

ENTREGABLE PROYECTOS— 2023

**INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE UN SISTEMA DE BIODEGRADACIÓN
DE RESIDUOS DE POLIURETANO EN LA INDUSTRIA DEL MUEBLE
“BIOPUR”**

INFORME DE RESULTADOS

Número de proyecto: 22300042

Expediente: IMDEEA/2023/19

Duración: Del 01/07/2023 al 30/09/2024

Coordinado en AIDIMME por: IBIZA PALACIOS, MARIA DE SALES

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS DEL PROYECTO	1
2. ACTIVIDADES REALIZADAS.	2
2.1. ENTREGABLE 4.1: MICROORGANISMOS CAPACES DE HIDROLIZAR PLÁSTICOS DERIVADOS DE POLIURETANO MEDIANTE ENZIMAS HIDROLÍTICOS	2
2.1.1. IDENTIFICAR MICROORGANISMOS POLIURETANOLÍTICOS DE INTERÉS.	2
2.1.2. TOMA DE MUESTRAS DE RESIDUOS/SUBPRODUCTOS DE EMPRESAS, SELECCIÓN Y PREPARACIÓN DEL INÓCULO.	2
2.1.3. MANTENIMIENTO Y CONSERVACIÓN DE LAS CEPAS DE TRABAJO.....	7
2.2 ENTREGABLE 5.1: CARACTERIZACIÓN Y PUESTA EN MARCHA DEL PROCESO DE BIODEGRADACIÓN.	7
2.2.1 ESTUDIOS A ESCALA DE LABORATORIO DE DEGRADACIÓN DE ESPUMAS DE POLIURETANO	7
2.2.2 ESTUDIOS DE BIODEGRADACIÓN DE ESPUMAS DE POLIURETANO A ESCALA PILOTO EN BIORREACTORES...	16
2.3 ENTREGABLE 6.1: CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE LOS PRODUCTOS PROCEDENTE DE LOS PROCESOS DE BIODEGRADACIÓN.	22
2.3.1 CARACTERIZACIÓN DE ENSAYOS DE ESPUMAS DE POLIURETANO EN MEDIO LÍQUIDO LB	22
2.3.2. CARACTERIZACIÓN DE ENSAYOS DE ESPUMAS DE POLIURETANO EN ANALIZADORES RESPIROMÉTRICOS..	24
2.3.3. CARACTERIZACIÓN DE ENSAYOS DE ESPUMAS DE POLIURETANO EN BIORREACTORES PILOTO.....	28
3. RESUMEN Y CONCLUSIONES.....	37

1. Introducción, objetivos del proyecto

El objetivo general del proyecto se basa en la **biodegradabilidad de los residuos plásticos derivados del poliuretano** procedentes del sector del mueble. Las empresas del sector del mueble generan numerosos y diversos residuos que no son solo madera como muchos estudios contemplan, también se generan residuos plásticos, que, por su naturaleza química, son de difícil recuperación o reciclabilidad. Muchos de esos residuos son de naturaleza polimérica y están contribuyendo al impacto económico y social que ya presentan los plásticos en nuestro planeta. Así pues, el campo de la biodegradación se abre como puerta para poder gestionar este tipo de residuos de una forma **más sostenible y barata**, sustituyendo los procesos habituales de incineración o acumulación en vertederos.

En este proyecto se contempla el tratamiento de los residuos de espumas de poliuretano (PUF) y derivados plásticos empleados en el sector del mueble de la Comunitat Valenciana, mediante procesos de biodegradación con microorganismos que posean las rutas metabólicas adecuadas para poder llevar a cabo la degradación de los hidrocarburos que conforman los residuos plásticos.

Los objetivos específicos son:

- **Caracterización de los residuos plásticos** derivados del poliuretano más habituales en el **sector del mueble en la Comunitat Valenciana**, como espumas de colchones, de tapizados o textiles derivados del poliuretano (PUF).
- **Selección de microorganismos** (bacterias y/o hongos) en colecciones tipo involucrados en la **metabolización de materiales plásticos**: selección, crecimiento, mantenimiento y conservación.
- Preparación de un **inóculo bacteriano**, mediante un proceso de selección, capaz de metabolizar materiales plásticos mediante la toma de muestras de fuentes externas (residuos o aguas con presencia de partículas de poliuretano).
- **Caracterización del inóculo** mediante secuenciación genética a nivel de género o especie.
- Evaluación de los **procesos de biodegradación** de los diferentes residuos plásticos de PUF mediante los microorganismos seleccionados mediante diferentes técnicas tanto de análisis de imagen como mediante técnicas de análisis fisicoquímico.
- **Difusión** de forma efectiva el proyecto y sus resultados.
- **Transferencia y promoción** de los resultados a empresas de la Comunitat Valenciana, escogiendo los canales más adecuados para que la transferencia tenga el mayor impacto posible.

2. Actividades realizadas.

2.1. ENTREGABLE 4.1: Microorganismos capaces de hidrolizar plásticos derivados de poliuretano mediante enzimas hidrolíticas

2.1.1. Identificar microorganismos poliuretanolíticos de interés.

Se llevó a cabo una recopilación bibliográfica de las cepas de hongos y de bacterias que se conoce que tienen la capacidad de biodegradar poliuretano en diferentes medios.

2.1.2. Toma de muestras de residuos/subproductos de empresas, selección y preparación del inóculo.

El trabajo realizado en este paquete de trabajo se centra en el aislamiento y selección de especies que tengan potencial en la degradación de espumas de poliuretano.

Para ello se ha llevado a cabo la toma de muestras de residuos de PUF procedentes de la actividad industrial de las empresas colaboradoras y residuos PUF degradados.



Figura 1. Muestras de espumas de poliuretano degradadas tomadas en ambientes edáficos.

También, se han obtenido inóculos bacterianos pre-expuestos a partir de

muestras tomadas de ubicaciones en las que existían condiciones ambientales relevantes como son aguas de lodos activados ricas en microplásticos.



Figura 2. Muestras de lodos activados tomados en una EDAR de tratamiento biológico.

Se cultivaron espumas ya degradadas tomadas en diferentes zonas de la provincia de Valencia y se añadieron a medios de cultivo específicos para el crecimiento de hongos o de bacterias. Posteriormente, las cepas crecidas se cultivaron en medios con enriquecidos con PUF como único aporte nutritivo. Las cepas crecidas fueron seleccionadas y cultivadas en medio sólido con un 0,6% Impranil® DLN-SD (Covestro) y posteriormente mediante secuenciación genética se realizó el screening microbiológico mediante metagenómica *barcoding* para determinar, a nivel de género/especie, la población bacteriana en la muestra, del cual se obtuvieron 5 especies bacterianas diferentes. En la Figura 3 se muestran 4 de esas especies.





Figura 3. Especies bacterianas 1, 3, 4 y 5 (de izquierda a derecha, de arriba abajo) que degradan poliuretano, aisladas de espumas de poliuretano tomadas de determinados ambientes.

De aquellas cepas fúngicas que crearon halo de degradación de Impranil® DLN-SD se seleccionaron para realizar un último ensayo a escala de laboratorio de selección en el Paquete 5. Se secuenció el gen ITS D1/D2 y se identificaron 3 especies fúngicas.

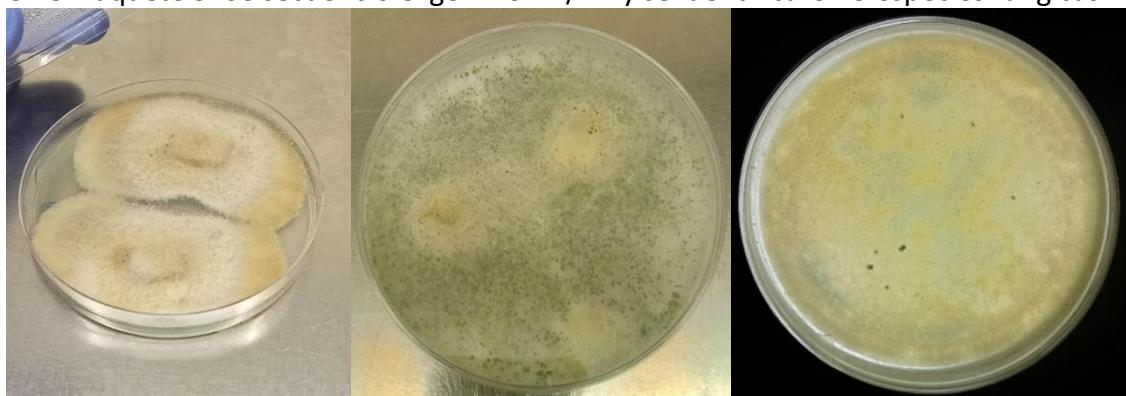


Figura 4. Especies fúngicas 10, 11 y 12, aisladas de espumas de poliuretano degradadas, tomadas de muestras en ambientes determinados.

Por otro lado, se aislaron y sembraron en medio sólido con Impranil® DLN-SD, las cepas bacterianas que degradaban espumas de poliuretano ensayadas en analizadores respirométricos de DBO inoculados con lodos activados de la EDAR de tratamiento biológico. Los resultados de secuenciación del gen 16S determinaron las especies 6, 7, 8 y 9.



Figura 5. Especies bacterianas 6, 7, 8 y 9 aisladas de lodos activados de EDAR.

Las 9 cepas bacterianas preseleccionadas que crearon el halo de degradación de Impranil® DLN-SD, provenientes tanto de degradación de espumas degradadas, como de ensayos realizados en analizadores respirométricos de DBO, se aislaron y se utilizaron para ensayarlas en medio líquido y comprobar la degradación de Impranil® DLN-SD. En este caso se evaluó el resultado a nivel visual, también se determinaron los valores de densidad óptica de los medios de cultivo y el resultado de análisis FTIR. Tras estos tres análisis finalmente se seleccionaron aquellas cepas que mostraban resultados significativos en los tres tipos de análisis. Es decir, aquellas cepas que tras el ensayo producían una clarificación casi completa del Impranil® DLN-SD en el medio de cultivo, a la vez que disminuían la densidad óptica del medio al cabo de 35 días y finalmente eliminaban la presencia del enlace éster (indicativo de la integridad del compuesto del poliuretano en el Impranil® DLN-SD) en las gráficas de análisis FTIR.

Finalmente se seleccionaron 6 de las especies que mostraron mejores resultados en la degradación del poliuretano en Impranil® DLN-SD. Estas se utilizaron para ensayar espumas de PU a escala de laboratorio.

