

04-037

**DEVELOPMENT OF ACCELERATED TESTING OF CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE
LEACHING POTENTIAL FOR USE IN ENVIRONMENTAL APPLICATIONS**

Espuelas Zuazu, Sandra ⁽¹⁾; Martín Antunes, Miguel Ángel ⁽¹⁾; Seco Meneses, Andrés ⁽¹⁾;
Marcelino Sádaba, Sara ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Universidad Pública de Navarra

The study develops an accelerated test to establish the suitability of using waste as aggregates for the recovery of degraded natural areas. One of the main aspects to determine such suitability is its leaching potential, since it determines its capacity to contaminate the environment in which it is used. An accelerated test is developed using a column system, which aims to estimate the potential of the surrounding soils to retain the leachates generated by the waste. In addition to the development of the test, the results obtained from the use of construction and demolition waste and of this waste with two natural soils, one acidic and the other basic, are presented.

Keywords: construction and demolition wastes; leaching test; circular economy

**DESARROLLO DE ENSAYO ACELERADO DEL POTENCIAL DE LIXIVIACIÓN DE RESIDUOS DE
CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN PARA SU EMPLEO EN APLICACIONES AMBIENTALES**

El estudio desarrolla un ensayo acelerado para establecer la conveniencia de utilizar residuos como áridos para la recuperación de espacios naturales degradados. Uno de los principales aspectos para determinar dicha adecuación es su potencial de lixiviación, ya que determina su capacidad de contaminar el entorno en el que se emplean. Se desarrolla un ensayo acelerado mediante un sistema de columnas, que tiene como objetivo estimar el potencial de los suelos circundantes en la retención de los lixiviados generados por los residuos. Además del desarrollo del ensayo, se presentan los resultados obtenidos del empleo de residuo de construcción y demolición (RCD) y del mismo junto con dos suelos naturales, uno ácido y otro básico.

Palabras clave: residuos de construcción y demolición; lixiviados; economía circular; recuperación de espacios degradados

Agradecimientos: Subvención Fondo de Residuos 2021 (Dirección General de Medio Ambiente).

Desarrollo de un método acelerado para el estudio del potencial de lixivación de metales pesados de residuos en construcción y actuaciones medioambientales en Navarra - LIXINAV. (00



1. Introducción

En la actualidad, el sistema tradicional de gestión de residuos mediante depósito en vertedero se está convirtiendo en un problema mundial, como resultado del aumento de la población mundial y el consiguiente aumento de la producción de basura (Mukherjee et al., 2015). La recuperación de vertederos es un proceso que implica la rehabilitación ambiental de los terrenos que han sido utilizados para el depósito de residuos, el objetivo de la recuperación es transformar estos sitios en áreas seguras, útiles y ambientalmente seguros.

Cada vez es más importante la inclusión de principios de desarrollo sostenible a la hora de seleccionar tecnologías, esto hace necesario realizar estudios para establecer la conveniencia de la utilización de técnicas y procedimientos más sostenibles, como el empleo de residuos industriales en la recuperación de espacios degradados.

Los áridos son una de las materias primas más consumidas del mundo, su demanda global se ha triplicado desde el año 2000 y su consumo mundial se estima en la actualidad en unas 50.000 toneladas/año (Tost & Ammerer, 2022), además se espera un 45% de crecimiento global del consumo de los mismos para el año 2060 (Zhong et al., 2022). En la actualidad menos del 10% de los áridos que se emplean en la Unión Europea son áridos reciclados (UEPG, 2021), esto hace necesario continuar estudiando e implementando el uso de estos.

La utilización de residuos para la recuperación de vertederos es una práctica que ha ganado interés en los últimos años como una alternativa sostenible y rentable para la rehabilitación de sitios de disposición de residuos.

El presente estudio valora el uso de residuos de demolición y construcción (RCD) para la recuperación de espacios ambientales degradados. La producción mundial de RCD ha alcanzado los 30 billones de toneladas al año (Dong et al., 2021). Los RCD pueden incluir materiales como cemento, ladrillos, cerámica, madera, metales, plásticos y vidrio, entre otros. Estos materiales pueden ser triturados y procesados para producir agregados reciclados, que permiten su empleo en diferentes ámbitos, como el relleno para la recuperación de vertederos.

