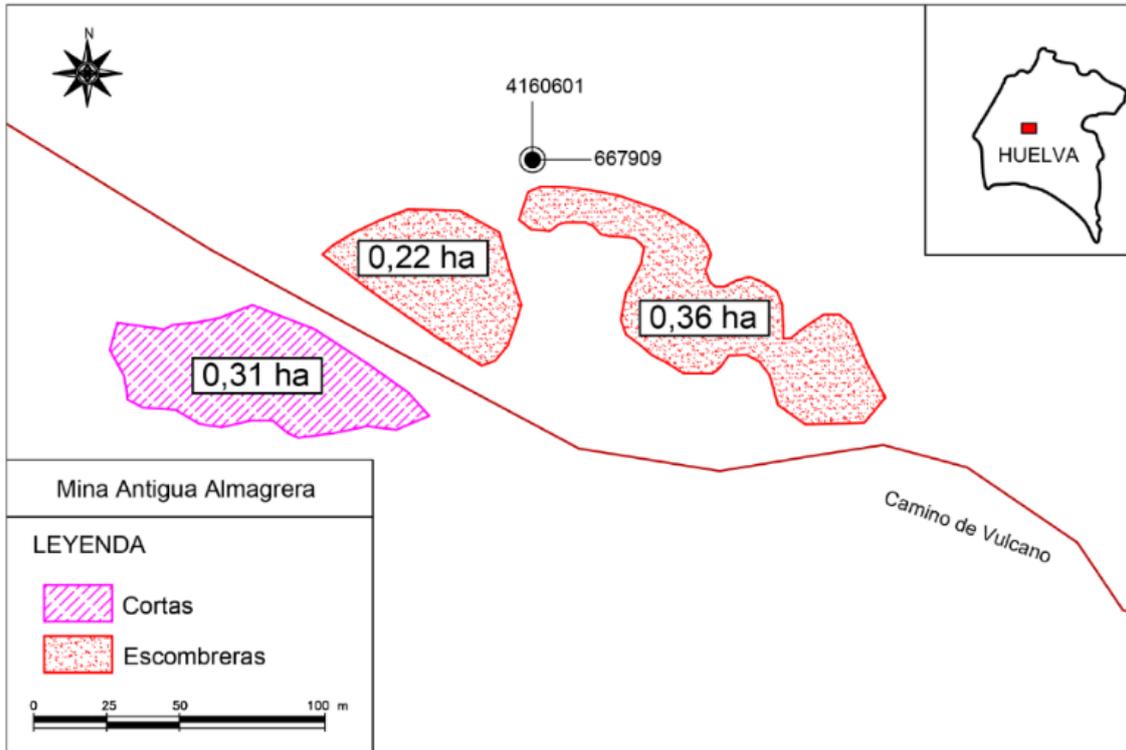


Figura 45. Cartografía estructuras mineras de la mina de Antigua Almagrera (Grande, 2016)

- **Mina La Lapilla**

Su explotación por minería de interior finalizó en 1911. Entre 1981 y 1986 se realizaron trabajos de explotación a cielo abierto para la extracción de Au y Ag del gossan mediante riego por cianuración y precipitación con polvo de Zinc.

La superficie afectada por su actividad minera es de aproximadamente 17 ha.

Presenta contaminación difusa y un punto de descarga de aguas ácidas de la corta sin concentraciones de contaminantes elevada. Esta descarga de aguas ácidas vierte a un arroyo que se une aguas abajo a la rivera de San Agustín, este río, que es afluente del Meca, presenta una alta contaminación proveniente de los lixiviados de Tharsis.

- *Ficha técnica*

1. Identificación de la Mina			
Nombre de la Mina A/P	<input type="text" value="Mina La Lapilla"/>		
Mapa Topográfico N°	<input type="text" value="959-III"/>	Nombre:	<input type="text" value="Alosno"/>
		Escala:	<input type="text" value="1:25.000"/>
2. Estado y Tipo de la Mina			
Estado:	<input checked="" type="checkbox"/> Abandonada		
	<input type="checkbox"/> Activa		
	<input type="checkbox"/> Proyecto reapertura		
Tipo:	<input type="checkbox"/> Subterránea	Labores accesibles	Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
	<input checked="" type="checkbox"/> Cielo abierto	Inundada	No <input checked="" type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/>
3. Estructuras Mineras Observadas			
Escombreras	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Socavones	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Pozos	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Galerías	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
4. Entorno Geológico			
Sulfuros masivos y pizarras del Culm del Carbonífero Inferior			
La mineralización aparece en forma de sulfuros masivos y gossan. Sulfuros con baja ley de S y altas leyes de Pb, Zn y As			

