

**CONAMA 2020**

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

# Biodegradabilidad de residuos sólidos: metodología e impacto ambiental



TÍTULO

---



**Autor Principal:** Maria Auset Vallejo (Instituto Químico de Sarriá, Universidad Ramon Llull)

**Otros autores:** Lourdes Margarit Roig (Instituto Químico de Sarriá, Universidad Ramon Llull)

**ÍNDICE**

Resumen.....	2
1. Introducción .....	2
2. Metodología.....	2
Residuos industriales .....	2
Caracterización inicial de los residuos .....	2
Agua de dilución con y sin inóculo.....	2
Aclimatación.....	2
Ensayos de actividad respirométrica .....	2
3. Resultados y discusión .....	3
4. Conclusiones .....	7
5. Bibliografía .....	8

## BIODEGRADABILIDAD DE RESIDUOS SÓLIDOS: METODOLOGÍA E IMPACTO AMBIENTAL

**Palabras clave:** biodegradabilidad, residuo sólido, vertedero, actividad respirométrica, materia orgánica

### RESUMEN

La estabilidad biológica de los residuos sólidos es uno de los principales problemas relacionados con el impacto ambiental de los vertederos y su potencial de emisión a largo plazo. La peligrosidad del vertido de residuos biodegradables es debida a la generación de olores, a la emisión de gases de efecto invernadero, a la contaminación del agua subterránea, al potencial de ignición y a la creación de explosiones. La legislación europea actual (Directiva Europea de Vertidos, EC/99/31) introduce la necesidad de reducir los compuestos orgánicos biodegradables que se depositan en vertederos. Sin embargo, la Directiva no establece parámetros oficiales ni valores límite para definir la estabilidad de los residuos. En España la biodegradabilidad generalmente se evalúa mediante el coeficiente  $DBO_5/DQO$ , midiendo ambos parámetros sobre el lixiviado. La limitación de este parámetro se debe a que no considera la fracción biodegradable no soluble y por tanto puede generar falsos negativos. Para solventar este problema se ha desarrollado un método para determinar la biodegradabilidad de residuos sólidos mediante la medida de su actividad respirométrica ( $AT_4$ ). El consumo de oxígeno acumulado después de 96 h por unidad de materia seca ( $mg O_2 / g MS$ ) ha sido evaluado en el caso de residuos sólidos peligrosos. Se ha estudiado la influencia de la cantidad de muestra analizada y la adición de inóculo microbiano proveniente de depuradora de aguas residuales industriales. Además, se han relacionado los resultados con los parámetros tradicionales de medida de la materia orgánica: ratio  $DBO_5/DQO$ , COD, COT, etc. Se presentan aquí los principales resultados y su relación con el impacto ambiental.

### 1. INTRODUCCIÓN

La estabilidad biológica o biodegradabilidad de los residuos sólidos es uno de los principales aspectos a considerar en relación al potencial de emisión a largo plazo y el impacto ambiental de los vertederos controlados. Según la Norma UNE-CEN/TR 14980: 2009 un material biodegradable se define como un material capaz de experimentar descomposición biológica anaeróbica o aeróbica en las condiciones naturales presentes en la biosfera. Un residuo se considera inestable si contiene una alta proporción de materia biodegradable que permita mantener una alta actividad microbiana. Si el residuo contiene principalmente materia recalcitrante o humus, no será capaz de mantener la actividad microbiana y, por lo tanto, se considerará estable.

Para depositar un residuo en un vertedero controlado es necesario que el material haya alcanzado un alto nivel de estabilidad para reducir su impacto medioambiental (generación de olor, autocombustión, producción de biogás, generación de lixiviados, emisión de compuestos orgánicos volátiles, presencia de vectores -insectos, roedores, aves- y recrecimiento de patógenos). Por lo tanto, es necesario establecer una medida que permita evaluar la estabilidad biológica del residuo.

En el campo de las aguas residuales, la utilización del parámetro demanda biológica de oxígeno a 5 días ( $DBO_5$ ) está totalmente aceptada para la determinación de la materia orgánica biodegradable. En el campo de los residuos sólidos, el parámetro que se utiliza para evaluar la

biodegradabilidad es la relación entre la demanda biológica de oxígeno a 5 días y la demanda química de oxígeno (DBO<sub>5</sub> / DQO) del lixiviado del residuo. Sin embargo, este parámetro sólo es representativo de la biodegradabilidad de la parte soluble en agua y, por tanto, no tiene en cuenta otros componentes del residuo como podrían ser aceites, grasas e hidrocarburos, que en su mayor parte quedan retenidos en el residuo sólido.

En la Decisión del Consejo de 19 de diciembre de 2002 por la que se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos, según el artículo 16 y el anexo II de la Directiva 1999/31/CE, no se establece ningún criterio específico para el control de la biodegradabilidad de los residuos, sin embargo, se indica que los Estados miembros podrán establecer criterios adicionales.

Los métodos más utilizados para la determinación de la estabilidad biológica son las técnicas respirométricas, tanto aeróbicas como anaeróbicas, siendo métodos indirectos, sencillos y eficaces para determinar el grado de descomposición de la fracción orgánica de la biomasa.