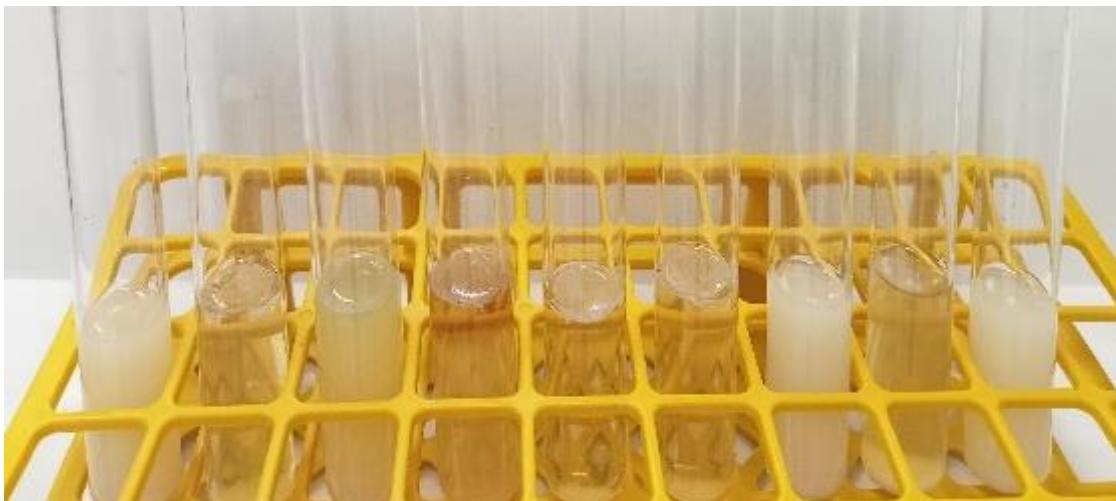


Figura 6. Tubos de ensayo con LB+Impranil® DLN-SD 0,6% inoculados con las bacterias poliuretolíticas y dos controles sin inocular a los lados (de derecha a izquierda) tras 15 días de incubación.

Tabla 1. Valores de absorbancia a 625 nm de los medios inoculados con las 8 especies bacterianas. Resultados visuales donde se determina mayor claridad (+) o menor (-). Desaparición del pico del enlace éster del Impranil® DLN-SD (+), si no hay desaparición (-). Resultados trascurridos 35 días de incubación.

	Absorbancia 35dpi		Resultado visual.		Resultados análisis FTIR
	A	B	Claridad (+)	Opacidad (-)	
Especie1	0,15	0,19	+		+
Especie2	1,22	1,15	-		-
Especie3	0,11	0,23	+		+
Especie 5	0,31	0,30	+		+
Especie 6	0,27	0,39	+		+
Especie7	1,14	1,70	+		+
Especie 8	1,77	1,95	-		-
Especie 9	0,19	1,49	+/-		+/-
Control	1,54	1,55	-		-

2.1.3. Mantenimiento y conservación de las cepas de trabajo.

En este paquete de trabajo se estudió el método de mantenimiento y conservación de todas las cepas seleccionadas, para no perder la viabilidad de estas especies, para ello se prepararon soluciones de bacterias, soluciones de endosporas bacterianas y soluciones de esporas fúngicas en glicerol, con el fin de conservarlas a -20°C.

2.2 ENTREGABLE 5.1: Caracterización y puesta en marcha del proceso de biodegradación.

2.2.1 Estudios a escala de laboratorio de degradación de espumas de poliuretano

Ensayos de degradación de espumas de poliuretano en medio LB sólido y líquido.

Se realizaron diversos ensayos de degradación de las siguientes espumas de poliuretano con las especies 1, 3, 5, 6, 7 y 9.

Tabla 2. Muestras de espumas de poliuretano flexibles estudiadas en el presente proyecto.

Muestra	Empresa	Descripción	Aspecto	Densidad (kg/m ³)	Foto
1	C	Espuma	Blanco	25	
8	E	Espuma	Gris	-	
16	D1	XD-60-BL	Blanco	-	
13	D2	CMHR-35 Espuma	Blanco	35	

Muestra	Empresa	Descripción	Aspecto	Densidad (kg/m ³)	Foto
17	B	Espuma 3,5 KPa	Blanco	25	

Por un lado, se ensayaron mediante la metodología de la norma UNE EN 846 tanto con las bacterias 1, 3, 5 y 9 como con los hongos los cuales no dieron resultados de degradación, no se observó diferencia de pesos, cambio de coloración.

Asimismo, se realizaron ensayos de espumas de poliuretano B, C, D y E sin degradar, en matraces con medio líquido y con las bacterias 1, 5 y 6 inoculadas por separado en cada matraz. También se realizaron ensayos de espumas degradadas con temperatura a 190°C durante 4 horas en matraces con solución de sales minerales inoculados con un consorcio bacteriano formado por las especies 1, 3, 5 y 6, donde se obtuvieron disminuciones de peso mostradas en la Tabla 3. De la misma manera, se observa que la mejor manera de biodegradar estas espumas es mediante esta última metodología mencionada, teniendo así los consorcios bacterianos actuando sinérgicamente en la degradación de las muestras ya ligeramente degradadas.

A lo largo de todos los ensayos realizados en este Paquete, y en base a los resultados obtenidos de todas las especies, se terminaron descartando la especie 7 y 9 para el ensayo a escala piloto.

Tabla 3. Resultados de diferencia de peso de cada tipo de muestra en el ensayo respecto de las muestras control.

Muestra	Ensayo	Media pérdida de peso (%)	Diferencia en la pérdida de peso (%)
Espuma D2	Inoculadas	7,08	2,39
	Control	4,68	
Espuma E	Inoculadas	3,70	0,79
	Control	2,91	
Espuma C	Inoculadas	7,21	2,78
	Control	4,43	
Espuma B	Inoculadas	6,56	1,15
	Control	5,41	

Estudio de la degradación de espumas de poliuretano a partir de analizadores respirométricos de la demanda biológica de oxígeno (DBO).

Se realizaron diversos ensayos de degradación de las siguientes espumas de poliuretano.



Espuma A



Espuma B



Espuma C



Espuma D



Espuma E

Figura 7. Espumas estudiadas mediante técnicas espirométricas

A. **Ensayo NORMA UNE-EN ISO 14851:2020**

Otra técnica de obtención y aislamiento de especies microbianas que posean la capacidad de metabolizar la estructura de los residuos de espumas flexibles de poliuretano se llevó a cabo a partir de un procedimiento de determinación de la biodegradación de materiales plásticos a partir de la norma UNE-EN ISO 14851:2020 “Determinación de la biodegradabilidad aerobia final de materiales plásticos en medio acuoso. Método para la determinación de la demanda de oxígeno en un respirómetro cerrado”. Para ello, se emplearon inóculos pre-expuestos procedentes de lodos recolectados en ubicaciones con condiciones ambientales pertinentes, como aguas contaminadas con plásticos o plantas de tratamiento industrial. De los ensayos que presenten un mayor porcentaje de biodegradación, se estudiarán los medios de cultivo e identificar así las especies que han crecido en mayor concentración. De forma paralela, además, en esta tarea se estudiará, por una parte, qué muestras facilitadas por las empresas presentan mayores biodegradaciones y, por otra parte, la optimización del procedimiento para conseguir mayores porcentajes de biodegradación y en un menor tiempo de ensayo.

Empleando las técnicas respirométricas se estudiaron seis tipos de espumas flexibles de poliuretano y un poliuretano líquido biodegradable. El procedimiento realizado en el proyecto inicialmente se validó con un poliuretano líquido comercial biodegradable (IMPRANIL® DLN-SD), obteniendo una biodegradación del 30%. En los ensayos respirométricos, las espumas se expusieron, como única fuente de carbono en

concentraciones entre 0,1 y 0,2 g/L, a un medio de cultivo formado por sales minerales y a un consorcio microbiano incorporado en una proporción entre un 3-5%, logrando una degradación parcial demostrada por el consumo de oxígeno y la generación de CO₂.

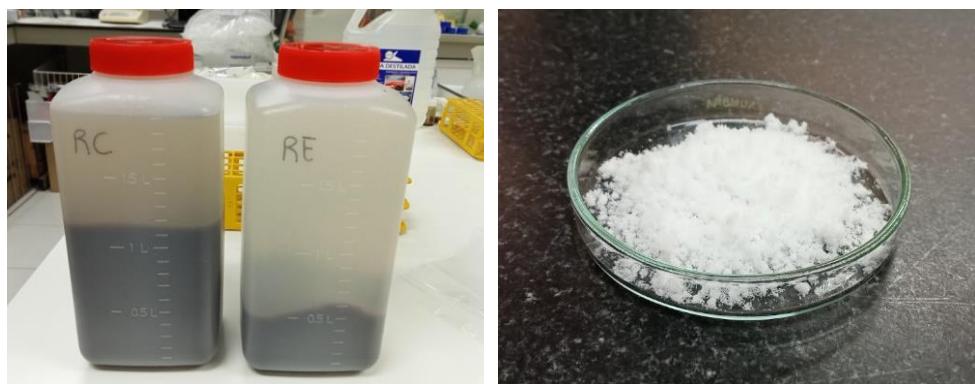


Figura 8. Muestras de lodos procedentes de la EDAR (izquierda) y espuma de poliuretano flexible triturada (derecha).

En la siguiente tabla se recogen los valores resumen de biodegradabilidades obtenidas:

Tabla 4. Resumen de resultados de biodegradación de las muestras ensayadas mediante respirometría.

		Medio mineral MN: Medio normalizado ME: Medio enriquecido	Tiempo (días)	Biodegradabilidad (%)
IMPRANIL® DLN-SD	Prueba 3	MN	35	30,1
Espuma A	Prueba 5	MN	47	27,1
Espuma B	Prueba 6	ME	24	29,2
Espuma B	Prueba 8	ME	40	49,6
Espuma B	Prueba 8	MN	40	25,5
Espuma C	Prueba 6	ME	25	29,1
Espuma C	Prueba 8	ME	40	40,0
Espuma C	Prueba 5	MN	40	20,1
Espuma D	Prueba 8	MN	36	8,8
Espuma E	Prueba 8	MN	40	8,7



Figura 9. Matraces de ensayo en funcionamiento a temperatura de ensayo constante.

B. Ensayo pretratamiento termo oxidativo y radiación UV.

Tras primeros ensayos de biodegradación de espumas de poliuretano por respirometría no se observó degradación biológica por parte de la población de bacterias de las muestras de lodos empleadas. Por este motivo se estudiaron varios pretratamientos para conseguir un envejecimiento de la estructura y evaluar su comportamiento.

Se realizó un **pretratamiento termo oxidativo** de degradación física a las muestras de espuma de poliuretano con la finalidad de degradar algunos enlaces rompiendo la estructura tridimensional dando lugar a estructuras más desordenadas que pudieran ser más fácilmente degradadas por bacterias. Las degradaciones termo oxidativas se realizaron a diferentes temperaturas, 150°C a 200 °C durante 4 horas en mufla marca Nabertherm. Se emplearon muestras de un tamaño aproximado de 3x3 cm y se midieron las posibles pérdidas tras el proceso de termo oxidación, Tabla 5, así como su aspecto visual, Tabla 6.

Tabla 5. Pérdida de masa (%) por degradación termo oxidativa.

T ^o (°C)	% de pérdida de masa				
	Espuma A	Espuma C	Espuma B	Espuma D (*)	Espuma E (*)
150	0,86	0,63	1,03	-	-
160	1,18	1,26	1,18	-	-
170	1,59	1,61	1,64	-	-
180	3,61	3,11	3,33	-	-
190	10,30	4,73	5,68	-	-
200	23,15	17,58	18,84	18,53	6,73

(*) Únicamente se realiza la degradación de estas espumas a 200°C, ya que a esta temperatura no se observa rotura al tacto de las muestras. Visualmente mantienen su estructura dimensional.