- Cartografía de estructuras mineras

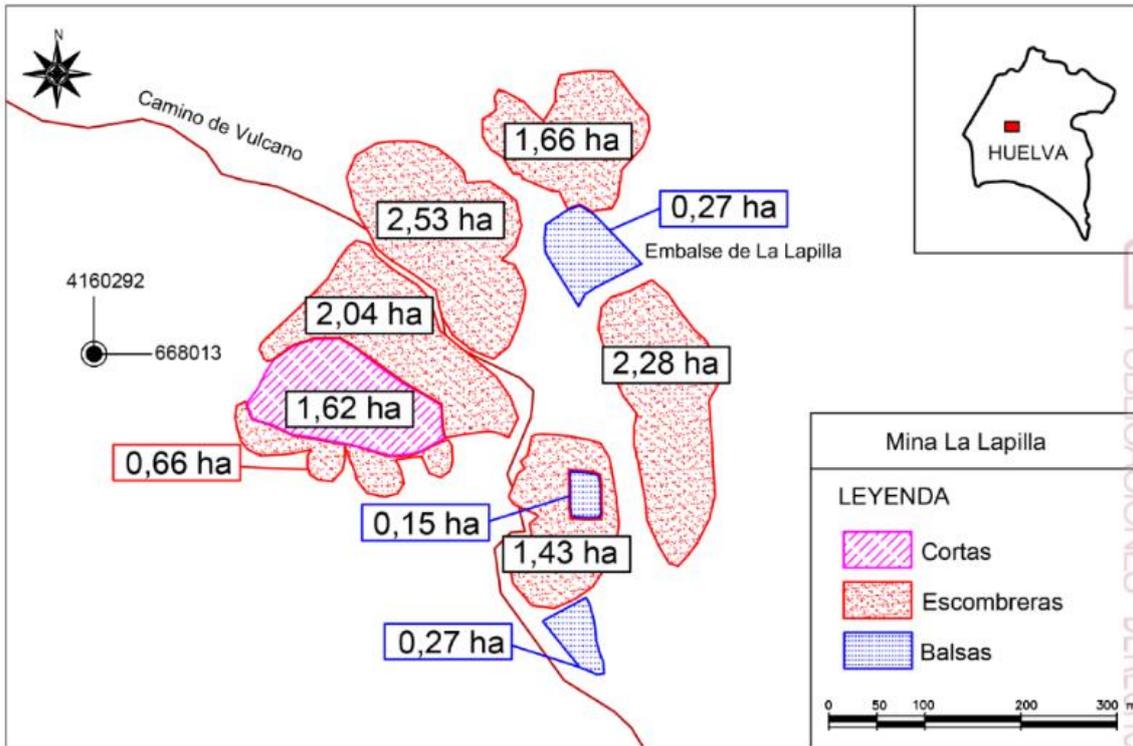


Figura 46. Cartografía de estructuras mineras mina La Lapilla (Grande, 2016)

● **Mina Prado Vicioso**

Se localiza a unos 1,5 km de Corta Esperanza. Esta mina fue explotada por minería interior entre 1904 y 1928.

La superficie de cuenca afectada por los trabajos de minería es de aproximadamente 1 ha. Tiene varios pozos mineros inundados y no cuenta con descarga localizada, así, los lixiviados que se generan tienen bajos caudales y baja concentración de contaminantes, que se unen a los procedentes de las minas de Tharsis, de elevado potencial contaminante.

-Ficha técnica

1. Identificación de la Mina			
Nombre de la Mina A/P		<input type="text" value="Mina Prado Vicioso"/>	
Mapa Topográfico N°	<input type="text" value="959-I"/>	Nombre:	<input type="text" value="Villanueva de las Cruces"/>
		Escala:	<input type="text" value="1:25.000"/>
2. Estado y Tipo de la Mina			
Estado:	<input checked="" type="checkbox"/> Abandonada		
	<input type="checkbox"/> Activa		
	<input type="checkbox"/> Proyecto reapertura		
Tipo:	<input checked="" type="checkbox"/> Subterránea	Labores accesibles	Si <input type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/> Cielo abierto	Inundada	No <input checked="" type="checkbox"/>
3. Estructuras Mineras Observadas			
Escombreras	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Socavones	No <input checked="" type="checkbox"/>	Si <input type="checkbox"/>	
Pozos	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Galerías	No <input checked="" type="checkbox"/>	Si <input type="checkbox"/>	
4. Entorno Geológico			
Sulfuros polimetálicos y rocas volcánicas del Carbonífero Inferior. A techo Grupo Culm. Paragénesis mineral: pirita, calcopirita, esfalerita y galena			

- Cartografía estructuras mineras

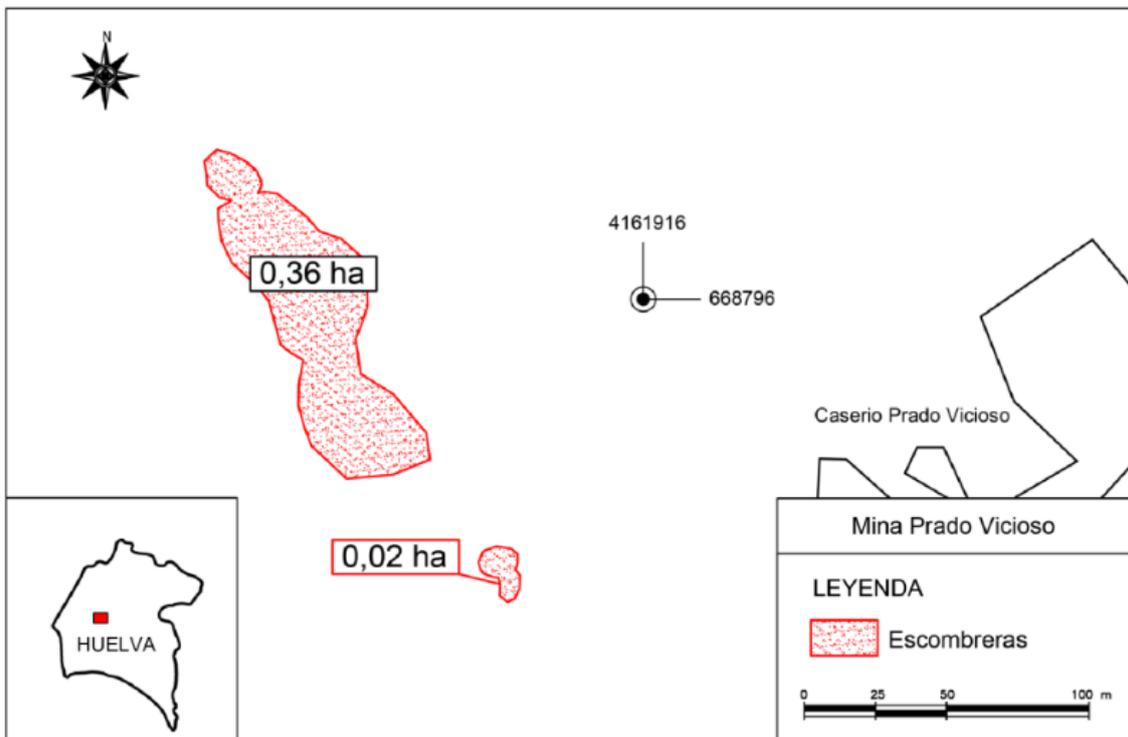


Figura 47. Cartografía estructuras mineras de Mina Prado Vicioso (Grande, 2016)

- **Mina Riotinto**

La Mina Riotinto se encuentra en la divisoria entre la cuenca del Odiel y del Tinto.