Las técnicas respirométricas aeróbicas, basadas en el consumo de O<sub>2</sub>, se clasifican en dinámicas y estáticas en función de si son realizadas en ausencia (estática) o presencia (dinámica) de aireación continua (Ponsà et al, 2010). Las ventajas más significativas de las técnicas dinámicas respecto a los métodos estáticos son la reducción de la limitación de transferencia de masa debido al aumento del flujo de oxígeno a través de la fase líquida (en la que el oxígeno es accesible para los microorganismos) así como y la posibilidad de obtener un perfil continuo del consumo de oxígeno o de producción de CO<sub>2</sub> durante la totalidad del proceso de biodegradación. No obstante, los índices respirométricos estáticos se pueden utilizar como indicadores o como una primera aproximación a la actividad biológica potencial de la materia orgánica, siendo de gran utilidad debido a su rápida determinación en las instalaciones de tratamiento de residuos, donde no es posible aplicar metodologías largas y complejas.

Los diferentes índices y métodos de técnicas respirométricas aeróbicas referenciados en la literatura se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Índices respirométricos aerobios y métodos.

Índice	Nombre	Tipo	Norma	Unidades	Cond. Ensayo					Ref.
					Estado	Humedad	Inóculo	Tiempo	Temp.	
O <sub>2</sub> uptake	O <sub>2</sub> uptake	E	-	g O <sub>2</sub> kg OM <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>	Sólido	50-55 % p/p	No	16h incubación+1 ensayo	37°C	Iannotti et al, 1993
SOUR	Specific O <sub>2</sub> uptake rate	E	-	g O <sub>2</sub> kg OM <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>	Líquido	En suspensión	No	60 h (máx)	30°C	Lasaridi and Stentiford,
OD <sub>20</sub>	Cumulative O <sub>2</sub> uptake during 20 h	E	-	g O <sub>2</sub> kg OM <sup>-1</sup>	Líquido	En suspensión	No	20 h	30°C	1998
SOUR	Specific O <sub>2</sub> uptake rate	E	-	g O <sub>2</sub> kg OM <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>	Sólido	-	No	5-6 h	30°C	
DRI	Dynamic respirometric index	D	-	g O <sub>2</sub> kg OM <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>	Sólido	Ajuste 75% cap. retención	No	4 d registro 24h	Autocalen.	
SRI	Static respirometric index	E	-	g O <sub>2</sub> kg OM <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>	Sólido	Ajuste 750 g/kg cap.retención	No	3 h	Autocalen.	Adani et al.
RDRI	Real DRI	D	-	g O <sub>2</sub> kg OM <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>	Sólido	Sin ajuste	No	4 d registro 24h	Autocalen.	2001
PDRI	Potencial DRI	D	-	g O <sub>2</sub> kg OM <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>	Sólido	Humedad óptima	No	4 d registro 24h	Autocalen.	
AT <sub>4</sub> Sapromat	Respiration Activity Cumulative O <sub>2</sub> uptake 4 d	E	-	g O <sub>2</sub> kg OM <sup>-1</sup>	Sólido	Saturación	No	4 d	20°C	Binner and Zach, 1999
AT <sub>4</sub>	Respiration Activity Cumulative O <sub>2</sub> uptake 4 d	E	-	mg O <sub>2</sub> g DM <sup>-1</sup>	Sólido	Saturación	Si	4 d + fase de latencia	20°C	Federal Government of Germany (2001).
Rl <sub>T</sub>	Respiration index O <sub>2</sub> uptake rate in situ T composter	E	-	g O <sub>2</sub> kg OM <sup>-1</sup>	Sólido	40-55 %	No	4 h incubación+ 1,5 h ensayo	Proceso	Barrena et al.
Rl <sub>37</sub>	Respiration Index O <sub>2</sub> uptake rate	E	-	g O <sub>2</sub> kg OM <sup>-1</sup>	Sólido	40-55 %	No	4 h incubación+ 1,5 h ensayo	37°C	2005
-	CO <sub>2</sub> evolved 4 d	D	-	mg CO <sub>2</sub> ·g VS <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup>	Sólido	Ajuste "First test"	No	3d + 4d	30°C	Llewelyn, 2005
DR <sub>4</sub>	Cumulative O <sub>2</sub> uptake 4 d	D	-	mg O <sub>2</sub> g OM <sup>-1</sup> o mg O <sub>2</sub> g OM <sup>-1</sup>	Sólido	50 %	Si	4 d	35°C	Godley et al, 2007
AT <sub>4</sub> Sapromat	Respiration Activity Consum d' O <sub>2</sub> acumulat 4 d	E	OE-NORM S2027-1 (2004)	mg O <sub>2</sub> g DM <sup>-1</sup>	Sólido	Ajuste método filtro	No	4 d + fase de latencia	20°C	Binner and Lechner, 2011
AT <sub>4</sub> OxiTop	Respiration Activity Consum d' O <sub>2</sub> acumulat 4 d	E	OE-NORM S2027-1 (2004)	mg O <sub>2</sub> g OM <sup>-1</sup>	Sólido	Ajuste método filtro	No	4 d + fase de latencia	20°C	
OUR	Oxygen uptake rate	E	-	mg O <sub>2</sub> g VS <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup>		-	No	2d + 2d	30°C	Malińska, 2016
DBO <sub>28</sub>	Biological Oxygen Demand 28 d	E	ISO 10707 (1994)	g O <sub>2</sub> ·kg <sup>-1</sup> ·TS	Líquido	Suspensión	Si	28 d	30°C	Bayard et al, 2018
SOUR	Specific O <sub>2</sub> uptake rate	E	-	mg O <sub>2</sub> ·kg <sup>-1</sup> ·VS h <sup>-1</sup>	Líquido	Suspensión	No			
LCRI <sub>7d</sub>	Liquid cumulative respiration index 7 d	E	-	mg O <sub>2</sub> ·kg <sup>-1</sup> ·VS·	Líquido	Suspensión	No	7 d	35°C	Evangelou et al, 2018

E=estático; D= Dinámico



Una lista no exhaustiva de los diferentes índices y métodos de técnicas respirométricas anaeróbicas encontrados en la literatura se presentan a la tabla 2.