Tabla 6. Aspecto visual de las espumas por degradación termo oxidativa.

MUESTRA	TEMPERATURA	ASPECTO
Espuma A	150°C	Ligero amarilleamiento
	200°C	Oscurecimiento notable de la muestra. Mantiene esponjosidad, pero con fricción se rompe.
Espuma B	150°C	Ligero amarilleamiento
	200°C	Oscurecimiento notable de la muestra. Mantiene esponjosidad, pero con fricción se rompe.
Espuma C	150°C	Ligero amarilleamiento
	200°C	Oscurecimiento notable de la muestra. Mantiene esponjosidad, pero con fricción se rompe.
Espuma D	200°C	Oscurecimiento de la muestra. Mantiene esponjosidad. No se rompe al tacto
Espuma E	200°C	Oscurecimiento de la muestra. Mantiene esponjosidad. No se rompe al tacto

La degradación por exposición a radiación UV se realizó en equipo Suntest CPS + que

simula la exposición acelerada a la luz solar empleando una lámpara de xenón, durante un periodo de 6 días. Esta degradación acelerada se realizó con las espumas Espuma A, Espuma B y Espuma C. Se emplearon muestras, por una parte, en formato triturado, para conseguir una exposición en la mayor superficie posible y, por otra parte, muestras de tamaño de 3x3 cm con un espesor de 0,5 cm aprox. En este caso se observó el aspecto visual al finalizar la exposición.

Se observa un amarilleamiento generalizado en todas las espumas. En las muestras Espuma B y Espuma C se observa un cambio drástico de la coloración, y en la muestra Estándar se observa un amarilleamiento más potenciado. Al tacto, las muestras de dimensiones 3x3 cm se rompen al realizar una ligera presión.

De todos estos ensayos se observó/concluyó lo siguiente:

- El pretratamiento térmico de las espumas es clave para aumentar la biodegradación. Se observa que la degradación previa de la estructura de la espuma flexible de poliuretano facilita la metabolización de los grupos funcionales por parte de los microorganismos. Tras los ensayos se demostró en la Espuma C (del 1,56% al 20,67% en Prueba 5) y la Espuma B (del 4% al 19,3% en Prueba 5) tras un tratamiento a 200°C en 38 días. La Espuma A alcanzó una biodegradación del 27% (Prueba 5), mientras que las espumas Espuma D y Espuma E registraron menores tasas (8,69% y 8,79%, respectivamente en Prueba 8). La Espuma A, obtuvo una biodegradación algo superior al resto de espumas estudiadas posiblemente debido a un envejecimiento natural adicional del material.
- Se evaluó la influencia del medio de cultivo, observándose que un medio mineral enriquecido en nutrientes y tamponado mejora la biodegradación en las espumas referenciadas como Espuma B y Espuma C, alcanzando valores cercanos al 30% en 25 días (Prueba 6), un 10% más que en ensayos con menor cantidad de nutrientes. Sin embargo, este enriquecimiento no mejoró la biodegradación de las espumas Espuma A, Espuma D y Espuma E.
- Aunque se exploraron otras técnicas de pretratamiento, como la exposición a luz ultravioleta, los tratamientos térmicos mostraron mejores resultados. Este pretratamiento mejoró la biodegradación en comparación con espumas no tratadas. La Espuma A alcanzó un 15% de biodegradación, mientras que las espumas Espuma B y Espuma C lograron aproximadamente un 5%.

- El aumento de la concentración de inóculo del 3% al 5% mostró una tendencia a mejorar la biodegradabilidad (Prueba 3), aunque se requieren más ensayos para confirmar este comportamiento.
- Sin embargo, aumentar la fuente de carbono, manteniendo la concentración de especies formadoras de colonias no mejoró la biodegradabilidad del conjunto.

Se observa como los valores de biodegradabilidad de algunas espumas estudiadas alcanzan un valor aproximado al IMPRANIL® DLN-SD , compuesto de PU reconocido como biodegradable (por lo que deja de considerarse material plástico). Este efecto se consigue, a través de un tratamiento térmico y fundamentalmente gracias a la inoculación de un consorcio bacteriano definido por determinadas especies bacterianas pertenecientes mayoritariamente a los géneros *Sphingobium spp.*, *Terrimicrobium spp.*, *Moehibacter spp.* y *Truepera spp* (identificadas mediante secuenciación masiva).

Secuenciación masiva de nueva generación.

Se ha llevado a cabo la secuenciación masiva (NGS) o metagenómica *shotgun* de los ensayos de DBO a través de muestras de las espumas de PU mediante respirómetros con el fin de identificar el consorcio de bacterias que actuaron en la degradación de espumas de PU, en relación con los datos de DBO. Las muestras se tomaron de los ensayos mostrados en la tabla.

Tabla 7. Tipos de ensayos de donde se tomaron muestras para secuenciar mediante NGS.

Referencia	% Bio
C1	20,67
C3	>29,01
S1	19,27
S3	>29,01
PU-L1	28,13
S190N	28,13
HC200N	28,13
M200N	28,13
C190E	28,13
S190E	28,13

En base a los resultados obtenidos tras el filtrado de secuencias de ADN, se generó

un listado compuesto únicamente por secuencias pertenecientes al dominio *Bacteria*, donde se observó que los resultados de NGS empleando los dos primeros inóculos, tomados en diferentes fechas (pero de la misma EDAR), mostraban consorcios de especies bacterianas similares.

Empleando el segundo inóculo, pero con más tiempo de conservación y con un mayor contenido en sólidos, se observó como el perfil del consorcio bacteriano es, en general, diferente en cuanto a género y especie, si se compara con el formado en los casos anteriores. Sin embargo, hay que indicar que sí se comparten algunos géneros. Esta diferencia pudo ser consecuencia de que un mayor contenido en sólidos puede cambiar el perfil bacteriano con capacidad para alimentarse de las muestras de PUF. De hecho, incluso se observan valores de biodegradabilidad mucho mayores en las espumas de dos de las cuatro empresas colaboradoras, a los obtenidos hasta el momento.

Los resultados de NGS con el poliuretano Impranil® DLN-SD DLN-SD (Covestro) distan considerablemente de los resultados obtenidos en las PUF de estudio. Por ello, no se han considerado en la caracterización de todos los resultados en conjunto.

En cuanto a la determinación de cada categoría taxonómica; los PHYLA más representados en las NGS de todos los productos (excepto Impranil® DLN-SD) fueron: *Proteobacteria*, *Bacteroidota*, *Actinobacteriota* y *Verrucomicrobiota*. En cuanto a las CLASES más representadas en las NGS de todos los productos (excepto Impranil® DLN-SD) fueron: *Gammaproteobacteria*, *Alphaproteobacteria*, *Bacteroidia*, *Verrumicrobiae* y *Actinobacteria*. En cuanto a las ÓRDENES más representadas en las NGS de todos los productos (excepto Impranil® DLN-SD) son: *Sphingomonadales*, *Burkholderiales* y *Rhizobiales*.

Se observó la presencia de especies pertenecientes a 3 géneros especialmente, de los cuales de uno de ellos se han aislado diferentes especies con la capacidad de degradar compuestos orgánicos, incluyendo contaminantes ambientales como productos petroquímicos, pesticidas, y otros compuestos sintéticos, debido a su capacidad de utilizar diversas rutas metabólicas. Esta capacidad de degradación es especialmente valiosa en aplicaciones de biorremediación, por lo que su estudio para la biodegradación de PUF sería de gran interés en proyectos posteriores.

En cuanto a los otros dos géneros hasta el momento no hay referencias de especies con capacidad metabólica de plásticos o derivados. En el proyecto BIOPUR su detección por NGS las ha caracterizado como candidatas en estudios de gestión de residuos de PU. Por lo tanto, significa una propiedad más en la aplicabilidad de estos dos géneros.

No hay que descartar ninguna de las especies determinadas como abundantes en los estudios de NGS, ya que cada espuma presenta su propia composición y ello puede generar divergencias entre los resultados, esto no significa que una especie presente la capacidad metabólica de degradar los residuos de PUF de una empresa, pero no de otra.

2.2.2 Estudios de biodegradación de espumas de poliuretano a escala piloto en biorreactores.

Los resultados obtenidos a pequeña escala, por una parte, en el estudio de actividad poliuretanolítica en frascos Erlenmeyer trabajando con bacterias secuenciadas y aisladas, y, por otra parte, en analizadores respirométricos empleando un consorcio microbiano procedente de una EDAR, se escalaron a nivel piloto, acercándose a una realidad industrial.

El estudio se centró en la biodegradación de espumas de poliuretano flexibles (Espuma C) mediante dos procesos paralelos a escala piloto, utilizando biorreactores discontinuos con consorcios microbianos. Los dos procesos seleccionados se basaron en una serie de estudios de cuantificación de la demanda de oxígeno previos, donde se cuantificaron los porcentajes de biodegradación y se identificaron una serie de microorganismos con características poliuretanolíticas a nivel de laboratorio. Estos estudios proporcionaron la base para elegir las condiciones y consorcios microbianos más adecuados para los ensayos a mayor escala. El objetivo fue evaluar la degradación del poliuretano en condiciones controladas de temperatura, pH, agitación, potencial redox y oxígeno disuelto, utilizando diferentes enfoques microbiológicos.

Para llevar a cabo los ensayos a escala piloto de laboratorio se realizaron dos procesos paralelos de biodegradación.

Proceso 1: Biodegradación de espumas de poliuretano flexibles a partir de un consorcio microbiano procedente de una EDAR.

Se empleó un consorcio microbiano procedente de una estación depuradora de aguas residuales (EDAR). Utilizando un reactor encamisado de 10 litros se introdujeron espumas pretratadas térmicamente en un medio de cultivo microbiano enriquecido en sales. Los principales parámetros medidos incluyeron pH, oxígeno disuelto y potencial redox, todos monitoreados durante los 57 días de ensayo. Se observó una pérdida de peso en las probetas de 0,93%, lo que indica una biodegradación limitada en las condiciones del experimento. Visualmente se observaron probetas con pérdida de color original y con superficie alterada con aspecto rugoso. El medio microbiano presentó un color ligeramente amarillento, con trozos de pequeño tamaño suspensión.



Figura 10. Sistema de biodegradación Proceso 1. Biodegradación de espumas de poliuretano flexible a partir de un consorcio microbiano procedente de una EDAR.