Ha supuesto históricamente el foco de contaminación más importante de drenajes ácidos al río Odiel, con una superficie de la cuenca afectada de aproximadamente 1043 ha (Figura 47). En la actualidad, debido a que se han iniciado labores de restauración dentro del Proyecto Riotinto, el impacto contaminante de esta mina ha disminuido considerablemente, quedando reducido su impacto actual al río Odiel a las aguas difusas procedentes de las escombreras pasivas del Proyecto Riotinto (130,8 ha).

Los principales aportes de contaminantes de la minería histórica de Riotinto hacia el río Odiel provenían principalmente de dos zonas: la zona de la Corta Atalaya y la zona de residuos generados por la explotación de Cerro Colorado (Embalse de Cobre, de Aguzadera y de Gossan), actualmente estas zonas no aportan drenajes al Tintillo, ya que dentro del Proyecto Riotinto se selló un túnel que conecta Corta Atalaya con el río Tintillo y se reactivó la operación en la zona de Cerro Colorado, por lo que las aguas provenientes de esta zona se recirculan y se utilizan en el proceso, no existiendo, de este modo, aporte de lixiviados ácidos al río Tintillo.

En referencia a la contaminación difusa proveniente de zonas que están dentro del perímetro del proyecto Riotinto pero que están fuera de la explotación, el proyecto Riotinto se ha comprometido a la reducción del 30% sobre la carga base de contaminante antes del tercer año tras el inicio de la explotación, 50% de reducción de la carga de contaminante antes del sexto año tras el inicio de la explotación y reducción del 100% de la carga de contaminante antes del décimo año tras el inicio de la explotación.

Tal como se ha puntualizado, próximo al río Tintillo se encuentran unas 130,8 ha de escombreras que quedan fuera de los límites del perímetro del proyecto Río Tinto, y los lixiviados procedentes de esta zona, se deben, por tanto, de considerar a la hora de realizar un plan de Restauración de la Cuenca del Odiel.

- *Ficha técnica*

1. Identificación de la Mina			
Nombre de la Mina A/P	Mina Riotinto		
Mapa Topográfico N°	938-IV	Nombre:	Nerva
		Escala:	1:25.000
2. Estado y Tipo de la Mina			
Estado:	<input type="checkbox"/> Abandonada		
	<input type="checkbox"/> Activa		
	<input checked="" type="checkbox"/> Proyecto reapertura		
Tipo:	<input type="checkbox"/> Subterránea	Labores accesibles	Si <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>
	<input checked="" type="checkbox"/> Cielo abierto	Inundada	Si <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/>
3. Estructuras Mineras Observadas			
Escombreras	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Socavones	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Pozos	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
Galerías	No <input type="checkbox"/>	Si <input checked="" type="checkbox"/>	
4. Entorno Geológico			
Pizarras del Devónico Superior. Sulfuros masivos y rocas volcánicas del CVS y del grupo Culm del Carbonífero Inferior			
Paragénesis mineral: pirita, calcopirita, calcosina, covellina, galena, esfalerita, malaquita, jaspes y cuarzo			
Sustancias explotadas: Cu, Au, Ag, Pb, Zn y Mg			

- *Cartografía de estructuras mineras*

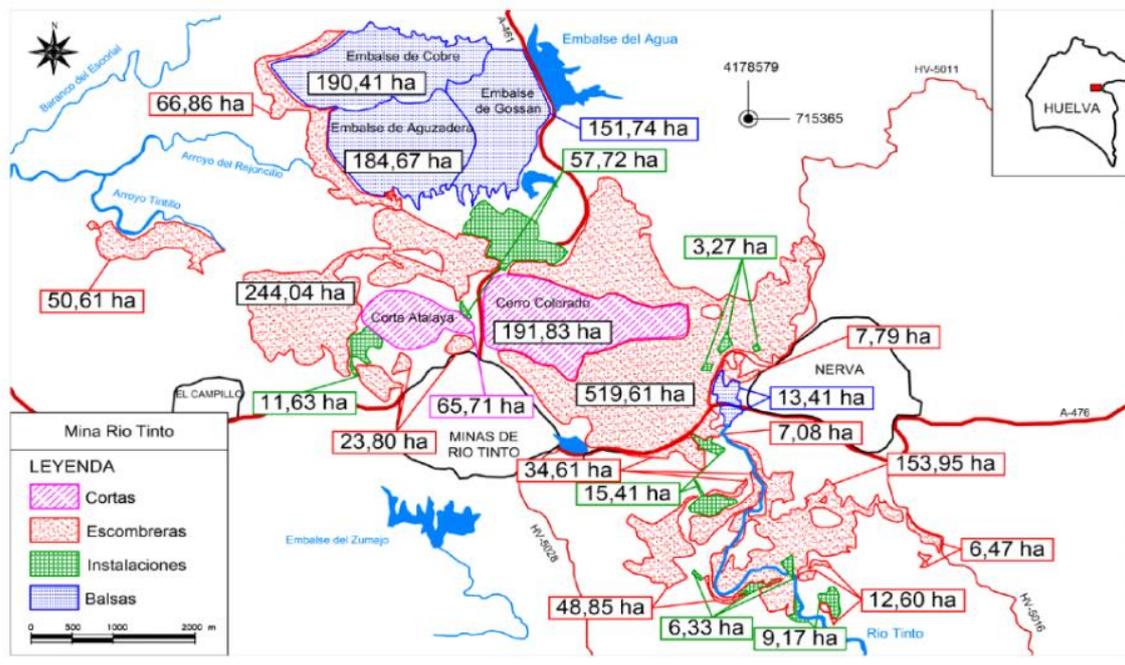


Figura 48. Cartografía de estructuras mineras de la mina Riotinto (Grande, 2016)