**Tabla 2.** Índices respirométricos anaerobios y métodos

Índice	Método	Norma	Temperatura	Tiempo	Inóculo	Unidades	Referencia
GB <sub>21</sub>	Test de fermentación	-	35°C	21 d	si	mg/kg DS NI/kg DS	Binner and Zach, 1999
BM <sub>100</sub>	BM <sub>100</sub>	-	35°C	>100 d	si	NI/kg LOI l/kg LOI	Godley et al, 2007
BMP <sub>60</sub>	BM <sub>60</sub>	ISO 11734 (1995)	35°C	60 d	si	L·kg <sub>TS</sub> <sup>-1</sup>	Bayard et al, 2018

El estudio realizado por la *European Union Network for the Implementation and Enforcement of Environmental Law* (IMPEL, 2017) cita como parámetros para la aceptación de un residuo en vertedero, los índices de respiración DRI, AT<sub>4</sub> y SOUR, así como parámetros que miden la producción de biometano BMP y GB<sub>21</sub>. En concreto se indica que si el DRI de residuos industriales biodegradables (como los lodos de depuradora) es superior a 1000 mg O<sub>2</sub> · kg SV<sup>-1</sup> · h<sup>-1</sup> estos residuos deben tratarse antes de su depósito en vertedero.

Algunos países europeos han adoptado técnicas respirométricas y ensayos de actividad anaeróbica para caracterizar sus residuos sólidos. En este sentido tanto Irlanda (EPA Irland, 2009), Alemania (German Federal Government, 2001), Austria (OE-NORM S2027-4, 2012), Polonia (JĘDRZAK A., SZPADT R. 2008) como Eslovenia (Republic of Slovenia. Decree on Treatment of Biodegradable Waste, 2001) establecen el parámetro AT<sub>4</sub> para indicar el grado de estabilización de un residuo, definiendo límites para su depósito en vertedero. Así mismo, la Unión Europea, en su propuesta de borrador sobre tratamientos biológicos de residuos, propone la medida respirométrica AT<sub>4</sub>. Paralelamente Alemania y Austria también establecen ensayos anaeróbicos a 21 días (Tabla 3).

**Tabla 3.** Valores de admisión para los parámetros AT<sub>4</sub> y GB<sub>21</sub> establecidos en las diferentes legislaciones europeas.

País UE	Método de caracterización del residuo	Valor de admisión	Norma
Irlanda	Actividad respiratoria AT <sub>4</sub>	< 7 mg O <sub>2</sub> /g MS	EPA Irland, 2009
Alemania	Biodegradabilidad de residuos secos determinada como actividad aeróbica (AT <sub>4</sub> )	< 5 mg O <sub>2</sub> /g MS	German Federal Government, 2001
	Tasa de producción de gas determinada por ensayo de fermentación (GB <sub>21</sub> )	< 20 NL/g MS	
Austria	Biodegradabilidad de residuos secos determinada como actividad aeróbica (AT <sub>4</sub> )	< 7 mg O <sub>2</sub> /g MS	OE-NORM S2027-4, 2012
	Tasa de producción de gas determinada por ensayo de fermentación (GB <sub>21</sub> )	< 20 NL/g MS	
Eslovenia	Actividad respiratoria AT <sub>4</sub>	< 10 mg O <sub>2</sub> /g MS	Republic of Slovenia. Decree on Treatment of Biodegradable Waste, 2001
Polonia	Actividad respiratoria AT <sub>4</sub>	< 10 mg O <sub>2</sub> /g MS	JĘDRCZAK A., SZPADT R. 2008
European Union	Actividad respiratoria AT <sub>4</sub>	< 10 mg O <sub>2</sub> /g MS	Biological Treatment of Biowaste, 2nd Draft, 2001

En Italia se utiliza el índice de respiración dinámica (DRI) (Adani et al, 2001) y el Reino Unido utiliza con mayor frecuencia la tasa de consumo de oxígeno específico (SOUR) (Godley et al., 2007).

En el presente estudio se ha desarrollado una metodología para determinar la cantidad de materia orgánica biodegradable de un residuo sólido mediante el sistema OxiTop<sup>®</sup> Control a partir de la determinación de la actividad respirométrica aerobia en fase sólida (AT<sub>4</sub>). Se decide adoptar este parámetro por ser el más citado en la legislación europea, además de por su metodología sencilla y por su relativa corta duración.