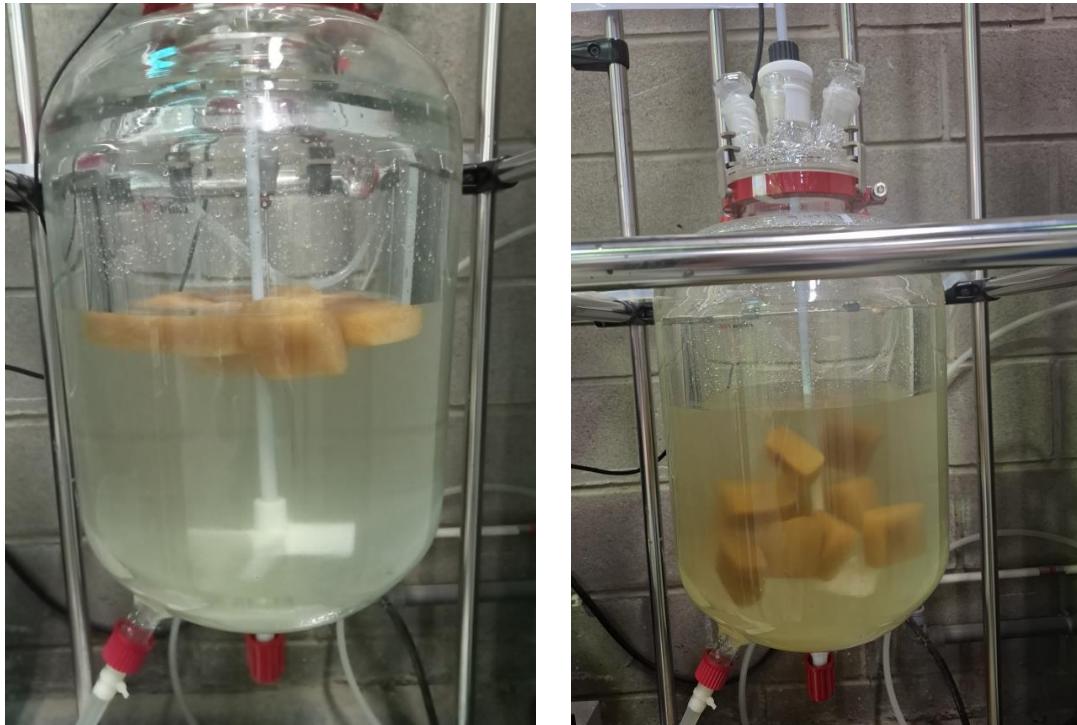


Figura 11. Aspecto del conjunto de biodegradación inicial (izquierda) y tras 57 días (derecha).



Figura 12. Aspecto de las espumas de poliuretano biodegradadas y estériles (izquierda) y medio de cultivo microbiano obtenido del proceso de biodegradación con consorcio microbiano EDAR (derecha).

Proceso 2: Biodegradación de espumas de poliuretano flexibles a partir de un consorcio específico de bacterias aisladas AIDIMME en condiciones estancas.

Se realizó con un consorcio bacteriano específico (AIDIMME), compuesto por bacterias degradadoras de poliuretano identificadas y aisladas, y se utilizó un reactor de 5 litros, en condiciones estancas. En este caso, el pretratamiento de las espumas también incluyó un proceso térmico, y las espumas se sumergieron en una solución salina. El proceso duró 53 días, con un seguimiento similar de los parámetros medidos. Se logró una pérdida de peso en las espumas del 8,84%.



Figura 13. Sistema de biodegradación Proceso 2. Biodegradación de espumas de poliuretano flexibles a partir de un consorcio de bacterias AIDIMME en condiciones estancas.

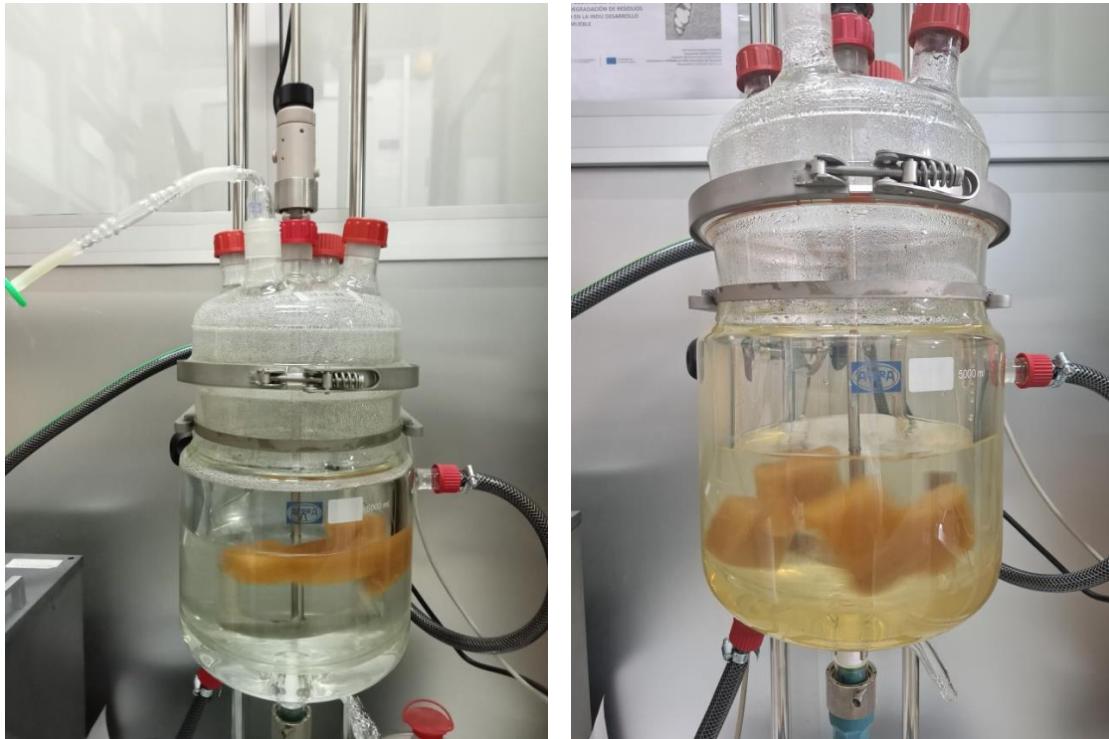


Figura 14. Aspecto del conjunto de biodegradación inicial (izquierda) y tras 53 días (derecha).



Figura 15. Aspecto de las espumas de poliuretano biodegradadas y estériles (izquierda) y medio de cultivo (derecha).

Se observaron espumas más frágiles a su manipulación durante el proceso de esterilización y más blandas al tacto. El medio microbiano presentó un aspecto transparente, con algo de trozos de espuma en suspensión.

Tabla 8. Resultados de pérdida de peso de cada tipo de muestra en el ensayo respecto de las muestras control y aspecto de la muestra.

	Pérdida de peso (%)	Aspecto
Proceso Biodegradación 1	0,93	Variación de color inicial y superficie alterada con aspecto rugoso.
Proceso Biodegradación 2	8,84	Más frágil y blanda a su manipulación.

Finalizado el estudio, los resultados muestran que la biodegradación de espumas de poliuretano es posible, pero su eficacia depende de la combinación de condiciones experimentales y microorganismos adecuados.

2.3 ENTREGABLE 6.1: Caracterización de las propiedades físico-químicas de los productos procedente de los procesos de biodegradación.

La caracterización química de los compuestos que se obtienen tras los procesos de biodegradación se analizó con las técnicas químicas analíticas pertinentes y adecuadas al producto resultante.

El análisis de imagen necesarios para poder evaluar el estado final de los materiales de PUF una vez procesados por los microorganismos se llevó a cabo mediante microscopía óptica y/o mediante el SEM de sobremesa.

La caracterización de las propiedades físico-mecánicas de los materiales bioprocesados podrán ser analizados mediante diferentes técnicas de caracterización del tamaño de las celdas de las espumas que son las que se verán alteradas por la acción enzimáticas de los microorganismos.

2.3.1 Caracterización de ensayos de espumas de poliuretano en medio líquido LB

Tras los ensayos realizados y descritos en el Entregable 5 se realizaron análisis químico, físico y de imagen de las muestras y/o medios una vez ensayados dando lugar a los siguientes resultados en el caso del ensayo en medio líquido LB de muestras de 50mm x 50mm x 2-4mm:

- En cuanto al **análisis químico**, se realizó un análisis cromatográfico inicial del medio de cultivo una vez terminado el ensayo, en el cual no se observó presencia de los compuestos 2,4-toluendiamina, 4,4-metilendianilina, 1,4-butanediol, dietilenglicol, trimetilpropano ni ácido adípico. También se realizaron análisis FTIR de las espumas donde se observaron algunos cambios en enlaces N-H y C=O en las muestras C por parte de las bacterias 1 y 9.
- También se realizaron **análisis de imagen**. Para ello se estudiaron las imágenes obtenidas en el SEM de espumas de poliuretano de la muestra de espuma C control y ensayadas con la especie 6 durante 4 semanas en medio líquido LB. Se observó en la espuma ensayada con la especie 6 un descorchamiento, sin embargo, es posible que se debiese a la precipitación de las sales del medio de cultivo, ya que en las muestras analizadas a las 8 semanas no se observaba esta diferencia entre espumas de poliuretano de ensayos control y ensayos inoculados.

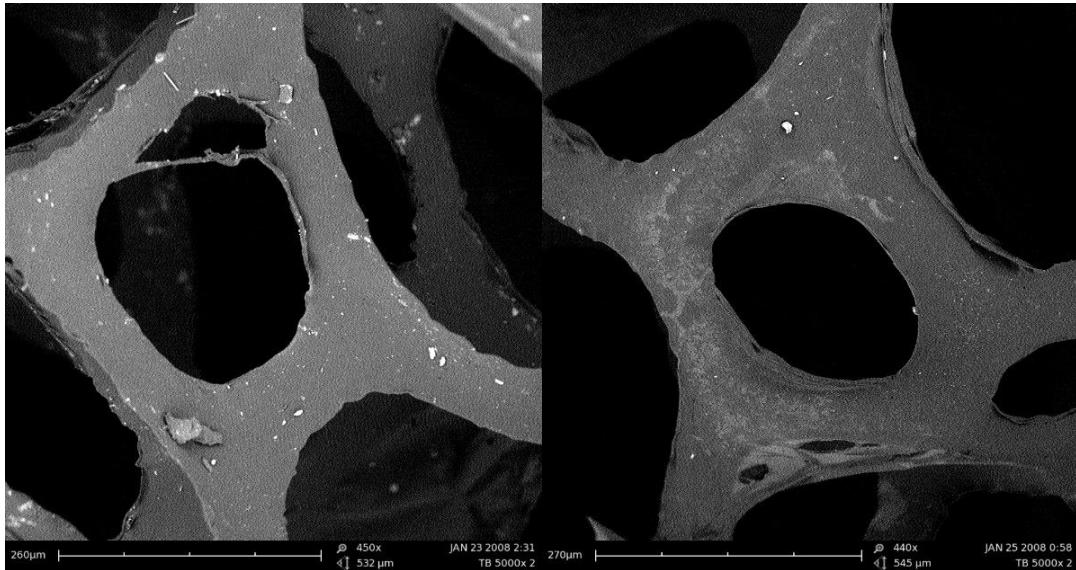


Figura 16. Imagen en un Microscopio Electrónico de Barrido de la muestra C control (izquierda) y muestra C frente a la especie 6 (derecha) ensayadas en medio líquido LB durante 4 semanas.