La superficie de escombreras que queda fuera del Plan de Restauración del Proyecto Riotinto es de 130,8 ha. (Información proporcionada por Atalaya Mining)

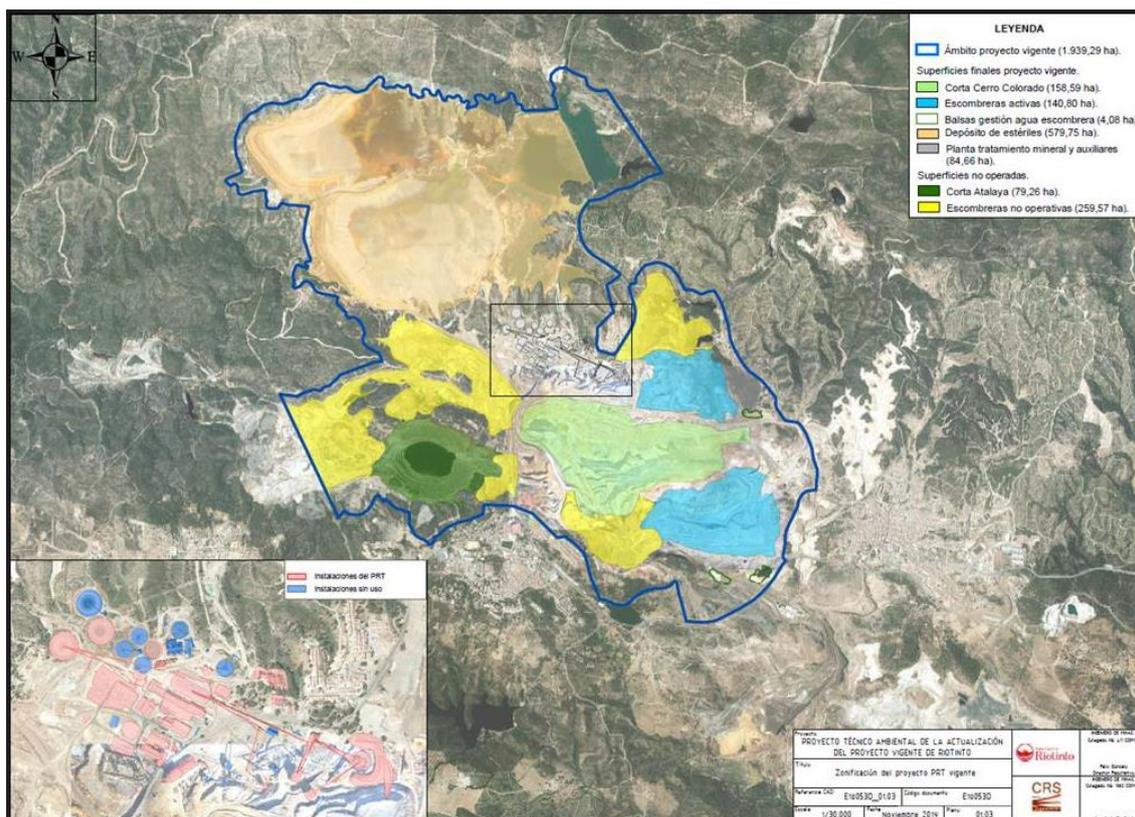


Figura 49. Zonas de escombreras que quedan fuera del Proyecto Ríotinto (Cortesía de Atalaya Mining)

- **A.2. Cálculo de la carga contaminante de los principales focos de contaminación con respecto a la carga total transportada por el Odriel**

- Cálculo de la carga equivalente de CaCO₃ para neutralizar la acidez.

Para el cálculo de la acidez neta (en mg/L de CaCO₃) se utilizará la Eq [1], (Olías et al., 2016) la cual considera no solo la acidez de los protones sino también la acidez de los minerales, proveniente de los metales hidrolizables como Fe, Al y Mn. Por tanto, el ajuste de la concentración de CaCO₃ necesaria para neutralizar la acidez tendrá mayor sensibilidad que mediante la ecuación convencional. Las concentraciones de Fe, Al y Mn se expresan en mg/L. A partir de esta expresión y del caudal obtenido para los lixiviados ácidos de mina en cada punto, se obtiene la cantidad equivalente de CaCO₃ para neutralizar la acidez en toneladas/día.

$$Acidez (mg/L) = 50 \cdot \left[\frac{2,5 \cdot Fe}{55,85} \right] + \left[\frac{3 \cdot Al}{26,98} \right] + \left[\frac{2 \cdot Mn}{54,94} \right] + 1000 \cdot 10^{-pH} \quad \text{Eq. [1]}$$

	San Telmo	Tharsis	La Zarza	Ríotinto
--	------------------	----------------	-----------------	-----------------

Al (mg/L)	389	435	624	729
Mn (mg/L)	64	42	76	122
Fe (mg/L)	794	483	880	325,9
pH	2,61	2,5	3,1	2,5
Acidez (mg/L)	4179,02	3734,03	5616,84	5162,78
Eq. CaCO3 (ton/día)	10,04	1,02	1,11	63,87
Caudal (L/día)	2448000	276480	198720	11404800
Caudal (L/s)	32	3,2	2,3	132

Ton/año	Al	Fe	Zn	SO₄
Riotinto	4398	2142	958	62904
La Zarza	260	997	502	29901
San Telmo	1615	1485	713	34784
Tharsis	418	1330	150	7397
Ratio carga contaminante mina/carga total Odiel	0,74	0,84	0,89	0,90

Cargas contaminantes total que transporta el río Odiel (Olías y Nieto, 2018)