La respiración está directamente relacionada con la actividad metabólica de una población microbiana. Los microorganismos respiran a tasas más altas en presencia de grandes cantidades de materia orgánica biodisponible, mientras que la tasa de respiración es más lenta si este tipo de material es escaso. El procedimiento se basa en la medida manométrica del consumo de oxígeno necesario para degradar la materia orgánica biodegradable presente en la muestra. Dado que se trata de muestras sólidas con muy baja actividad respiratoria la medida se realiza en un recipiente hermético de volumen reducido de un litro con una cantidad significativa de muestra a temperatura constante. Se ha estudiado la influencia de la cantidad de muestra analizada y la adición de inóculo microbiano proveniente de depuradora de aguas residuales industriales. Se ha relacionado, además, la actividad respirométrica con los parámetros tradicionales de determinación de la materia orgánica.

## 2. METODOLOGÍA

### Residuos industriales

Se analizaron muestras de residuos sólidos industriales provenientes de vertederos peligrosos. Entre los residuos tratados se incluyen cenizas de incineración de residuos urbanos, residuos del tratamiento de gases, inertizados de planta de tratamiento físico-químico y escorias de procesos metalúrgicos. Las muestras se trituraron hasta tamaño < 10 mm y se homogeneizaron mediante mezcla manual.

### Caracterización inicial de los residuos

La caracterización inicial de los residuos incluyó analíticas de densidad, humedad y contenido de materia orgánica (LOI), pH, carbono orgánico total (TOC), carbono orgánico disuelto (COD), DQO, DBO<sub>5</sub> y capacidad de retención de agua. El contenido de humedad se midió mediante diferencia de peso a 100 °C hasta peso constante (EN 14346). El contenido de LOI en materia orgánica o sólidos volátiles se cuantificó mediante la pérdida por ignición de muestras secas y molidas a 550 °C durante 2 h (EN 15169). El pH se midió sobre lixiviado obtenido según EN 12457/4. El TOC se midió de acuerdo con EN 13137 y el COD según EN 13370. Para la determinación de la capacidad de retención de agua se siguió la norma austríaca OE-NORM S2027-4.

### Agua de dilución con y sin inóculo

Para la obtención del agua de dilución se preparó una solución mezclando KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> al 0,85%, K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> al 2,2%, Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> al 2,7%, NH<sub>4</sub>Cl al 0,17%, MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O al 2,25% y CaCl<sub>2</sub> al 2,75%, FeCl<sub>3</sub> al 0,025% .6H<sub>2</sub>O en agua destilada. Se diluyó 1 ml de esta solución en un litro de agua destilada a la que se le añadieron 20 gotas de alitiourea (5 g/l). La solución se aireó durante una hora a 20° C. La preparación del agua de dilución con inóculo se realiza de la misma manera añadiendo 20 mL del sobrenadante de fangos activos provenientes de una depuradora industrial y enrasando con la solución aireada hasta un volumen final de un litro.

### Aclimatación

Se añadió un volumen de agua de dilución con y sin inóculo a diferentes cantidades de muestra hasta alcanzar la capacidad de retención de agua del material. Tras el ajuste de humedad las muestras se preincubaron en bandejas formando capas de grosor de 1-2 cm a 20 °C durante 5-7 h para aclimatar la comunidad microbiana al residuo.

### Ensayos de actividad respirométrica

El procedimiento para los ensayos respirométricos se basó en gran medida en la norma austríaca (OENORM S 2027-4:2012-06-01) utilizada por numerosos autores (Binner et al., 2012) como norma de referencia para este ensayo. Considerando el bajo contenido en carbono orgánico de los residuos analizados se estudió la influencia del tamaño de muestra y la adición de inóculo bacteriano sobre el residuo.

La actividad respiratoria se determinó con respirómetros manométricos estáticos (OxiTop-C