La utilización de RCD para la recuperación de vertederos tiene como beneficio, además de la propia reutilización de este residuo, la reducción de la necesidad de extraer materiales naturales. Además, el empleo de RCD puede suponer una alternativa más rentable económicamente que el empleo de áridos naturales. Sin embargo, la utilización de RCD también puede presentar algunos desafíos, como la necesidad de garantizar que los materiales sean adecuados para su uso en la recuperación de vertederos y que cumplan con los estándares de calidad y seguridad (Santos & Tubino, 2021). Se han realizado múltiples estudios técnicos y científicos que determinan la aptitud del empleo de áridos reciclados de RCD desde el punto de vista mecánico y de durabilidad (CEDEX & Ministerio de Transportes, Movilidad Urbana y Agenda Urbana, 2014; Jiang et al., 2019; Liu et al., 2020, 2020; Ma et al., 2022; Santos & Tubino, 2021).

Uno de los aspectos clave para determinar la adecuación de estos materiales a esta aplicación, es el análisis de los lixiviados que los residuos pueden emitir y su capacidad para contaminar el entorno. Los posibles contaminantes que pueden existir en los áridos reciclados de RCD, son: arcillas y otros suelos, betún, polímeros, yeso, otros productos de sellado de juntas, ladrillos, materia orgánica, metales, vidrios, sustancias reactivas y hormigón e cemento aluminoso (CEDEX & Ministerio de Transportes, Movilidad Urbana y Agenda Urbana, 2014). La presencia de estos contaminantes en los áridos debe evaluarse y limitarse para controlar los posibles efectos sobre el entorno.

La normativa para la evaluación de lixiviados en áridos (UNE-EN 12457) y la Directiva Europea que determina la admisibilidad de los residuos en vertederos (Decisión del Consejo 2003/33/CE), que marca los valores máximos de lixiviación de los mismos, plantean ensayos en los que el material a estudiar debe ser triturado hasta granulometrías muy inferiores a las que se utilizan habitualmente. Esta necesidad de triturar los residuos a estudiar, hace que los resultados no sean representativos de la realidad.

El presente estudio trata de desarrollar un sistema de ensayo de columnas para la realización de estudios acelerados de lixiviados aplicable a diferentes materiales en condiciones similares a su uso. Mediante este ensayo, se tratará de establecer la conveniencia de la utilización de residuos industriales y residuos de construcción y demolición, para la recuperación de espacios degradados.

Además, se ha realizado una campaña de laboratorio experimental para simular la lixiviación de las combinaciones de los residuos de demolición y construcción junto con dos suelos naturales, uno ácido y uno básico, para la estimación del potencial de los suelos circundantes en la retención de los lixiviados generados por los residuos.

2. Objetivos

El objetivo general del estudio es el desarrollo de un sistema de ensayo de columnas para la realización de estudios acelerados de lixiviados aplicable a diferentes materiales, para estimar el potencial de los suelos circundantes en la retención de los lixiviados.

El objetivo general se desglosa en los siguientes objetivos específicos:

1. Diseñar el sistema de columnas para la realización de estudios acelerados de lixiviados.
2. Fabricar el prototipo del sistema y desarrollar el protocolo de ensayo, para realización del mismo, de manera que los resultados sean representativos de las condiciones naturales que se deseen ensayar.
3. Aplicar el ensayo desarrollado al material seleccionado: Residuos de construcción y demolición.

3. Metodología

3.1 Diseño del sistema de columnas.

En primer lugar, se diseñó un módulo de ensayos prototipo que permite la realización de estudios acelerados de lixiviados. En la figura 1 se presenta el diseño del montaje desarrollado y en la figura 2 la célula donde se introducen los materiales a ensayar.