- En cuanto al análisis **físico-mecánico**. Se realizaron ensayos para medir la fuerza/deformación en compresión y la deformación residual de las espumas ensayadas en medio líquido LB con las especies 1, 3, 5 y 9. Para ello se midió inicialmente la densidad aparente de las muestras, posteriormente se comprimieron las muestras una encima de otra, hasta el 40% y 20% de compresión, y se calculó la fuerza aplicada. La medida de deformación residual se realizó mediante compresión del 50% de las muestras durante 72 horas a 23°C y 50% de humedad, utilizando la medida de espesor realizada 30 minutos después de finalizar la compresión en cada muestra. Se observó en los resultados de deformación residual que las espumas ensayadas con bacterias sufrieron mayor deformación que las espumas control, tal y como se muestra en la Tabla 9. En el caso de la fuerza necesaria para la compresión del 40% y 20% de las muestras fue mayor en espumas control de las muestras B y E tras el ensayo en medio líquido LB frente a las muestras ensayadas con bacterias, las cuales requirieron de menor fuerza para alcanzar la misma deformación. Esto es posible que se deba a un cambio físico mecánico producido por la degradación de las espumas por parte de las bacterias.

Tabla 9. Valores de deformación remanente, dado en tanto por ciento (%), de las muestras de poliuretano ensayadas en medio líquido LB tras comprimir su espesor al 50% durante 72 horas.

Referencia	Deformación remanente, c.s (50%, 72 h, 23ºC) (%)			
	Control (LB)	Especie 6	Especie 1	Especie 5
D2	18,4	26,7	34,5	29,2
C	44,6	52,2	55,3	50,5
B	33,9	42,9	46,7	46,8
E	15,0	28,9	37,3	27,9

Tabla 10. Resultados de la fuerza (en Newtons) necesaria para la compresión del 40% de las muestras de poliuretano ensayadas en medio líquido LB.

Referencia	F ₄₀ (N)			
	Control (LB)	Especie 6	Especie 1	Especie 5
D2	10,31	10,13	9,65	10,24
C	5,89	5,32	5,47	5,54
B	8,19	6,70	6,27	6,54
E	9,09	8,66	7,91	8,57

2.3.2. Caracterización de ensayos de espumas de poliuretano en analizadores respirométricos.

Tras los ensayos realizados y descritos anteriormente en la puesta en marcha de procesos de biodegradación, se realizaron análisis químicos, físicos y de imagen de las muestras y/o medios una vez ensayados dando lugar a los siguientes resultados, en el caso el ensayo de espumas de poliuretano en analizadores respirométricos:

- El **análisis químico** de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) demostró cambios significativos en los grupos funcionales de las espumas de las empresas principalmente Espuma B y Espuma C tratadas con un consorcio microbiano, y en menor medida Espuma D y Espuma E. La biodegradación tuvo lugar principalmente por la rotura del grupo carbonilo del enlace éster del uretano, que une el poliol (segmento blando) con el isocianato (segmento duro), y la consiguiente generación de subproductos como potencial fuente de carbono y nitrógeno, más accesibles y aprovechables por los microorganismos.

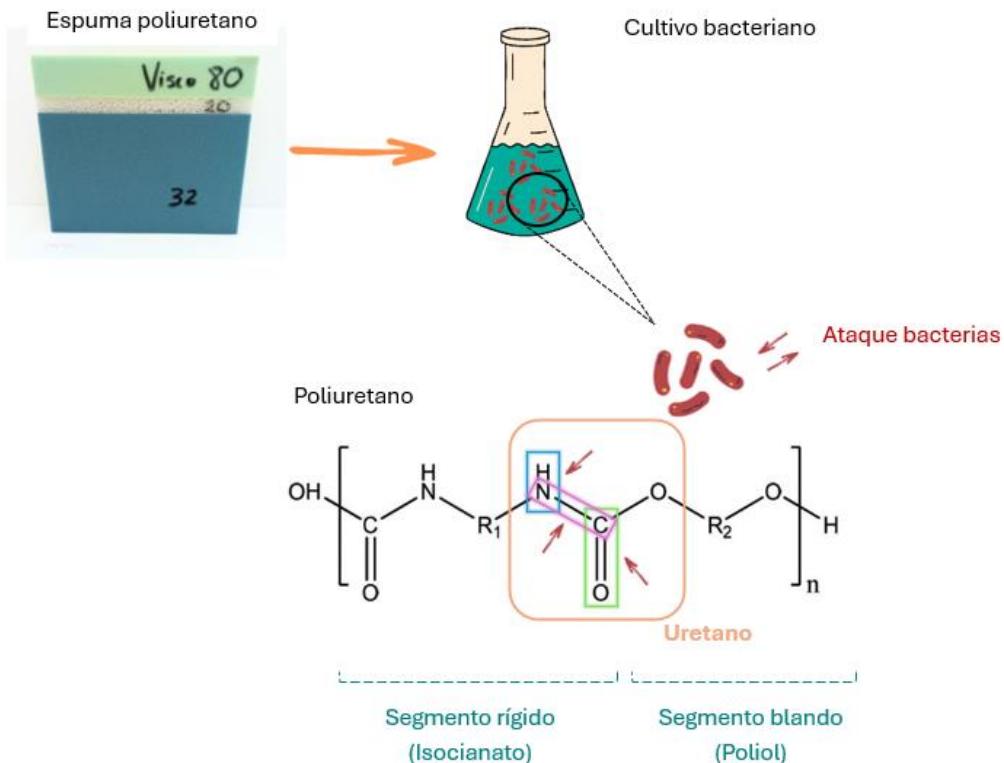


Figura 17. Esquema de mecanismo de biodegradación principal de bacterias llevada a cabo en analizadores respirométricos.

- El **análisis de imagen** mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) reveló diferencias entre las espumas control y las espumas Espuma A, Espuma B y Espuma C inoculadas con el consorcio microbiano EDAR. Las espumas tratadas térmicamente y degradadas biológicamente mostraron superficies más irregulares, con pequeños agujeros, cavidades y "cracking", lo que sugiere la actividad poliuretanolítica de los microorganismos.

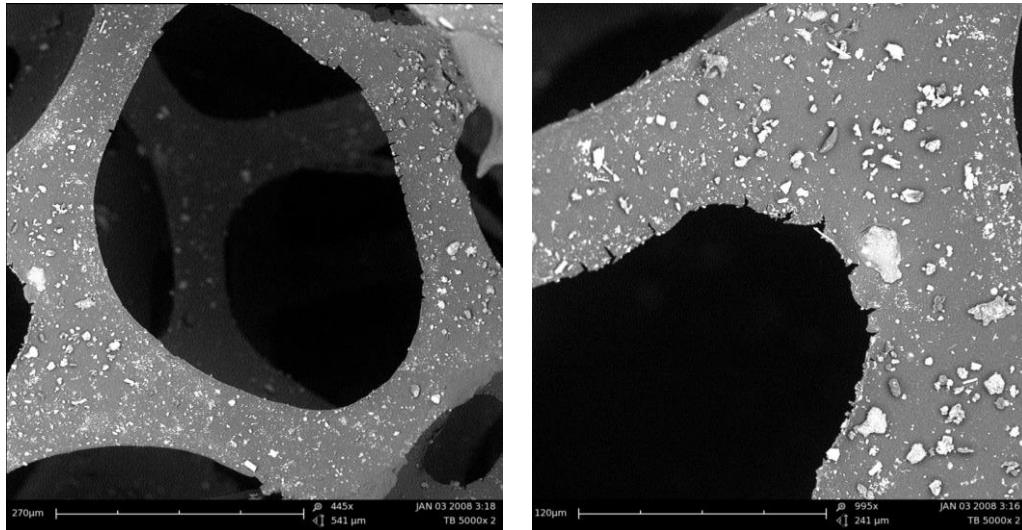


Figura 18. Micrografía SEM Espuma A.

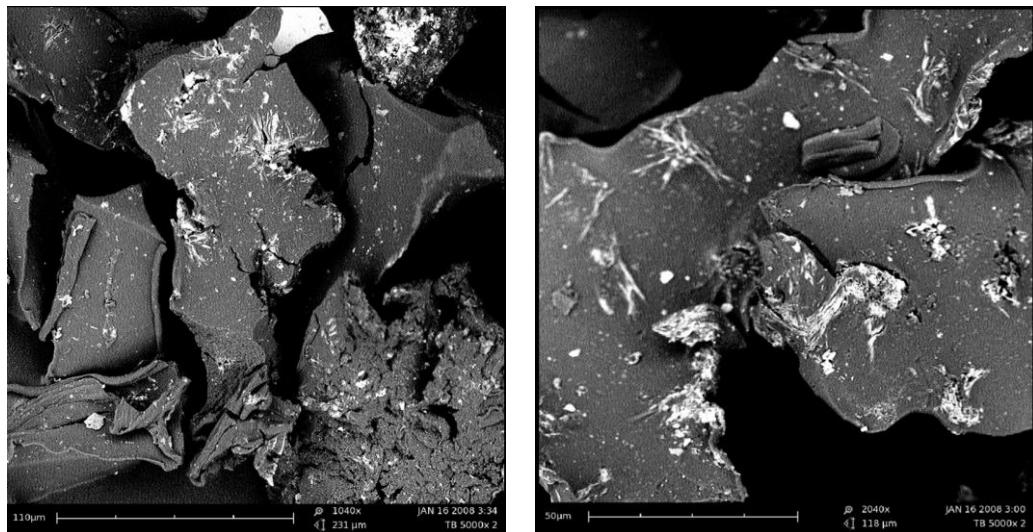


Figura 19. Micrografía SEM Espuma A sometida a 4 horas a 200°C y biodegradada empleando un consorcio microbiano EDAR. Muestra Prueba 6 (FT1) en Entregable 5.1.

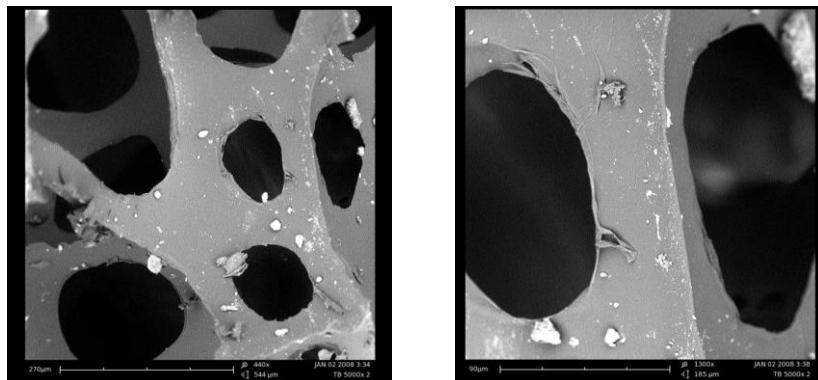


Figura 20. Micrografía SEM Espuma C.