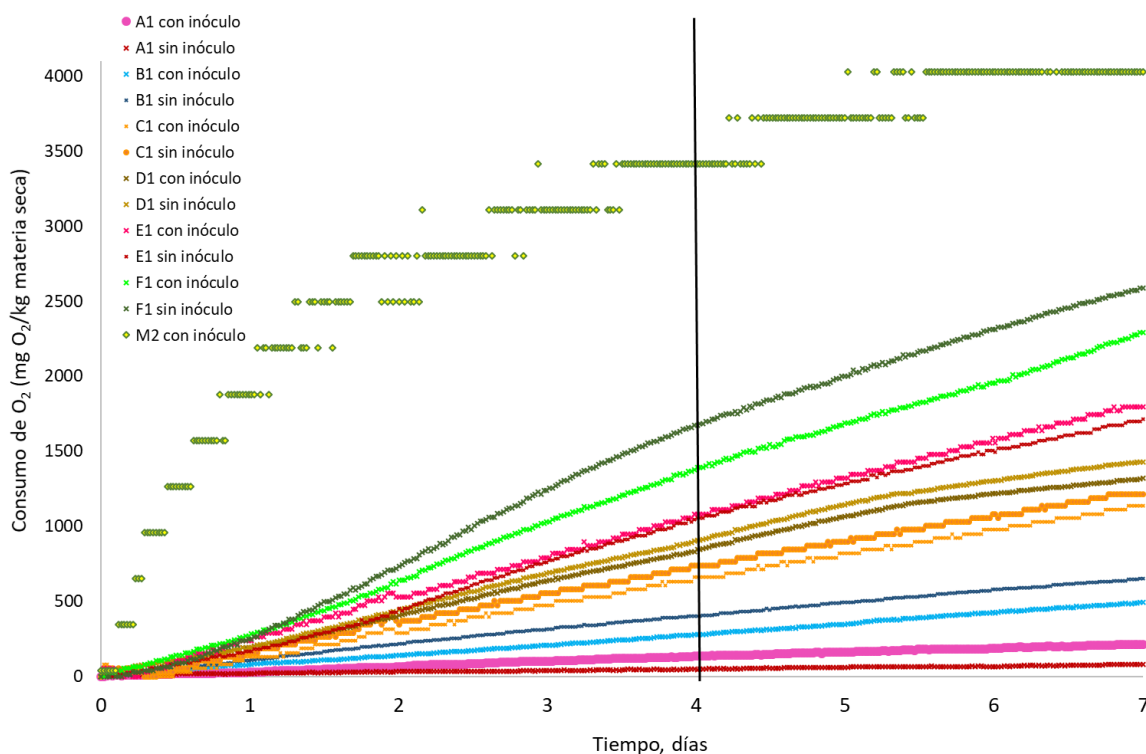
WTW, Weiheim, Alemania OxiTop® System). Cada respirómetro consta de un frasco de vidrio estanco de 960 mL, un sensor de presión, un cabezal para el registro de datos y un depósito para 50 mL de solución 2M de NaOH. Las muestras aclimatadas se colocaron en los frascos herméticamente cerrados y se incubaron durante 7 días a temperatura constante de 20 °C en ausencia de luz. A medida que se consume oxígeno, el CO<sub>2</sub> producido es absorbido por la solución de NaOH, lo que provoca una caída de presión directamente relacionada con el consumo de oxígeno. Los frascos se airearon regularmente desenroscando los cabezales OxiTop®, lo que permite que el aire entre en el espacio de cabeza como resultado de su presión negativa. El objetivo era no llegar nunca al agotamiento completo de oxígeno en el espacio de cabeza del recipiente durante la medida. Se utilizó un controlador (OxiTop OC 110 WTW, Weiheim, Alemania) para recopilar los datos de los registradores del sensor de presión. Se utilizó el software compatible con el equipo (Achat OC, software de comunicación para PC versión 2.03) para descargar los datos del controlador a una hoja de cálculo. El consumo de oxígeno se determinó a partir de la caída de presión, utilizando los principios de la ley de los gases ideales, mediante la siguiente relación:

$$BA = \frac{Mr(O_2)}{R * T} * \frac{V_{fr}}{m_{Bt}} * \Delta p$$

donde *BA* corresponde a la respiración de la muestra sólida en mg O<sub>2</sub>/kg de muestra seca, *M<sub>r</sub>* la masa molar de oxígeno (32.000 mg/mol), *V<sub>FR</sub>* es el volumen libre del recipiente en L, *R* constante de los gases ideales (83,14 L\*mbar \* mol<sup>-1</sup>\*K<sup>-1</sup>), *T* la temperatura de medida en Kelvin (293,15 K), *m<sub>Bt</sub>* la masa de la muestra sólida seca en kg y *Δp* la diferencia de presión obtenida entre el blanco y la muestra.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura 1 muestra la evolución con el tiempo del consumo de oxígeno de diferentes residuos sólidos industriales peligrosos. Los valores del consumo a 4 días (*AT<sub>4</sub>*) de la figura 1 se situaron en un rango entre 4 y 3.500 mg O<sub>2</sub>/kg materia seca.



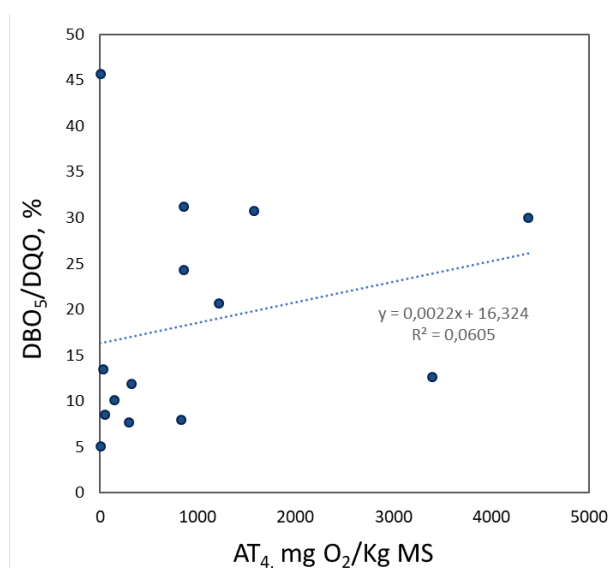
**Fig 1.** Evolución del consumo de oxígeno acumulado en función del tiempo de los residuos sólidos.

Los diversos límites para la estabilidad biológica de un residuo establecidos en los países donde se ha legislado la determinación de la actividad respirométrica  $AT_4$  se muestran en la Tabla 3. Se constata que no hay consenso sobre los valores límites y su consecuente aceptación a vertedero, siendo Alemania la que establece el valor más bajo para la estabilidad de los residuos. Las  $AT_4$  indicadas por Alemania y Austria son inferiores (5.000 y 7.000 mg  $O_2$  / kg materia seca, respectivamente) a la propuesta de borrador de la Unión Europea (10.000 mg  $O_2$  / kg materia seca). En este sentido la Unión Europea declara que: "Estabilización significa la reducción de las propiedades de descomposición del residuo hasta llegar a una actividad respirométrica tras cuatro días ( $AT_4$ ) inferior a 10.000 mg  $O_2$  / kg sobre masa seca (Biological Treatment of Biowaste, 2nd Draft, 2001)". Se concluye que las actividades respiratorias a 4 días de los residuos industriales analizados (Fig. 1) son inferiores a los límites admitidos en los diferentes reglamentos europeos y por tanto considerados estables para depósito en vertedero.