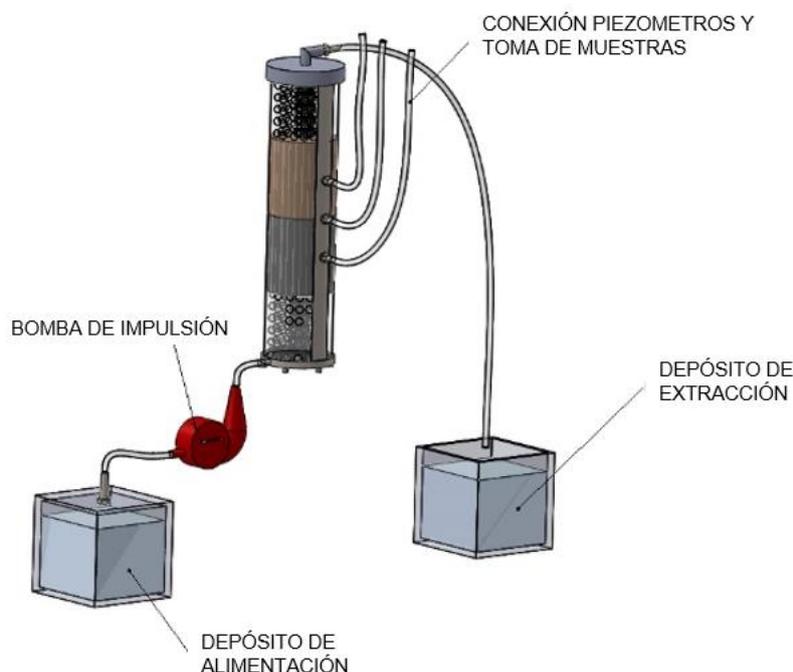


Figura 1: Diseño del montaje para la realización de estudios acelerados de lixiviados. Fuente: Elaboración propia.

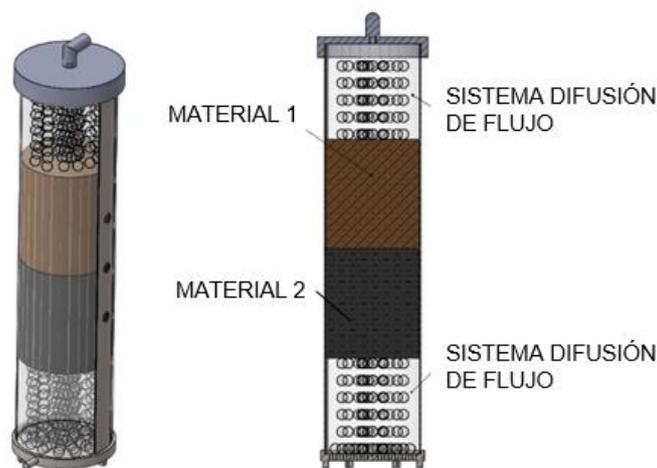


Figura 2: Detalle de la célula de ensayo diseñada para el análisis de 2 capas de materiales combinados. Fuente: Elaboración propia.

Las células tienen un diámetro interior de 150 mm para permitir la introducción en las mismas de materiales de diferentes granulometrías. Para permitir la correcta compactación de los materiales en la célula y evitar su rotura por presión durante la realización de los ensayos, se eligió tubería de espesor mayor de 4 mm. Este tipo de tubería es capaz de resistir los sistemas de compactación dinámica necesarios para alcanzar las densidades requeridas en los materiales en el ensayo, que igualen las previstas en su uso en obra.

Esta célula permite el ensayo de dos capas de materiales diferentes de hasta 25 cm de espesor, permitiendo ensayar capas de más espesor o configuraciones multicapa mediante el empleo de células de ensayo conectadas en serie. Los tres puntos diseñados, colocados

al principio, mitad y final de cada capa, sirven para conectar los piezómetros para la determinación de la permeabilidad de los medios ensayados, y también permiten la toma de muestras del agua de ensayo. Estos puntos de toma de muestras, junto con los realizados a la entrada y salida de la célula de ensayo permiten la toma de muestras tanto al comienzo, como al final y en medio de cada una de las capas de materiales objeto de ensayo. El gradiente hidráulico requerido para el ensayo se realiza por presión natural (carga hidráulica).