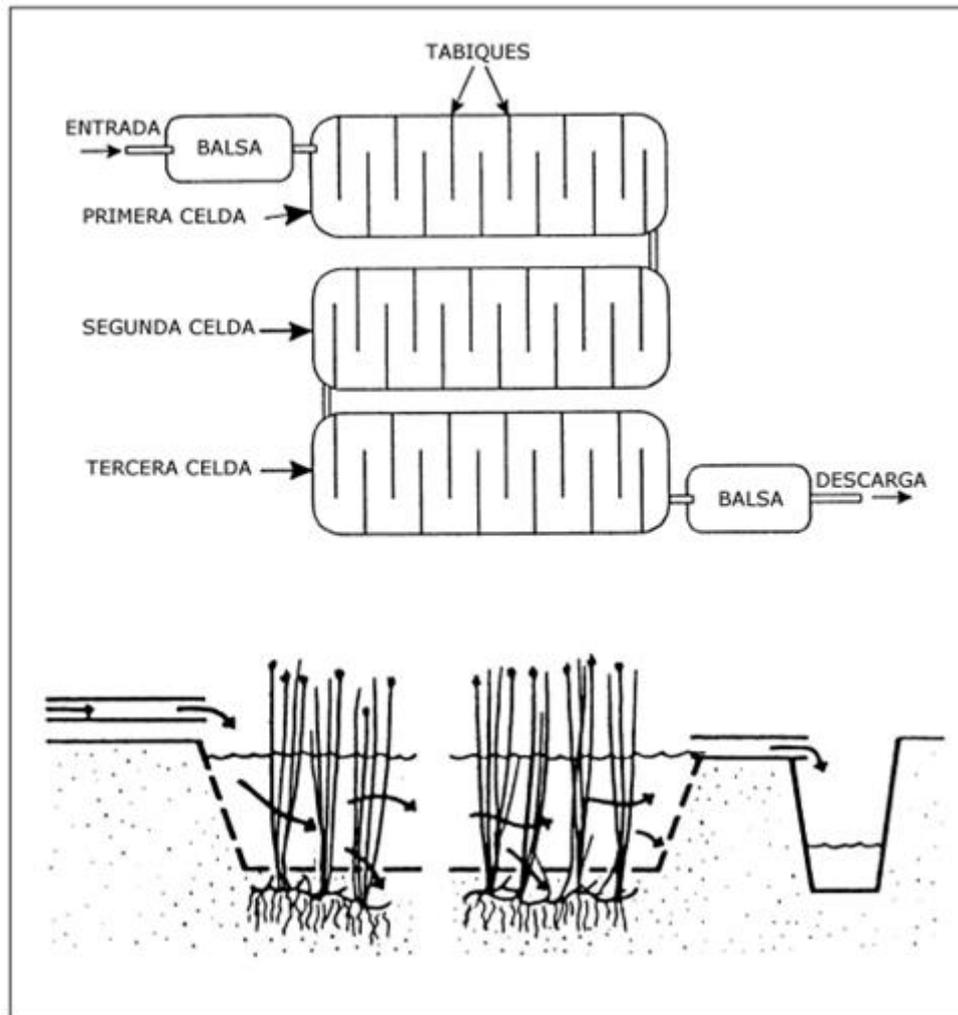
Al (ton/año)	9100
As (ton/año)	23
Cd (ton/año)	7,1
Co (ton/año)	62
Cu (ton/año)	1250
Fe(ton/año)	7100
Mn (ton/año)	1450

Ni (ton/año)	34
Pb (ton/año)	12
Zn (ton/año)	2600
Sulfatos (mg/L)	708

- A.3. Descripción de tratamientos pasivos

A.3.1. Humedales aerobios

En los humedales aerobios artificiales se pretende reproducir los fenómenos y procesos de los humedales naturales (pantanos, marismas, etc.), creando un ambiente propicio para el desarrollo de ciertas plantas (Tipha, Equisetum, carrizo, juncos, etc.), comunidades de organismos (algas, protozoos y bacterias) y musgos, los cuales participan en la depuración del agua. Los humedales aerobios cuentan con una capa de agua que inunda el sustrato sobre el que se va a desarrollar la vegetación, donde se dan las condiciones óptimas que permiten alcanzar los tiempos de retención necesarios para que ocurran los procesos de depuración del agua. Estos procesos se dan gracias al empleo de plantas acuáticas, que favorecen el contacto entre el agua contaminada y el aire atmosférico, liberando oxígeno por sus raíces y rizomas. Para que los sistemas aerobios funcionen adecuadamente la capa de agua no debe superar los 30 cm (Skousen et al., 1998). El sustrato oxigenado del humedal propicia la formación de un hábitat para que se desarrollen ciertas colonias de bacterias que actúan como catalizadoras en la reacción de oxidación de los contaminantes presentes en el humedal, transformando en el caso del hierro, el Fe^{2+} a Fe^{3+} , el cual finalmente precipita en forma de hidróxido. Los sistemas aerobios ocupan una gran superficie y están formados por una o varias celdas conectadas por las que circula el agua lentamente por gravedad, estableciéndose un flujo horizontal superficial. Para favorecer la oxigenación del agua y mejorar la eficiencia en el tratamiento se diseñan sistemas que incluyan cascadas, lechos serpenteantes y balsas de grandes superficies con poca profundidad.