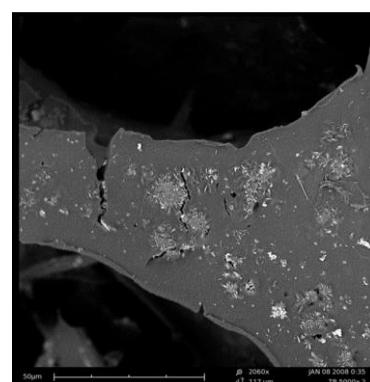
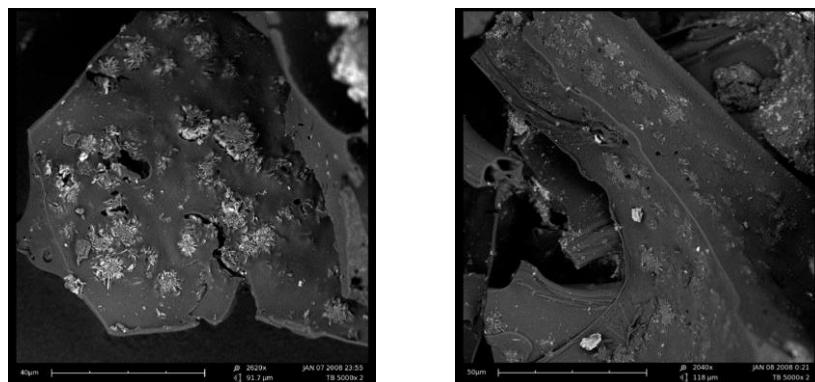


Figura 21. Micrografía SEM Espuma C pretratada térmicamente y biodegradada empleando un consorcio microbiano EDAR en medio enriquecido. Muestra Prueba 6 (FT3) en Entregable 5.1.

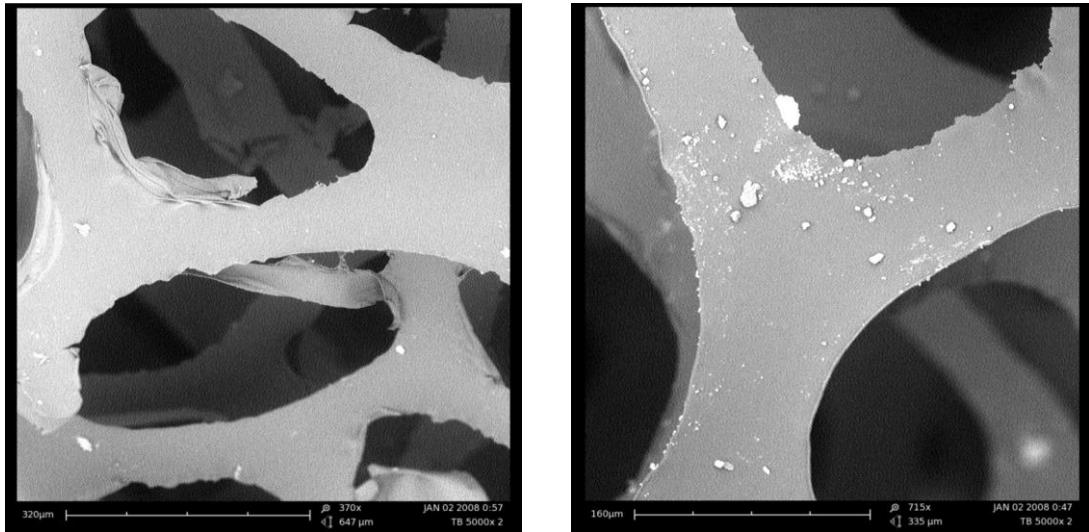


Figura 22. Micrografía SEM espuma Empresa B..

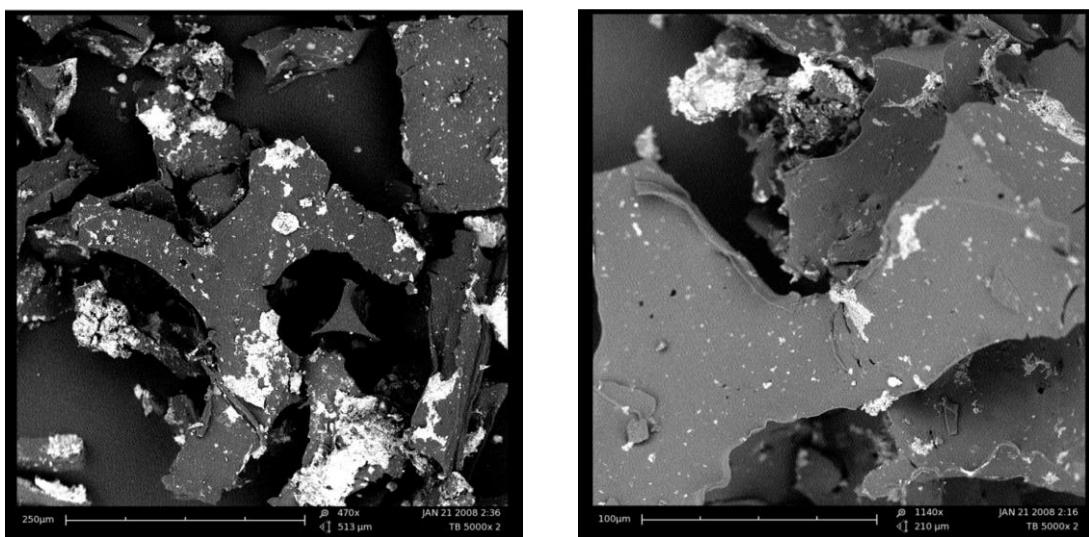


Figura 23. Micrografía SEM Espuma B pretratada térmicamente y biodegradada empleando consorcio microbiano EDAR, Prueba 6 (FT2).

Para las espumas Espuma D y Espuma E no se estudiaron sus micrografías debido a que se obtuvieron menores degradaciones en los ensayos en analizadores respirométricos.

2.3.3. Caracterización de ensayos de espumas de poliuretano en biorreactores piloto.

Las espumas de poliuretano tratadas (Espuma C) en biorreactores piloto fueron caracterizadas mediante análisis químicos, físicos y de imagen. Por una parte, se estudió la espuma biodegradada mediante el Proceso de biodegradación 1, referenciada como

C190-R1, y, por otra parte, la espuma biodegradada mediante el Proceso de biodegradación 2, referenciada como C190-R2 dando lugar a los siguientes resultados:

- Del **análisis químico de espectroscopía infrarroja (FTIR)** en equipo PerkinElmer se evidencian cambios en los grupos funcionales que forman las espumas de poliuretano, pudiendo ser una potencial fuente de carbono y nitrógeno para los microorganismos.

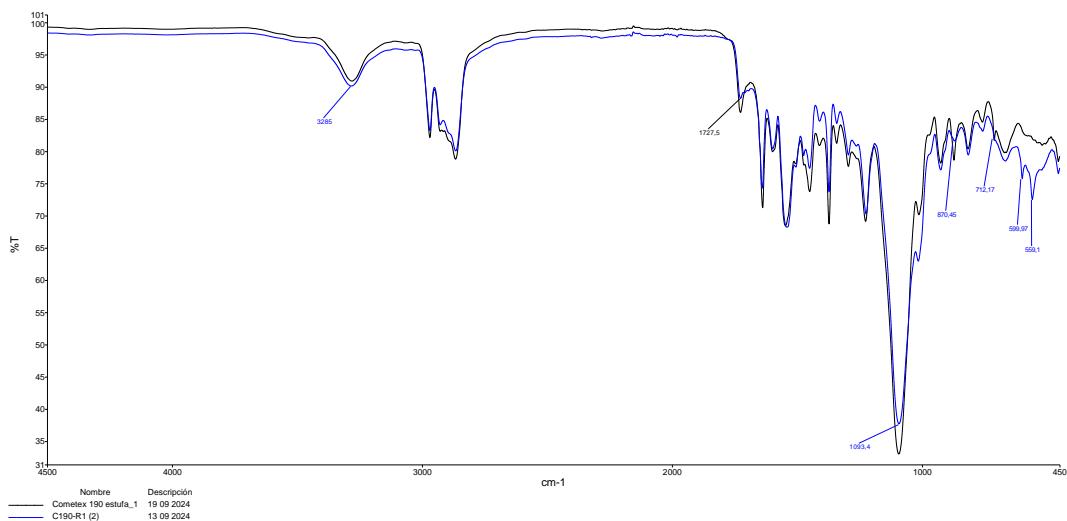


Figura 24. Espectro FTIR de espuma poliuretano flexible Espuma C biodegradada mediante Procedimiento de biodegradación 1 en medio enriquecido de nutrientes y mediante un consorcio microbiano EDAR, C190-R1, (azul) frente a su control (negro).

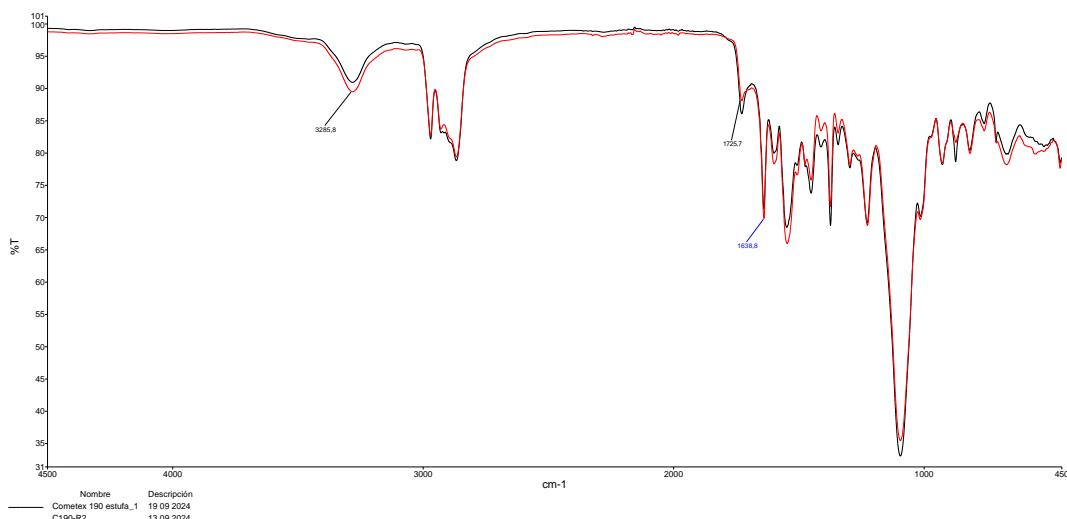


Figura 25. Espectro FTIR de espuma poliuretano flexible Espuma C biodegradada mediante procedimiento de biodegradación 2 en medio mineral y mediante un consorcio bacteriano AIDIMME, C190-R2, (rojo) frente a su control (negro).

En la espuma de poliuretano flexible biodegradada a partir de un consorcio microbiano procedente de una EDAR (C190-R1), durante un periodo de 2 meses en un sistema de biodegradación piloto, se observó la presencia de un aumento de grupos amina N-H y/o alcohol O-H (3288,2 cm⁻¹) en comparación con la muestra no biodegradada inicial, así como una mayor intensidad en otros picos también asignables a grupos C-N (1640cm⁻¹). También se observó una clara disminución en los grupos carbonilo C=O (1727 cm⁻¹) del enlace éster presente en el uretano además de una reducción en cadenas alifáticas C-C (1451 cm⁻¹) y de los grupos C-O-C (1093 cm⁻¹). La disminución en los picos (871 cm⁻¹ y 712 cm⁻¹) también siguieren cambios en grupos C-H, lo que podría relacionarse con el aprovechamiento del carbono por los microorganismos.