En la siguiente figura se muestra el proceso de llenado y montaje de cada célula.



Figura 3: Proceso de montaje de célula con una capa de material.

3.2 Campaña experimental.

Para la realización de esta campaña experimental se utilizaron los siguientes materiales:

- RCD de hormigón procedente de un derribo selectivo, en concreto de hormigón armado estructural de un edificio.
- Suelo ácido: Suelo de montera recogido en la cantera de Elzaburu en el Valle de la Ultzama (Navarra), situado en las coordenadas ETRS89 UTM x: 603.275, y:4.764.800.
- Suelo básico: Arcilla margosa obtenida en talud de excavación, de terreno natural, situado en la Cuenca de Pamplona (Navarra), con coordenadas ETRS89 UTM x: 613.194, y: 4.736.705.

En cuanto a los suelos, cabe citar que ambos son suelos de excavación, de escasa capacidad portante. Estos suelos obtuvieron un pH en laboratorio de 5.21 y 8.13, por lo que fueron seleccionados como suelo ácido y básico respectivamente. Para la generación de los eluatos se utilizó agua desionizada ultrapura que se hizo circular a través de los materiales objeto de estudio.

Para la realización de estos ensayos, los materiales se introdujeron en las columnas y se compactaron manualmente, teniendo como referencia la densidad del ensayo Proctor Normal. Al comienzo y salida de las células se colocaron piezas de geotextil para evitar el arrastre de las partículas finas y una capa de bolas de vidrio para garantizar la difusión del caudal por toda la sección de las células. La circulación del agua se realizó en flujo ascendente para evitar en la medida de lo posible ineficiencias en el flujo del agua a través de las columnas de materiales como las debidas a presencia de bolsas de aire o las zonas de flujo preferente del agua. La carga hidráulica se mantuvo constante durante todos los experimentos mediante el uso de un depósito elevado de altura constante que era suministrado por depósito pulmón. La velocidad de circulación del agua a través de los materiales se reguló mediante válvulas a la entrada de las columnas. Los eluatos eran recogidos en probetas donde se medía el volumen de agua que había pasado y se tomaron muestras a diferentes intervalos, que se analizaron mediante técnicas de laboratorio mediante ICP masas, para la determinación de la cantidad de metales presentes en las aguas analizadas. En la figura 3 se puede ver el sistema desarrollado para los análisis realizados.



Figura 4: Sistema de columnas de lixiviación desarrollado.

Dado que el sistema pretende simular de manera acelerada la lixiviación de los materiales objeto de estudio, se determinó la relación entre la cantidad de agua circulada y el tiempo equivalente en condiciones reales teniendo en cuenta la superficie de la columna y la pluviometría a estudiar. Considerando una pluviometría media en la zona de Pamplona de 750 mm de lluvia al año, esto supone que la columna debería ser atravesada por 7,655 l de agua para simular la percolación equivalente, correspondiente a un año.

Las muestras de eluatos recogidas a los diferentes intervalos de tiempo fueron filtradas a través de un filtro de paso 0,2µm para separar la fracción líquida de la sólida. Se añadió 1 volumen de ácido nítrico (69%, analítico) por cada 20 volúmenes de muestra para acidificar y así evitar la precipitación de sales y se guardaron las muestras en nevera hasta el análisis. Las muestras fueron diluidas en una relación 1/5 en volumen, previo al análisis de plasma de acoplamiento inductivo en espectrofotómetro de emisión óptico y espectrofotómetro de masas, usadas para medir los elementos en disolución. Cada muestra fue analizada con 3 repeticiones y se determinaron las concentraciones de los siguientes metales pesados: Cr, Ni, Cu, As, Se, Mo, Sb, Hg y Pb.

4. Resultados

Las siguientes tablas muestran los resultados obtenidos del análisis de metales pesados en las muestras recogidas a lo largo del ensayo.

Tabla 1: Resultados lixiviados de RCD.