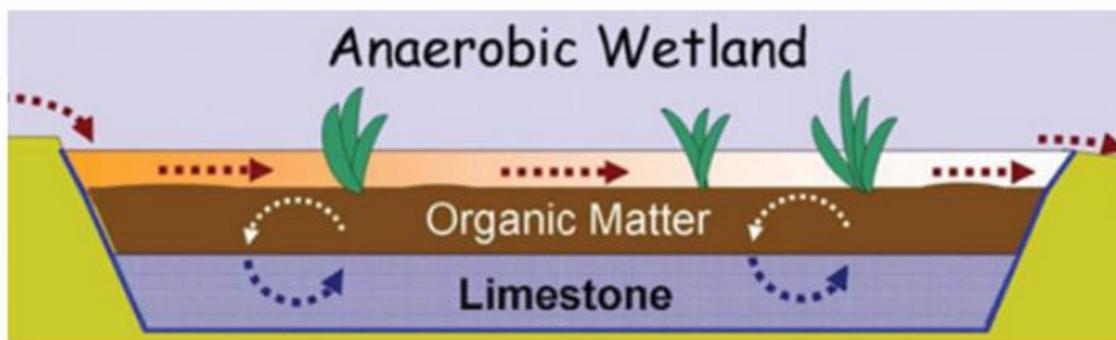
Entre los numerosos procesos que se dan en un humedal aerobio se tienen la filtración de la materia en suspensión, la adsorción de metales e intercambio iónico en los materiales del sustrato, la bioacumulación de metales en las raíces y partes emergentes de las plantas, además de la precipitación de óxidos e hidróxidos metálicos a través de reacciones de oxidación e hidrólisis (Eger, 1994). La generación de iones H^+ en la hidrólisis de los metales explica la necesaria alcalinidad neta que han de presentar las aguas a tratar si se quiere evitar un descenso del pH y la consiguiente movilización de los hidróxidos ya formados. El pH y la alcalinidad neta del agua son muy importantes debido a que ambos influyen en la solubilidad de los hidróxidos y en la cinética de las reacciones de oxidación e hidrólisis de los metales. La eficacia de la oxidación inorgánica decrece unas cien veces al disminuir el pH en una unidad, sin embargo, la oxidación microbiana contrarresta esta tendencia. A $pH > 6$ la oxidación abiótica del Fe predomina sobre la oxidación bacteriana, invirtiéndose la relación a un $pH 8$ y si esta reacción es catalizada por microorganismos se puede efectuar hasta a un pH de 6 (Wildeman et al. 1991). No obstante, si el pH del afluente es inferior a 3, el humedal como sistema de tratamiento podría dejar de funcionar.

A.3.2. Humedales anaerobios o balsas orgánicas

En los humedales anaerobios, para favorecer las condiciones anóxicas que se requieren para su correcto funcionamiento, la altura de la capa de agua debe estar por encima de 30 cm. Esta capa de agua cubre un sustrato permeable de un espesor de 30-60 cm

formado mayoritariamente por material orgánico (70-90% de estiércol, compost, serrín, etc.), que está entremezclado o bien dispuesto sobre una capa de caliza. La finalidad del substrato orgánico es eliminar el oxígeno disuelto, reducir el Fe^{3+} a Fe^{2+} , y generar alcalinidad mediante procesos químicos o con intervención de microorganismos. Sobre el conjunto de este substrato se desarrolla la vegetación emergente característica de los humedales, la cual ayuda a estabilizar el substrato además de aportar materia orgánica adicional.

La cinética de la reducción del sulfato se ha comprobado que está fuertemente ligada a la temperatura, disminuyendo en los meses más fríos, lo que provoca un menor rendimiento del sistema en período invernal. La actividad de las bacterias sulfato-reductoras está en relación con el pH del medio, es máxima a pH entre 6 y 9, inhibiéndose a un pH inferior a 5, y pueden llegar a desaparecer si entra en el sistema un caudal muy ácido. No obstante, se tiene constancia de su acción sulfo-reductora en ambientes más ácidos debido a su capacidad de controlar el microambiente que les rodea. Watzlaf en ensayos en laboratorio con columnas ha observado una disminución de la alcalinidad debida a la reducción del sulfato cuando el pH en el substrato orgánico es menor de 4, atribuyéndolo tanto a una menor actividad de las bacterias sulforeductoras como de las bacterias que degradan la materia orgánica, como paso previo del proceso. (Zipper y Skousen, 2014)

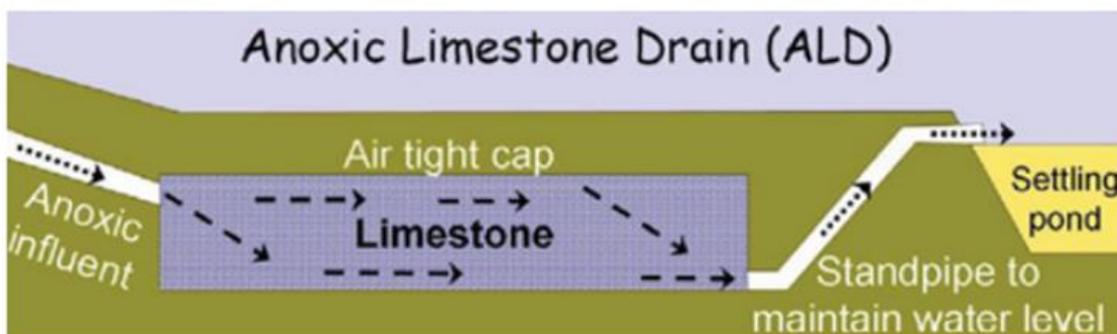


Los humedales anaerobios al generar alcalinidad admiten drenajes de mina con un $\text{pH} < 4$, y el ambiente reductor que impera en el substrato hace admisibles influentes con oxígeno disuelto ($> 5 \text{ mg/l}$), Fe^{3+} y Al^{3+} .

A.3.3. Drenaje anóxico calizo (ALD).

Este sistema consiste en una zanja rellena con gravas de caliza u otro material calcáreo sellada a techo por una capa de tierra arcillosa y una geomembrana impermeable. La zanja se instala a cierta profundidad (1 o 2 m) para mantener unas condiciones anóxicas. El drenaje ácido de mina se hace circular por el interior de la zanja provocando la disolución de la caliza, lo que genera alcalinidad ($\text{HCO}_3^- + \text{OH}^-$) y eleva el pH del agua. Los factores que afectan a la disolución de la caliza en un agua natural son el pH y la presión parcial de dióxido de carbono (pCO_2). Ambos están intercorrelacionados, el aumento de la pCO_2 provoca el descenso del pH. La disolución de la calcita es mayor a pH ácidos y a altas pCO_2 (Evangelou, 1998). Hedin y Watzlaf (1994) determinan mediante cálculo la existencia de altas presiones parciales de CO_2 en el interior de 21 dispositivos ALD, situándose entre 0,022 y 0,268 atmósferas, superior al valor medio de la pCO_2 en la atmósfera (0,0035 atm). El CO_2 proviene de la disolución de la caliza, y el incremento de la pCO_2 se debe al parcial encapsulamiento del sistema. El pH ácido que presenta el drenaje de mina junto a estas elevadas presiones parciales de CO_2