Con la adición de inóculo se pretende facilitar la biodegradabilidad de la materia orgánica de los residuos. Dada su toxicidad los propios microorganismos podrían verse afectados subestimando la medida de materia biodegradable. Sin embargo, los resultados de biodegradabilidad de los residuos estudiados con adición o no de inóculo microbiano, proveniente de fangos de depuradora industrial, indican que no existe diferencia entre resultados utilizando o no inóculo con un intervalo de confianza del 95%. Respecto al estudio de la cantidad de muestra no hay evidencia estadística que este parámetro influya en el resultado con un intervalo de confianza del 95%.

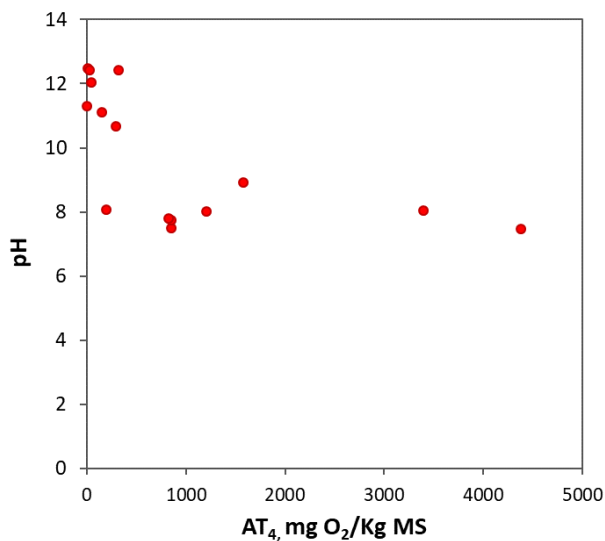
En España la biodegradabilidad de los residuos sólidos se evalúa, generalmente, mediante el coeficiente  $DBO_5/DQO$ , admitiendo como límite de estabilidad un valor  $> 50\%$ . La figura 2

presenta la relación entre el coeficiente  $DBO_5/DQO$  y el consumo de oxígeno a 4 días ( $AT_4$ ) de los residuos estudiados. Ambos parámetros presentan una correlación muy débil ( $R^2=0,0605$ ). Por ejemplo, la gráfica revela que un residuo con un coeficiente  $DBO_5/DQO$  cercano al 50% (límite de estabilidad) le corresponde el mínimo valor de  $AT_4$  determinado, correspondiente a 4  $mg\ O_2/kg\ MS$ . Esta baja correlación se puede explicar porque el análisis de  $DBO_5$  y  $DQO$  se realiza sobre el lixiviado del residuo sólido. Para la obtención de este lixiviado sólo una parte de los compuestos orgánicos es movilizada de la fase sólida a la fase líquida. Nuestros resultados evidencian que el lixiviado no sería representativo de la totalidad de compuestos orgánicos inicialmente presentes en el residuo, representando sólo la fracción orgánica hidrosoluble fácilmente movilizable. Por tanto, los resultados de la estabilización o biodegradación obtenidos a partir del coeficiente  $DBO_5/DQO$  pueden ser muy diferentes a la del residuo sólido real.



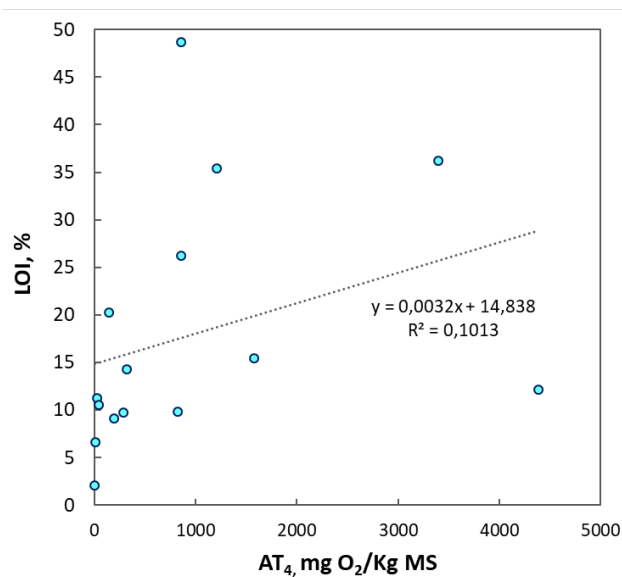
**Fig 2.** Relación entre consumo de oxígeno a los 4 días ( $AT_4$ ) y el coeficiente  $DBO_5/DQO$ .

La figura 3 presenta los pH de las muestras y sus respectivos consumos de oxígeno a 4 días. Los valores de pH se encuentran en un rango de 7,3 a 12,5. En este gráfico se observa que las actividades respirométricas  $AT_4$  más bajas corresponden a las muestras alcalinas (>10) mientras que las  $AT_4$  más altas son obtenidas en residuos con pH de 8 o cercanos a la neutralidad.