RCD										
	Tpo. equiv. lluvia	Cr	Ni	Cu	As	Se	Mo	Sb	Hg	Pb
	(mes)	[ppb]	[ppb]	[ppb]	[ppb]	[ppb]	[ppb]	[ppb]	[ppb]	[ppb]
C3.1	0.11	20.194	33.329	68.840	10.241	5.433	36.970	10.053	0.000	2.039
C3.2	0.27	18.995	26.148	59.858	9.644	5.066	34.173	9.204	0.000	1.683
C3.3	0.46	20.166	25.349	50.708	10.106	5.074	37.392	9.801	0.000	3.195
C3.4	0.94	27.935	30.862	62.291	12.734	6.476	63.513	15.049	0.000	4.067
C3.5	1.60	25.519	24.882	63.776	12.367	6.859	65.931	18.305	0.000	1.432
C3.6	1.68	27.314	30.261	67.415	13.683	7.502	70.768	19.212	0.000	5.869
C3.7	1.85	27.208	30.931	59.006	13.824	7.430	75.209	22.606	0.000	5.206
C3.8	2.28	22.338	26.713	53.610	11.968	6.346	65.799	25.947	0.000	2.543
C3.9	2.92	18.082	24.434	49.000	10.766	5.901	57.119	22.831	0.002	2.191
C3.10	4.21	13.075	21.060	34.199	8.505	4.068	40.103	18.911	0.001	2.298
C3.11	4.56	11.307	30.922	52.967	8.047	3.846	37.810	18.869	0.001	2.573
C3.12	9.45	9.688	14.122	12.923	5.196	1.700	15.970	12.444	0.001	1.505

C3.13	10.23	9.137	8.246	8.227	2.359	0.543	5.581	4.185	0.000	0.322
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Tabla 2: Resultados lixiviados para RCD con suelo ácido.

RCD + suelo ácido										
	Tpo. equiv. lluvia	Cr	Ni	Cu	As	Se	Mo	Sb	Hg	Pb
	(mes)	[ppb]	[ppb]	[ppb]	[ppb]	[ppb]	[ppb]	[ppb]	[ppb]	[ppb]
C1.1	0.40	10.84	19.93	53.56	2.15	2.64	0.63	5.86	0.03	5.01
C1.2	1.35	10.89	31.65	45.44	0.93	3.18	0.38	7.48	0.03	18.86
C1.3	3.12	13.54	66.67	23.83	1.38	6.92	0.38	3.69	0.02	78.12
C1.4	3.59	13.38	64.83	17.98	1.09	6.99	0.36	3.07	0.02	61.54
C1.5	3.94	12.77	65.92	14.84	0.94	5.88	0.31	2.82	0.01	48.51
C1.6	5.24	11.63	89.00	11.80	0.95	5.49	0.26	2.56	0.01	34.37
C1.7	5.60	10.73	88.70	9.74	0.92	4.68	0.29	2.22	0.01	29.87
C1.8	5.92	10.18	97.07	9.43	0.92	4.39	0.18	2.25	0.00	30.51
C1.9	6.94	10.54	151.69	7.20	0.94	3.77	0.21	1.52	0.00	25.53
C1.10	7.25	10.25	130.72	6.09	0.97	4.06	0.19	1.50	0.00	24.03
C1.11	7.52	10.17	140.23	5.35	0.88	4.02	0.23	1.46	0.00	23.15
C1.12	8.53	10.08	159.70	2.93	0.86	3.24	0.12	1.29	0.00	25.03
C1.13	10.96	9.23	175.76	1.98	0.76	2.88	0.13	1.95	0.00	25.59
C1.14	11.74	9.56	155.68	2.35	0.77	3.19	0.16	2.65	0.00	6.61
C1.15	12.39	9.46	132.10	2.23	0.85	3.51	0.11	3.12	0.00	4.08
C1.16	12.92	9.53	143.22	2.21	0.81	4.23	0.14	3.20	0.00	2.67

Tabla 3: Resultados lixiviados para RCD con suelo básico.