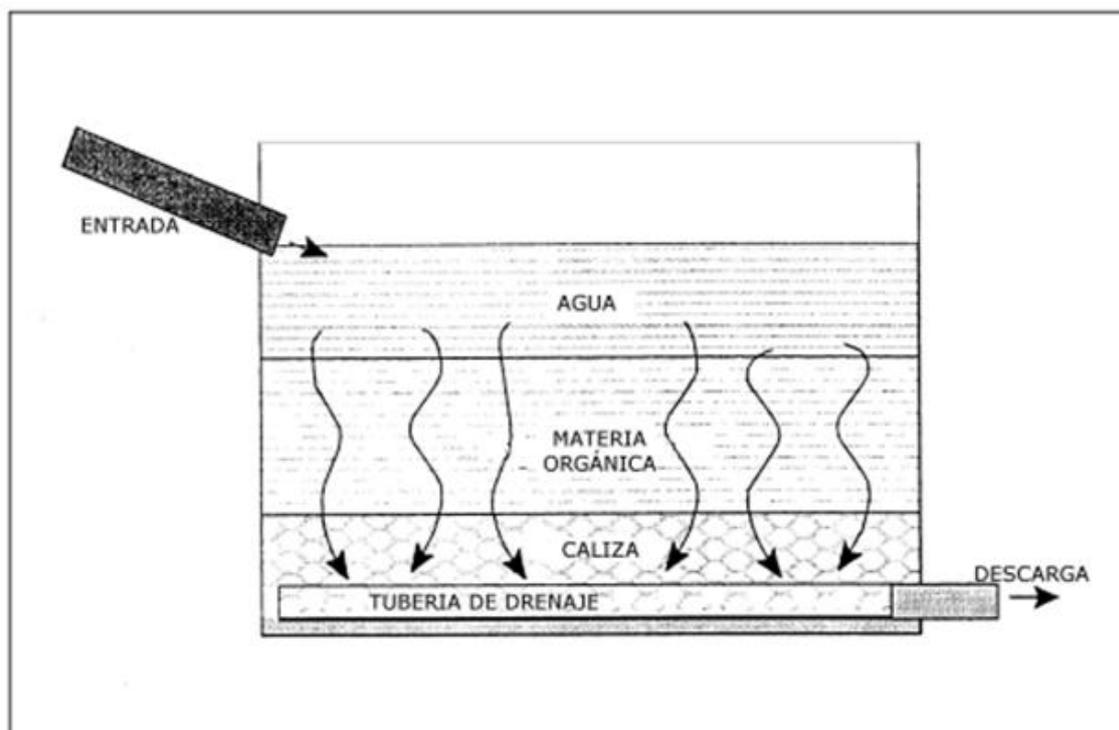
favorecen la disolución de la caliza, aportando una alcalinidad el sistema por encima de lo previsible si funcionara en condiciones totalmente abiertas. Debido a las condiciones anóxicas del sistema se evita la precipitación de óxidos e hidróxidos, y de este modo el recubrimiento de la grava caliza, manteniéndose su eficacia como fuente generadora de alcalinidad. La única finalidad de un ALD es convertir aguas con acidez neta en aguas con un exceso de alcalinidad. Por lo general el agua ácida tratada en un ALD pasa a continuación a una balsa de precipitación u otro sistema aerobio, lo que favorece la oxidación, hidrólisis, y precipitación de los oxihidróxidos metálicos (Brodie et al., 1993; Fripp et al., 2000). La alcalinidad adquirida en el ALD debe ser suficiente para contrarrestar la acidificación asociada a la hidrólisis en esta etapa del tratamiento. Los sistemas ALD son apropiados para tratar drenajes ácidos de mina con escaso oxígeno disuelto ($DO < 2 \text{ mg/l}$) y contenidos de Fe^{3+} y Al^{3+} inferiores a 1 mg/l (Hedin, 1997; Skousen et al., 1994). Esas concentraciones límites para el oxígeno y el Fe^{3+} sólo se encuentran en aguas provenientes de minería subterránea antes de que circulen por superficie. La existencia de Fe^{3+} y Al^{3+} por encima de estos límites puede inutilizar el sistema por el recubrimiento de la grava caliza y por la disminución de la porosidad del sistema, a causa de sus precipitados. Un ALD correctamente diseñado y construido debería ser capaz de aportar un mínimo de 150 mg/l de alcalinidad, siendo frecuentes los aportes entre ese valor mínimo y los 350 mg/l . Este rendimiento se obtiene con tiempos de retención a partir de 10-15 horas. La limitada solubilidad de la caliza condiciona el uso de este tipo de tratamientos a aguas con una acidez neta inferior a 350 mg/l . (Zipper y Skousen, 2014)



A.3.4. Sistema de producción sucesiva de alcalinidad (SAPS).

Este sistema de tratamiento de aguas ácidas de mina fue desarrollado por Kepler y McCleary (1994) para solucionar el problema de la gran superficie que requieren los humedales anaerobios y la precipitación de los hidróxidos de Fe y Al en los sistemas ALD. Un SAPS (o humedal anaerobio de flujo vertical) se puede considerar como un sistema de tratamiento en el que se integra una balsa orgánica y un ALD. En un SAPS se buscan los objetivos de una balsa orgánica (reducción del sulfato y retención metálica) y un ALD (incrementar la alcalinidad). Un SAPS consiste en un estanque en cuyo interior se depositan dos substratos, uno de material alcalino y otro de compuestos orgánicos, que están sumergidos en el influente a una profundidad entre 1 y 3 m, y que es drenado por la parte inferior mediante un conjunto de tubos. El substrato inferior es de caliza (0,5 a 1 m de espesor) y sirve para neutralizar el pH del influente. La capa superior es de material orgánico (0,1 a 0,5 m de espesor) y en ella se elimina el oxígeno disuelto del agua, se reduce el sulfato y se transforma el Fe^{3+} en Fe^{2+} , evitándose la precipitación del hidróxido de Fe^{3+} sobre la capa de caliza (Skousen et al., 1998; USEPA, 2000). Los SAPS se han diseñado para tratar aguas netamente ácidas con concentraciones de Fe^{3+} y Al superiores a 1 mg/l . Si el agua contiene mucho Al (algunas