**Fig 3.** Relación entre consumo de oxígeno a los 4 días (AT<sub>4</sub>) y pH.

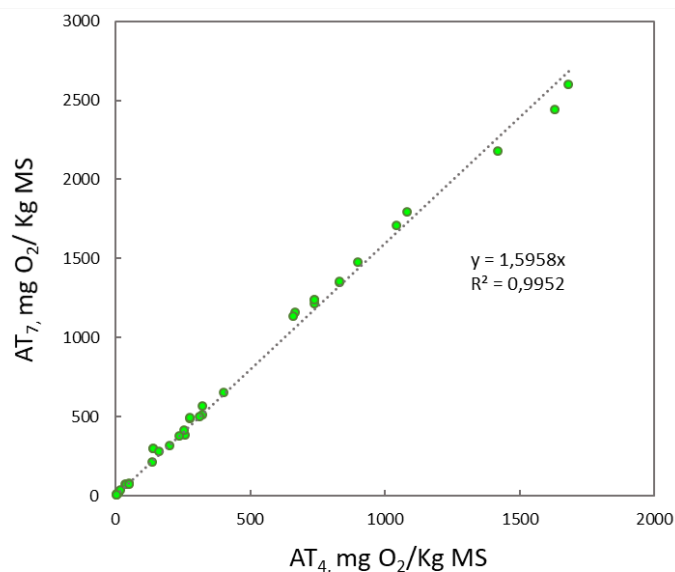
La pérdida de peso por ignición o calcinación (LOI) es un método para caracterizar el contenido orgánico de los residuos sólidos. La figura 4 relaciona los valores de LOI de los residuos con sus respectivas biodegradabilidades (AT<sub>4</sub>). Se observa que no hay tendencia general que relacione la AT<sub>4</sub> con la LOI ( $R^2=0,1013$ ). Otros estudios (Barrena et al, 2009, Aspray et al., 2015) tampoco encontraron correlaciones significativas entre la LOI y los índices de respiración. Además, Bayard et al., 2018 confirmaron que ni el contenido en materia orgánica ni el contenido en celulosa y hemicelulosa se correlacionaban con los resultados de biodegradabilidad a través de la actividad respiratoria. Es decir, el contenido de materia orgánica por sí solo no puede predecir adecuadamente la biodegradabilidad, ya que no distingue entre materia orgánica fácilmente biodegradable y no biodegradable. Esta afirmación concuerda con los resultados de Evangelou et al., 2016, los cuales también realizaron medidas de actividad respiratoria estática en fase sólida.



**Fig 4.** Relación entre el consumo de oxígeno a los 4 días (AT<sub>4</sub>) y la pérdida de peso por

ignición (LOI) de los residuos estudiados.

La actividad respiratoria de cada residuo se ha determinado a los 4 días ( $AT_4$ ) y 7 días ( $AT_7$ ). La figura 5 presenta la relación de  $AT_4$  (eje abscisas) y  $AT_7$  (eje ordenadas). Se constata que los resultados de ambos ensayos se correlacionan positivamente, con un coeficiente de correlación de  $R^2 = 0,99$ . Como resultado de esta relación se puede confirmar que el ensayo a 4 días representa una duración adecuada para obtener un resultado de consumo de oxígeno representativo.



**Fig 5.** Relación entre consumo de oxígeno a 4 días ( $AT_4$ ) y 7 días ( $AT_7$ ).

Los vertederos tienen su parte de responsabilidad en el calentamiento global del planeta porque generan y emiten a la atmósfera tanto gas metano ( $CH_4$ ) como dióxido de carbono ( $CO_2$ ), dos de los gases causantes de la subida de temperatura del planeta y del cambio climático.

El control de la biodegradabilidad de los residuos sólidos es un punto importante en la lucha por mitigar el cambio climático por el papel que juega en la reducción de gases de efecto invernadero. Los residuos peligrosos analizados en este estudio se consideran estables y por tanto seguros a nivel del impacto ambiental por su bajo potencial de biodegradabilidad y de generación de gases.

#### 4. CONCLUSIONES

En el presente estudio se ha desarrollado una metodología para determinar la cantidad de materia orgánica biodegradable de un residuo mediante la determinación de la actividad respirométrica aerobia en fase sólida ( $AT_4$ ). Los resultados del estudio establecen que ni el tamaño de muestra ni la adición de inóculo microbiano parecen influir en la medida de la biodegradabilidad. Referente al coeficiente  $DBO_5/DQO$  determinado sobre el lixiviado, y comúnmente utilizado, parece no ser representativo de la biodegradabilidad de un residuo sólido real debido a que sólo una parte de los compuestos orgánicos biodegradables son movilizados de la fase sólida a la fase líquida. Por otra parte, 4 días de ensayo respirométrico representa una duración apropiada para obtener un resultado de consumo de oxígeno