RCD + suelo básico										
	Tpo. equiv. lluvia	Cr	Ni	Cu	As	Se	Mo	Sb	Hg	Pb
	(mes)	[ppb]								

C2.1	0.34	11.00	18.27	41.51	3.15	1.94	6.46	7.29	0.00	1.15
C2.2	1.37	11.35	20.16	31.43	2.02	1.50	6.84	17.58	0.00	1.39
C2.3	3.22	13.11	12.61	18.63	2.12	1.30	7.69	20.75	0.00	1.76
C2.4	3.74	13.80	14.21	17.29	2.16	1.15	7.76	21.72	0.00	1.96
C2.5	4.12	13.33	13.71	20.22	2.06	1.17	7.33	20.72	0.00	3.89
C2.6	5.56	11.10	17.82	15.33	1.85	0.98	6.80	22.61	0.00	5.17
C2.7	5.95	10.23	10.87	14.81	1.90	0.86	6.52	22.83	0.00	2.14
C2.8	6.31	9.94	11.35	14.24	2.09	1.03	7.50	25.03	0.00	1.94
C2.9	7.44	10.27	12.48	13.73	1.87	1.22	6.36	25.22	0.00	2.73
C2.10	7.79	9.87	11.08	12.23	1.97	1.17	6.40	25.32	0.00	2.41
C2.11	8.07	9.74	13.87	10.30	1.81	0.96	6.34	25.72	0.00	2.22
C2.12	9.00	8.24	10.23	6.64	1.53	0.81	5.36	26.89	0.00	3.13
C2.13	11.20	8.71	12.72	8.86	2.35	0.91	7.73	53.78	0.00	7.25
C2.14	11.56	8.55	12.79	3.92	1.93	1.12	7.92	60.42	0.00	2.76
C2.15	11.80	8.69	13.97	3.52	2.03	1.24	9.03	68.64	0.00	4.70
C2.16	11.99	8.41	14.53	4.13	2.18	1.08	9.11	83.73	0.00	5.23

Los resultados muestran que a priori no es posible establecer un patrón de comportamiento uniforme en cuanto a la lixiviabilidad de todos los metales pesados contenidos en el RCD en función de su ensayo o el ensayo del RCD con los suelos considerados. Sin embargo, se han podido establecer determinadas tendencias, de interés para la comprensión de este proceso.

En el RCD se observan patrones de lixiviación de metales constantes a lo largo del tiempo para el caso de los metales: Sb y Pb. En el caso de Cr, Ni, Cu, As, Se y Mo se observan patrones decrecientes que podrían estar relacionado con el lavado de dichos metales.

Con respecto al ensayo realizado al RCD junto al suelo ácido, aunque hay casos como el del Sb o el Mo donde el suelo ácido disminuye notablemente la lixiviabilidad del RCD, en términos generales, el suelo ácido aumenta de manera notable la lixiviabilidad total de metales del conjunto, como en el caso del Ni, Se o Pb. En el resto de metales, no se aprecian variaciones importantes de lixiviabilidad respecto del RCD sin suelo. Estos aumentos de la lixiviabilidad de metales se han atribuido al pH más ácido de este suelo y su propia lixiviabilidad, la cual incrementaría la del RCD, de naturaleza claramente básica. Así la diferencia de pH entre RCD y el suelo ácido podría ser la explicación que justificara el incremento de lixiviabilidad de Ni, Se, Cd o Pb, más fácilmente movilizables en el suelo ácido que en el RCD.

El uso de suelo básico en el experimento ha demostrado tener un efecto diferente dependiendo de los metales considerados y del tiempo de ensayo. Así para Cr, Cu, As, y

Se, se observa una disminución de la lixiviabilidad del conjunto RCD+suelo básico respecto del RCD solo, hasta los 6000 ml de agua circulada por la columna (equivalente a unos 10 meses de percolación de agua). A partir de entonces se observa que los niveles de lixiviabilidad son los mismos del suelo básico, lo que revelaría un efecto positivo del mismo, que retendría la contaminación por metales pesados aportados por el RCD, manteniéndola a largo plazo en los valores propios del suelo natural. Solo en el caso del Sb se muestra un aumento significativo de la lixiviabilidad lo cual, unido al descenso observado en el caso del suelo ácido, pone de manifiesto la influencia del pH del suelo en la movilidad de este metal, que sería más fácilmente movilizable en el suelo básico que en el RCD y en el conjunto RCD+suelo ácido.