En cuanto a la espuma de poliuretano flexible biodegradada a partir de un consorcio bacteriano AIDIMME (C190-R2), el espectro sugiere cambios estructurales muy similares a los comentados en la biodegradación producida por el consorcio microbiano EDAR.

Por lo que respecta al **análisis químico** mediante **técnicas cromatográficas** de los medios de cultivo obtenidos tras un proceso de biodegradación de dos meses, se analizaron para identificar los metabolitos lixiviados y estudiar las posibles estructuras monoméricas liberadas que pudieran tener lixiviadas que contengan o posean interés industrial. Este análisis busca evaluar si estos monómeros son reutilizables en la fabricación de nuevos productos de poliuretano, contribuyendo así a un modelo de reciclaje más sostenible. Los medios de cultivo, por una parte, el obtenido en el proceso de biodegradación 1 (R1), y, por otra parte, el proceso de biodegradación 2 (R2) fueron analizados mediante las técnicas de análisis CG-MS y HPLC-MS.

Mediante HPLC-MS sí se identificó el compuesto 1,1,1-Tris(hidroximetil)propano en una cantidad de 0,08 ppm en la muestra R1A (medio de cultivo del proceso de biodegradación 1 a partir de un consorcio de microorganismos EDAR) y de 0,46 ppm en la muestra R2A derivatizada (medio de cultivo del proceso de biodegradación 2 a partir de un consorcio de bacterias AIDIMME).

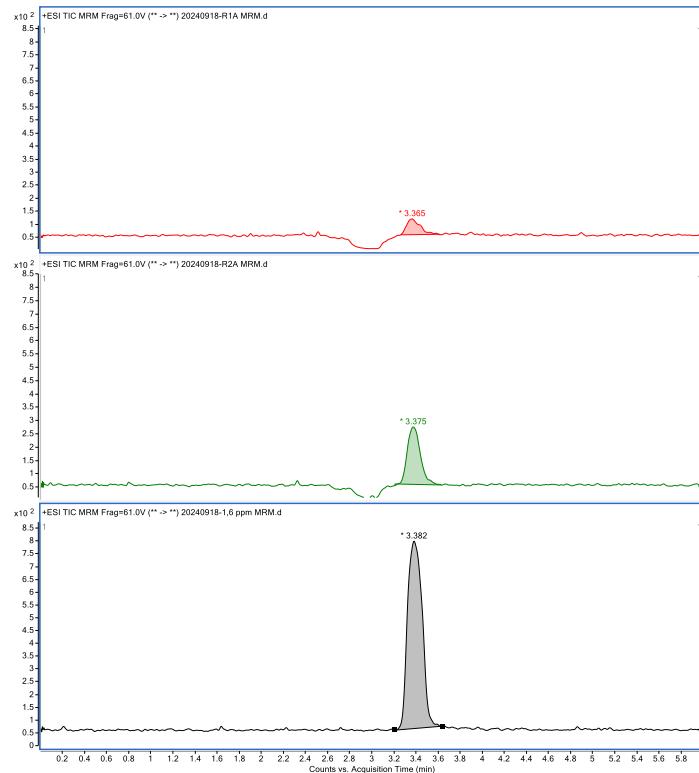


Figura 26. Cromatogramas HPLC-MS de las muestras R1A derivatizada (arriba), R2A derivatizada (centro) y patrón (abajo).

Mediante cromatografía de gases CG-MS se realizó un barrido con las muestras preparadas identificando el compuesto 4-Dietilaminofenil isotiocianato.

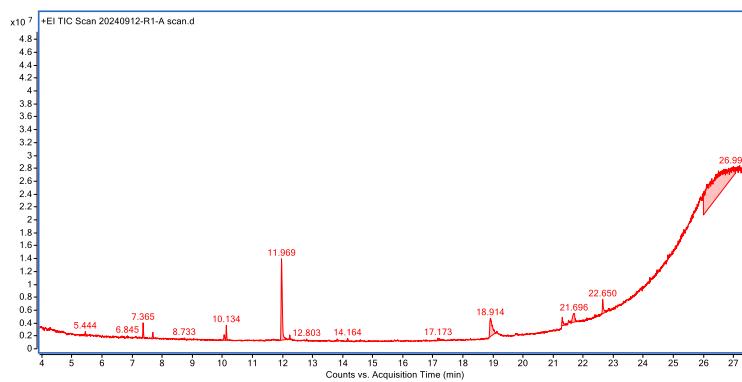


Figura 27. Cromatogramas GS-MS de las muestras R1A.

- El **análisis de imagen** mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) reveló que mediante el Proceso de biodegradación 1 (a partir de un consorcio microbiano EDAR), las espumas de poliuretano mostraron superficies irregulares, celdas con

bordes dentados, superficies con pequeños agujeros y cavidades lo que sugiere la actividad poliuretolítica de los microorganismos.

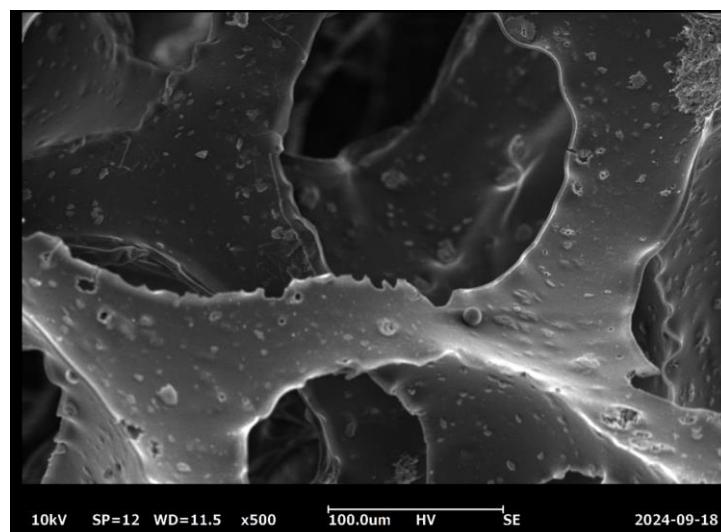
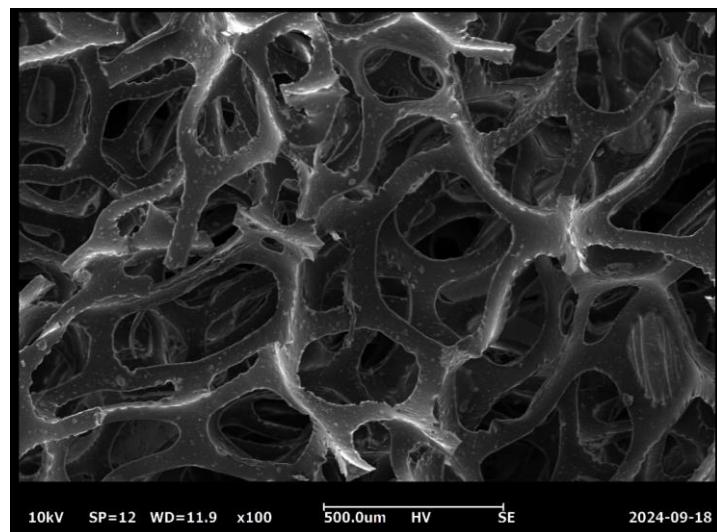


Figura 28. Micrografía SEM espuma flexible poliuretano C190-R1 en Entregable 5.1.

Mediante el Proceso de biodegradación 2 (a partir de un consorcio bacteriano AIDIMME), las espumas de poliuretano con formación notable de films que cubren alguna de las celdas de la estructura y pequeños agujeros aislados en la superficie.

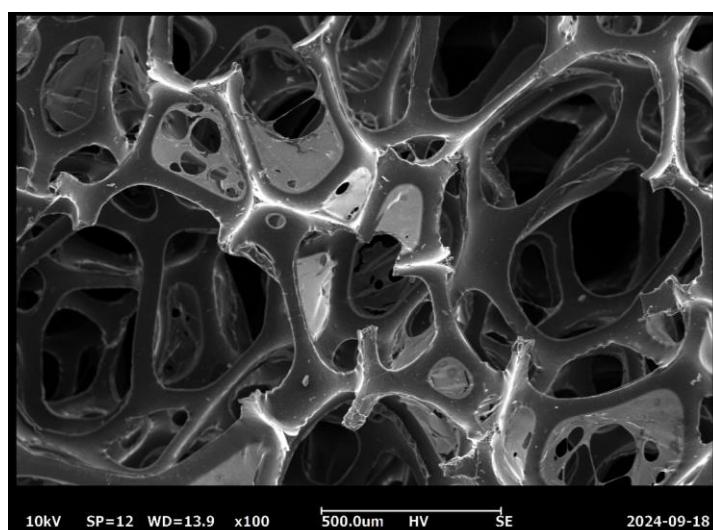
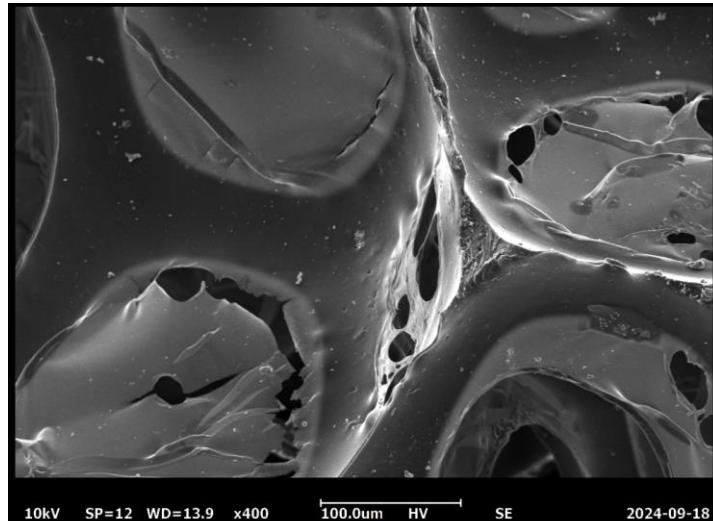


Figura 29. Micrografía SEM espuma flexible poliuretano C190-R2 en Entregable 5.1.

- En cuanto al análisis **físico-mecánico**. En este apartado se recogen los resultados de los ensayos físicos de determinación de la densidad, fuerza/deformación en compresión, deformación remanente y resistencia al desgarro realizados espumas de poliuretano biodegradadas mediante los Procesos de biodegradación 1 (C190-R1) y el Proceso de biodegradación 2 (C190-R2). Estas muestras se ensayaron junto con una serie de controles, tales como la espuma inicial, tal cual recibida por la empresa (Control), la espuma tras el pretratamiento térmico (Control C190) y la espuma pretratada térmicamente y sumergida en un medio mineral sin bacterias (Control C190 H₂O*).

Densidad aparente (UNE-EN ISO 845:2010)

Los resultados de la densidad aparente de las espumas Comotex (C190-R1) y (C190-R2) respecto de sus controles, se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 11. Resultados de densidad aparente de las espumas ensayadas en biorreactores piloto respecto de sus controles.