decenas de mg/l) el precipitado formado en la capa caliza o tuberías de drenaje puede alterar el rendimiento del sistema. Para optimizar la reducción del sulfato y el incremento del pH en el sistema, el agua que entra por la parte superior se embalsa para conseguir condiciones de anoxia en las capas inferiores, y se fuerza a un flujo vertical a través de las capas de materia orgánica y caliza, para finalmente drenarla desde la base y conducirla generalmente a una balsa de precipitados. Para el dimensionamiento de un SAPS se han sugerido dos criterios diferentes: uno está basado en la acidez que es capaz de eliminar por metro cuadrado y día, como en los humedales anaerobios, y el otro está referido al tiempo mínimo de tratamiento o de retención en el sistema, como en los ALD. En relación al primer criterio, en SAPS con seguimiento durante varios años por Watzlaf e Hyman (1995) se ha alcanzado una reducción de la acidez equivalente a 30-50 g de CaCO_3 por metro cuadrado y día. Atendiendo al segundo criterio Kepler y McCleary (1994) señalan que el grosor de la capa de caliza estará en función del tiempo de retención necesario para alcanzar la máxima alcalinidad. Se recomiendan tiempos de retención para los SAPS similares a los de los sistemas ALD. El tiempo de permanencia debe ser como mínimo de unas 12 a 15 horas y el tamaño aproximado de los trozos de caliza de 6 a 15 cm (Watzlaf e Hyman, 1995; Skousen et al., 1998). Por lo general, el tratamiento de aguas ácidas en un SAPS va combinado con una balsa de oxidación/decantación o un humedal aerobio.



A.3.6. Sustrato Disperso Alcalino

La tecnología basada en el sustrato disperso alcalino (DAS) se basa en el uso de alcalinos de grano fino reactivos (por ejemplo, arena de piedra caliza o polvo de magnesia cáustica) para proporcionar una alta reactividad y capacidad neutralizante, mezclado con una matriz inerte gruesa (virutas de madera) para proporcionar alta porosidad a la mezcla reactiva. Debido a que el tamaño de grano del material alcalino que se usa es pequeño, se proporciona una mayor superficie reactiva que la que se tendría con la misma cantidad de grueso del material, aumentando así la velocidad de disolución. De este modo, se aumenta potencialmente la eficiencia del reactivo

consumido. En cuanto a las partículas de la matriz inerte, son de grueso tamaño proporcionando elevados tamaños de poro y alta permeabilidad, al tiempo que separa los granos reactivos individuales, haciendo que los precipitados no llenen todo el espacio poroso entre los granos, lo que evita y retrasa problemas de obstrucción. (Ayora et al., 2013)

La eficacia del tratamiento va a depender esencialmente de las relaciones entre el flujo de lixiviados ácidos y la velocidad de disolución del reactivo, la velocidad de disolución adecuada depende del tamaño de grano y la relación caliza/viruta. Así, una relación pequeña puede dar lugar a unas velocidades de disolución lentas y un tratamiento poco eficaz, mientras que un exceso de reactivo puede dar lugar a colmataciones debido de una precipitación muy concentrada.

Esta tecnología ha sido probada tanto en experimentos piloto como de laboratorio, y las implementaciones a gran escala en la FPI han demostrado excelentes resultados con respecto a la eliminación de metales. Estos experimentos han demostrado que es la única tecnología pasiva capaz de superar los problemas de obstrucción de los tratamientos pasivos convencionales, los cuales no son óptimos para el tratamiento de los lixiviados ácidos de la FPI por su alta concentración en metales y mayor orden de magnitud de acidez neta.

Las plantas de tratamiento de Sustrato Disperso Alcalino (DAS) normalmente están constituidas por varias etapas: Lagunas naturales de Fe-Oxidación (NFOL) (Macías et al., 2012), Reactores de piedra caliza-DAS (Rotting et al., 2008) y/o Reactores MgO-DAS (Caraballo et al., 2009).



En mina Esperanza se tiene implementada una planta de tratamiento de Sustrato Disperso Alcalino, la cual está integrada por: Una cascada de oxidación para promover la oxidación de Fe (II) a Fe (III), una balsa de decantación para sedimentar las partículas de schwertmannita, dos tanques sucesivos de tanque reactivo tipo DAS-caliza, y contiguo a cada tanque de reactivo se encuentra una balsa de decantación.

El relleno del tanque reactivo está compuesto por una primera capa drenante (grava gruesa de cuarzo) de unos 40 cm de espesor, seguida de una segunda capa drenante

de unos 10 cm (grava fina de cuarzo). A continuación, se dispone una capa de 2,5 m de material reactivo tipo DAS-calizo (20% en volumen de arena caliza y 80% de virutas de madera de pino). Se tiene también una capa de agua sobrenadante de 25 cm aproximadamente y una pared libre de 1m. (Carballo et al., 2010)

La secuencia del diseño del tratamiento DAS que se toma como base constará de dos tanques de reactivo DAS-calizo y un tanque de reactivo DAS-Magnésico, con el objetivo de asegurar una correcta eliminación de metales. La efectividad del tratamiento final de MgO depende de una correcta eliminación del Fe y Al en las etapas previas, por ello, se integra un pretratamiento NFOL (laguna natural oxidante de hierro) para eliminación de Fe, el cual se basa en la recreación a mayor escala de las piscinas de Fe que se forman por procesos naturales en los arroyos ácidos de la FPI y cuyo objetivo es la retirada de una cantidad de Fe significativa mediante precipitación de schwertmanita y el incremento de la concentración de Fe(III) en el agua de entrada al tanque DAS-calizo para mejorar la retirada de metales trivalentes de los drenajes ácidos de mina. (F. Macías, 2013)