5. Conclusiones

El presente estudio ha permitido desarrollar un método de ensayo para simular de forma acelerada la lixiviación de materiales para su empleo en diferentes usos como la recuperación de vertederos.

La campaña experimental ha determinado que, en el caso de los RCD, no es posible establecer un patrón de comportamiento uniforme en cuanto a la lixiviabilidad de todos los metales pesados contenidos en el mismo.

Se han observado diferencia en la lixiviación de metales pesados a lo largo del tiempo que podrían estar relacionados con el lavado de los mismos. Cuando se realiza el estudio en conjunto con suelo ácido, se concluye que la diferencia de pH del suelo con el RCD justifica el incremento de lixivilidad de algunos metales pesados más fácilmente movilizables en el suelo. En el caso del suelo básico, se observa un efecto positivo del mismo, que retendría la contaminación por metales pesados aportados por el RCD

Por último, debe tenerse siempre presente las posibles heterogeneidades en cuanto a la composición química de las muestras analizadas, siendo algo inherente a un RCD, donde la variabilidad de los componentes de este tipo de residuo puede ser muy elevada.

6. Bibliografía

- AENOR. (2003). UNE-EN 12457-2, Characterisation of waste—Leaching—Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges—Part 2: One stage batch test at a liquid to solid ratio of 10 l/kg for materials with particle size below 4 mm.
- Consejo de la Unión Europea. (2003). 2003/33/CE: 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 con arreglo al artículo 16 y al anexo II de la Directiva 1999/31/CEE.
- CEDEX & Ministerio de Transportes, Movilidad Urbana y Agenda Urbana. (2014). Catálogo de residuos utilizables en construcción. Residuos de Construcción y Demolición. (pp. 1-54).

- Dong, W., Li, W., & Tao, Z. (2021). A comprehensive review on performance of cementitious and geopolymeric concretes with recycled waste glass as powder, sand or cullet. *Resources, Conservation and Recycling*, 172, 105664.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105664>
- Jiang, J., Zhou, W., Gao, Y., Wang, L., Wang, F., Chu, H., Xu, G., Vandevyvere, B., Sierens, Z., & Li, J. (2019). Feasibility of manufacturing ultra-high performance cement-based composites (UHPCs) with recycled sand: A preliminary study. *Waste Management*, 83, 104-112. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.11.005>
- Liu, Q., Singh, A., Xiao, J., Li, B., & Tam, V. W. (2020). Workability and mechanical properties of mortar containing recycled sand from aerated concrete blocks and sintered clay bricks. *Resources, Conservation and Recycling*, 157, 104728.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104728>
- Ma, Z., Shen, J., Wang, C., & Wu, H. (2022). Characterization of sustainable mortar containing high-quality recycled manufactured sand crushed from recycled coarse aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 132, 104629.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104629>
- Mukherjee, S., Mukhopadhyay, S., Hashim, M. A., & Sen Gupta, B. (2015). Contemporary Environmental Issues of Landfill Leachate: Assessment and Remedies. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45(5), 472-590.
<https://doi.org/10.1080/10643389.2013.876524>
- Santos, R. P., & Tubino, R. (2021). Potential evaluation of the use of construction and demolition waste (CDW) in the recovery of degraded soils by mining in Brazil. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 12, 200060.
<https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2021.200060>
- Tost, M., & Ammerer, G. (2022). *Sustainable supply of aggregates in Europe. An assessment of «non-critical» but essential raw materials with focus on policy and permitting elements*. [Final Report].

UEPG. (2021). *European Aggregates Association Annual Review 2020-2021*.

Zhong, X., Deetman, S., Tukker, A., & Behrens, P. (2022). Increasing material efficiencies of buildings to address the global sand crisis. *Nature Sustainability*, 5(5), 389-392.

<https://doi.org/10.1038/s41893-022-00857-0>

Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