Referencia	Densidad (kg/m ³)				
	Control	Control C190	Control C190 H ₂ O*	C190-R1	C190-R2
Espuma C	25,4 (1,1)	24,8 (0,5)	21,5 (3,8)	26,3 (0,9)	26,2 (1,1)

***Muestras espesor inferior al resto de probetas**

Se observó que en las muestras C190-R1 y C190-R2, las densidades resultaron ligeramente superiores, esto podría explicarse debido a que los espesores en estas dos muestras son ligeramente inferiores a la de sus controles, pudiendo contribuir también la masa retenida de bacterias en el entramado de la estructura de la espuma.

Determinación de la fuerza/deformación en compresión F40 (UNE-EN ISO 3386-1:1998)

Los resultados de la fuerza/deformación en compresión de las espumas Comotex (C190-R1) y (C190-R2) respecto de sus controles, se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 12. Resultados de fuerza/deformación en compresión de las espumas ensayadas en biorreactores piloto respecto de sus controles.

Referencia	F ₄₀ (N)				
	Control	Control C190	Control C190 H ₂ O*	C190-R1	C190-R2
Espuma C	6,47 (0,34)	5,47 (0,31)	6,52	5,55 (0,44)	6,46 (0,4)

Tabla 13. Espesores de las espumas ensayadas en biorreactores piloto respecto de sus controles.

Referencia	Espesor (mm)				
	Control	Control C190	Control C190 H ₂ O*	C190-R1	C190-R2
Espuma C	25,2 (2,3)	15,8 (0,8)	6,9	14,7 (0,6)	9,4 (0,4)

En este ensayo que se evaluó el esfuerzo necesario para producir una compresión del 40% a una velocidad constante de avance de cruceta, no se observaron diferencias significativas respecto de los controles C190 que presentaron tratamiento térmico.

Determinación de la fuerza/deformación en compresión F20 (UNE-EN ISO 3386-1:1998)

Con el objetivo de ver diferencias entre las espumas, se seleccionó también el punto F_{20} , es decir la fuerza necesaria para producir una compresión del 20%.

Tabla 14. Resultados de fuerza/deformación F_{20} en compresión de las espumas ensayadas en biorreactores piloto respecto de sus controles.

Referencia	F_{20} (N)				
	Control	Control C190	Control C190 H_2O^*	C190-R1	C190-R2
Espuma C	5,3 (0,3)	3,7 (0,1)	3,5	3,5 (0,3)	3,5 (0,1)

No se observaron cambios significativos en el esfuerzo necesario para producir una compresión del 20% a una espuma a una velocidad constante sobre la probeta.

Deformación remanente (UNE-EN ISO 1856:2019)

Los resultados de deformación remanente de las espumas Comotex (C190-R1) y (C190-R2) respecto de sus controles, se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 15. Espesor de las probetas tratadas en biorreactores piloto y sus controles para ensayo de deformación remanente.

Referencia	Espesor (mm)									
	Control		Control C190		Control C190 H_2O^*		C190-R1		C190-R2	
Espuma C	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
	25,2 (2,3)	19,5 (1,9)	15,8 (0,8)	10,3 (0,1)	6,9	5,5	14,7 (0,6)	9,8 (0,2)	9,4 (0,4)	7,9 (0,2)

Tabla 16. Resultados de deformación remanente de las espumas ensayadas en biorreactores piloto respecto de sus controles.

Referencia	Deformación remanente, c.s (50%, 72 h, 23ºC) (%)				
	Control	Control C190	Control C190 H ₂ O*	C190-R1	C190-R2
Espuma C	22,6	34,8	20,3	33,3	16,0

Se observó que la densidad remanente es menor en el caso de las espumas biodegradadas mediante el Procedimiento (C190-R2) empleando un consorcio bacteriano AIDIMME, y similar al control en el caso de las espumas de poliuretano biodegradadas mediante el Procedimiento 1 (C190-R1) empleado un consorcio microbiano EDAR.

Resistencia al desgarro (ISO 8067)

El fundamento del ensayo de resistencia al desgarro es la carga máxima (y promedio), para prolongar un corte perpendicular en la dirección paralela a las caras de las probetas expresado en N dividido la anchura de la probeta en N/m.

Tabla 17. Resultados de resistencia al desgarro de las espumas ensayadas en biorreactores piloto respecto de sus controles.

Referencia	Resistencia al desgarro (N)			
	Control	Control C190	C190-R1	C190-R2
Espuma C	8,76	3,79	3,07	2,74

Tabla 18. Resultados de fuerza máxima obtenida en ensayo de resistencia al desgarro de las espumas ensayadas en biorreactores piloto respecto de sus controles.

Referencia	Fuerza máxima (N)			
	Control	Control C190	C190-R1	C190-R2
Espuma C	11,3	5,09	4,49	3,53

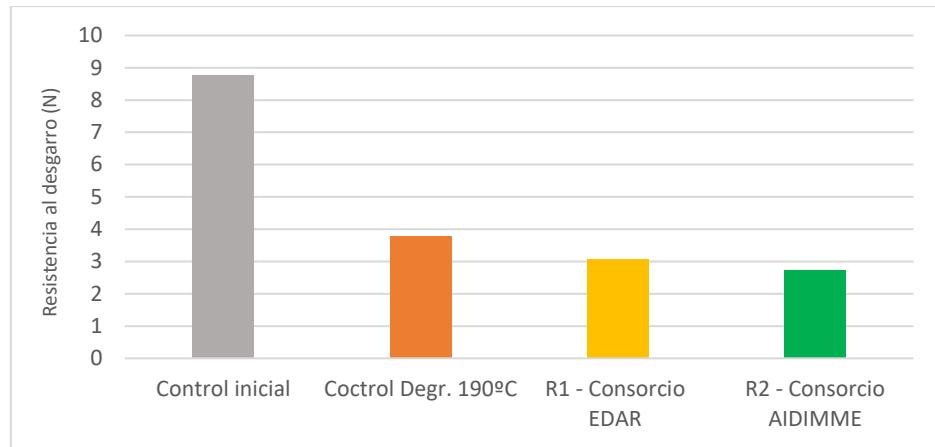


Figura 30. Gráfico de resultados de resistencia al desgarro de las espumas biodegradadas en biorreactor 1 (C190-R1) y en biorreactor 2 (C190-R2).

La resistencia necesaria para romper la espuma es menor en las espumas biodegradadas por ambos procesos de biodegradación respecto de los controles. Este cambio de comportamiento puede ser debido al debilitamiento de los puentes de la estructura tridimensional de las espumas ocasionado por las conducciones, agujeros y bordes de las celdas dentados, observados en las imágenes SEM ocasionados por el ataque de los microorganismos diana.

3. Resumen y conclusiones

- Se ha conseguido con éxito seleccionar microorganismos capaces de degradar espumas de poliuretano, especialmente mediante consorcios microbianos que incluyen a las especies 1 y 7, los cuales mostraron una alta actividad poliuretanolítica. La degradación se vio incrementada al aplicar un pretratamiento térmico a las espumas, que facilita la accesibilidad de los microorganismos a los enlaces químicos del poliuretano.
- El **pretratamiento térmico** demostró ser una optimización de carácter general en el proceso de biodegradación, y fue más efectivo que la exposición de las espumas a la luz UV, incrementando los porcentajes de biodegradación en las muestras tratadas. También se observó que la biodegradación depende del tipo de medio de cultivo, siendo los **medios enriquecidos en nutrientes** los que mejoran la actividad degradadora en algunas espumas.

- Se observa como los valores de biodegradabilidad de algunas espumas estudiadas mediante técnicas respirométricas alcanzan un valor aproximado al IMPRANIL® DLN-SD , compuesto de PU reconocido como biodegradable (por lo que deja de considerarse material plástico). Este efecto se consigue, a través de un tratamiento térmico y fundamentalmente gracias a la inoculación de un consorcio bacteriano definido por determinadas especies bacterianas pertenecientes mayoritariamente a los géneros *Sphingobium* spp., *Terrimicrobium* spp., *Moehibacter* spp. y *Truepera* spp (identificadas mediante metagenómica *shotgun* NGS).
- También se llevó a cabo con éxito dos procedimientos de biodegradación de espumas tratadas térmicamente en **biorreactores piloto**, con probetas de tamaño (5,0 x 5,0 x 2,5 cm). El primero de ellos, empleando un **consorcio de microorganismos** procedentes de una **EDAR**, y un segundo empleando un **consorcio de bacterias AIDIMME**, seleccionadas, aisladas e identificadas (mediante metagenómica *barcoding* y *shotgun*) de los estudios llevados a cabo a nivel de laboratorio.
- El **análisis de imagen** muestra **estructuras tridimensionales** del poliuretano **alteradas**, con superficies irregulares, cracking, bordes de las celdas con formas dentadas, pequeños agujeros y cavidades lo que sugiere la **actividad poliuretanolítica** de los microorganismos.
- La **caracterización química** mediante espectroscopía FTIR de los materiales tratados mostró la **rotura** principalmente de los **enlaces éster** del poliuretano, evidenciando el aprovechamiento de los grupos funcionales como fuente de carbono y nitrógeno para los microorganismos.

A través de metodologías cromatográficas, se logró caracterizar metabolitos presentes en los medios de cultivo generados durante los ensayos a escala piloto en biorreactores, identificando **compuestos de interés para la industria química**. Estos fueron 4-Dietilaminofenil isotiocianato y 1,1,1Tris(hidroximetil)propano, compuestos que se emplean como reactivo para análisis químicos o como materia prima en la manufacturación de polímeros tipo poliuretanos y poliésteres.

- De los ensayos físicos se determinó que la **resistencia al desgarro** necesaria para romper la espuma fue **inferior en las espumas biodegradadas** mediante ambos procesos a escala piloto en comparación con los grupos de control. Este cambio de comportamiento pudo ser debido al debilitamiento de los puentes de la estructura tridimensional de las espumas ocasionado por las alteraciones observadas en las micrografías en SEM (conducciones, pequeños agujeros, cracking, bordes dentados, superficies rugosas).

Se concluye que la biodegradación de los residuos plásticos derivados del poliuretano, generados en el sector del mueble de la Comunitat Valenciana, es posible mediante la utilización de microorganismos cuya degradación de poliuretano ha sido previamente estudiada. Este hallazgo representa una oportunidad significativa para la gestión de estos residuos, promoviendo un enfoque más sostenible y económico en comparación con los métodos convencionales de incineración o disposición en vertederos. La implementación a escala piloto se ha conseguido mediante procesos estables durante dos meses de seguimiento.

Para futuras investigaciones, será necesario optimizar las condiciones experimentales, estudiar otras composiciones de medios de cultivo y explorar la sinergia entre consorcios bacterianos para aumentar los niveles de biodegradación, especialmente en espumas con menor respuesta en las pruebas realizadas.

Con la colaboración de: _____



AIDIMME

INSTITUTO TECNOLÓGICO

Domicilio fiscal —
C/ Benjamín Franklin 13. (Parque Tecnológico)
46980 Paterna. Valencia (España)
Tlf. 961 366 070 | Fax 961 366 185

Domicilio social —
Leonardo Da Vinci, 38 (Parque Tecnológico)
46980 Paterna. Valencia (España)
Tlf. 961 318 559 - Fax 960 915 446

aidimme@aidimme.es
www.aidimme.es