representativo. El método respirométrico aquí presentado es un método adecuado para medir la estabilidad biológica de residuos sólidos previo depósito en vertedero, respetando las características de matriz sólida del sustrato, junto con condiciones controladas de temperatura y humedad. Por otro lado, los residuos peligrosos analizados en este estudio se consideran estables y por tanto seguros a nivel del impacto ambiental por su bajo potencial de biodegradabilidad y de generación de gases.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- Adani F, Lozzi P, Genevini P. (2001). Determination of Biological Stability by Oxygen Uptake on Municipal Solid Waste and Derived Products. *Compost Sci Util.*;9(2):163-178.
- Aspray, T.J.; Dimambro, M.E.; Wallace, P.; Howell, G.; Frederickson, J. (2019). Static, dynamic and inoculum augmented respiration based test assessment for determining in-vessel compost stability. *Waste Management.*, 42, 3–9. doi: 10.1016/j.wasman.2015.04.027.
- Barrena, R.; d'Imporzano, G.; Ponsa, S.; Gea, T.; Artola, A.; Vazquez, F.; Sánchez, A.; Adani, F. (2009). In search of a reliable technique for the determination of the biological stability of the organic matter in the mechanical-biological treated waste. *J. Hazard. Mater.*, 162, 1065–1072.
- Barrena, Raquel VF, Gordillo MAG, Gea T, Sanchez A. (2005). Respirometric assays at fixed and process temperatures to monitor composting process. *Bioresour Technol.*96(10):1153-1159.
- Bayard R, Benbelkacem H, Gourdon R, Buffière P. (2018). Characterization of selected municipal solid waste components to estimate their biodegradability. *J Environ Manage.*216:4-12.
- Bayard, R.; Benbelkacem, H.; Gourdon, R.; Buffière, P. (2018) Characterization of selected municipal solid waste components to estimate their biodegradability. *Journal of Environmental Management*, 216 (15), 4-12. doi: 10.1016/j.jenvman.2017.04.087
- Binner, E., Böhm, K., Lechner, P. (2012). Large scale study on measurement of respiration activity (AT(4)) by Sapromat and OxiTop. *Waste Management*, 32 (10), 1752-1759. doi: 10.1016/j.wasman.2012.05.024
- Binner E and Zach A. (1999). Laboratory tests describing the biological reactivity of pretreated residual wastes. *ORBIT 99 Org Recover Biol Treat.* 255-261. Universität f. Bodenkultur Vienna, Dep. of Waste Management / IWGA, Nußdorfer Lände 29-31, 1190 Wien.
- Binner E, Lechner P. (2011). Measurement of Respiration Activity ( AT4 ) – Comparison of 169 Samples Measured By Sapromat and Oxitop. *Respiration* (October).
- Directiva 1999/31/CE del Consejo de 26 de abril de 1999 relativa al vertido de residuos. 16-7-1999.L 182/1.
- Environmental Protection Agency, Ireland. Municipal Solid Waste – Pre-treatment & Residuals Management, EPA Technical Guidance Document, 2009.

- European Union (2001). Working Document, Biological Treatment of Biowaste, 2<sup>nd</sup> Draft, February. [http://europa.eu.int/comm/environment/waste/facts\\_en.htm](http://europa.eu.int/comm/environment/waste/facts_en.htm)
- Evangelou, A., Calabrò, P.S., Greco, R., Sánchez, A., Komilis, D. (2016) Biodegradation activity of eight organic substrates: A correlation study of different test methods. *Waste Biomass Valoriz.*, 7 (5), 1067–1080. <http://dx.doi.org/10.1007/s12649-016-9532-2>
- Evangelou A, Komilis D. (2018) Liquid-Phase Respiration Activity Assays to Assess Organic Waste Stability: A Comparison of Two Tests. *Sustainability*. 10(5):1441
- Federal Government of Germany (2001). Ordinance on environmentally compatible storage of waste from human settlements and on biological waste-treatment facilities of 20 February 2001.
- Godley A, Lewin K, Frederickson J, Smith R, Blakey N. Application of DR4 and BM100 biodegradability tests to treated and untreated organic wastes. Proc Sardinia 2007, Elev Int Waste Manag Landfill Symp Cagliari, Italy. 2007;(October 2007):225.
- Iannotti DA, Pang T, Toth BL, Elwell DL, Keener HM. (1993) A quantitative respirometric method for monitoring compost stability. *Compost Sci Util*. 1(3):52-65.
- IMPEL. Directive L. Landfill Project 2017. Report of the meeting in Riga (Latvia) 11th and 12th of April 2017. State Environmental Service 25.05.2017, Report number 2017/1.
- Jęrczak, A., Szpadt, R. (2008). Guidelines on the requirements for the processes of composting, fermentation and mechanical-biological waste treatment. The Ministry of Environment. (In Polish).
- Lasaridi KE, Stentiford EDI. A Simple Respirometric Technique for Assessing Compost Stability. 1998;32(12):3717-3723.
- Llewelyn RH (2005). Direct LSL. Development of Standard Laboratory Based Test to Measure Compost Stability – Annex A. Vol 2005.
- Malińska K. (2016) Application of a modified OxiTop® respirometer for laboratory composting studies. *Arch Environ Prot*. 42(1):56-62.
- OENORM S 2027-4:2012-06-01. Evaluation of waste from mechanical-biological treatment - Part 4: Stability parameters - Respiration activity (AT4). Austrian Standards Institute, Vienna, Austria.
- Ponsá S, Gea T, Sánchez A. (2010). Different Indices to Express Biodegradability in Organic Solid Wastes *J Environ Qual*. 39(2).
- Republic of Slovenia. Decree on Treatment of Biodegradable Waste (Official Gazette, No. 62/08). Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen, (Reglament 2001)
- UNE-CEN/TR 14980:2009. Combustibles sólidos recuperados. Informe sobre las diferencias relativas entre las fracciones biodegradable y biogénica de los combustibles sólidos recuperados. 2009-09-29.