

04-024

METHODOLOGY TO ESTIMATE THE LEACHATE FLOW IN CONTROLLED SANITARY LANDFILL

Esteban Altabella, Joan; Colomer Mendoza, Francisco J.; Gallardo Izquierdo, Antonio;
Carlos Alberola, Mar
Universitat Jaume I

The leachate quantity generated in a landfill can be managed by an adequate design of the leachate drainage and storage systems. For this reason, in the first place, the factors that determine the leachate generation should be identified, and in the second place, the maximum amount of leachate to be evacuated should be estimated using empirical formulas. These forecasts, usually calculated using the Water Balance Method -WBM, require simulation tools developed by complex mathematical formulas that provide measurable results about the generation (HSSWDS, CREAMS, WGEN, SWRRB, HELP, SOILINER, FULLFILL, FILL, BASE). However, these tools do not consider the influence of the time factor on the parameters variation. Therefore, the aim of the present paper is to show a new calculation model to estimate the leachate generation depending on the time factor. This model can be applied in the different stages of the landfill life-cycle (operation and closure) and it is validated using the data of a real landfill with a 52.000 tons of Municipal Solid Waste - MSW input.

Keywords: *sanitary landfill; generation leachate; water balance method*

METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DEL FLUJO DE LIXIVIADOS EN DEPÓSITOS CONTROLADOS

El lixiviado generado en un depósito controlado puede ser gestionado mediante el diseño adecuado de los sistemas de evacuación y almacenamiento de lixiviados. Para ello, en primer lugar, se deben identificar los factores que determinan la generación y a continuación, mediante fórmulas empíricas, estimar la cantidad máxima de lixiviado a evacuar. Estas estimaciones, calculadas generalmente mediante la aplicación del Water Balance Method -WBM, requieren de herramientas de simulación desarrolladas mediante fórmulas matemáticas complejas que aportan resultados cuantificables sobre las producciones (HSSWDS, CREAMS, WGEN, SWRRB, HELP, SOILINER, FULLFILL, FILL, BASE). Sin embargo, estas herramientas no consideran la influencia del factor tiempo en la variación de todos sus parámetros. Así pues, el objetivo del trabajo presentado es mostrar el desarrollo de un nuevo modelo de cálculo para la estimación de la generación de lixiviados en función del tiempo. Este modelo es aplicable en las distintas fases del depósito controlado (explotación y clausura) y se valida mediante los datos obtenidos de un vertedero con una entrada de residuos anual de 52.000 toneladas.

Palabras clave: *Depósito controlado; vertedero; generación; lixiviado; balance hídrico*

Correspondencia: Antonio Gallardo Izquierdo gallardo@uji.es

Agradecimientos: Proyecto BIONORD, Zona I de gestión de residuos de la C.V.

1. Introducción

Uno de los principales problemas ambientales relacionados con los vertederos es el riesgo de contaminación de aguas subterráneas y la consecuente influencia en la calidad de las aguas superficiales. El impacto ambiental depende de la cantidad y calidad del agua que percola a través de los residuos depositados y alcanza las capas freáticas y/o acuíferos más superficiales. A este líquido resultante se le denomina lixiviado, el cual debe ser gestionado y evacuado correctamente para prevenir sus efectos negativos. De hecho, existen registros de incidentes de contaminación de aguas subterráneas por lixiviados de vertederos. Esto crea la necesidad de comprender los mecanismos que controlan la formación de lixiviados (Bou-Zeid y El-Fadel, 2004). En todo caso, para que pueda gestionarse adecuadamente es necesario que en el proyecto de explotación se estimen los volúmenes y caudales que se van a generar y a partir de esos datos, se puedan dimensionar los sistemas de evacuación (Bengtsson et al., 1994)

Actualmente existen numerosos modelos desarrollados para simular los procesos que gobiernan la generación y el comportamiento de los lixiviados en un vertedero. Estos modelos enfatizan la estimación de la cantidad y calidad del lixiviado para prever el impacto ambiental que pueden generar, principalmente en las aguas superficiales y subterráneas, además de contribuir a mejorar la metanogénesis y la estabilización del residuo. Por otro lado, los modelos proporcionan datos que sirven de guía a la hora de diseñar el sistema de evacuación, recirculación y control del lixiviado (El Fadel et al. 2010).

Los modelos tradicionales para calcular la generación de lixiviados están basados en la aplicación del Water Balance Method (WBM) desarrollado por la U.S. EPA (Fenn et al. 1975). Otras herramientas existentes como Hydrology Evaluation of Landfill Performance (HELP), SOILNER and FULLFILL también están basadas en este sistema. Sin embargo, hay métodos como el Serial Water Balance (SWB) (Orta et al. 2003) que consiguen estimaciones más precisas considerando factores adicionales, tales como el tiempo de construcción de cada celda, el tiempo de exposición del residuo al aire, valores de compresión y densidad, cantidades de residuos depositadas y capacidad de campo de los residuos. No obstante, a la hora de estudiar el movimiento de lixiviado dentro de la masa de residuos hay que considerar diferencias entre las vías preferentes con alta conductividad hidráulica (300 m/d) y la matriz de residuos con baja permeabilidad (0,1 m/d) (Fellner y Brunner, 2010). Otros autores proporcionan conductividades entre 0,0047 y 0,052 m/día decreciendo progresivamente con la profundidad (Jain et al., 2006), ya que a medida que se profundiza aumenta la densidad y por tanto, la impermeabilidad (Al-Thani et al. 2004). Además, influyen factores como el estado de biodegradación de los residuos, la humedad y la edad del residuos (Cossu and Raga, 2008; Agostini et al., 2012)

Por otro lado, a medida que aumenta la profundidad del vertedero se van modificando las propiedades y por tanto, puede variar el movimiento de lixiviados a través de la masa de residuos (Al-Thani et al. 2004) ya que se modifica la densidad y la porosidad (Rowe y Nadarajah, 1996), por lo que el movimiento del agua y por consiguiente, el cálculo del lixiviado generado se hace más complicado y difícil de estimar.

2. Objetivos

El objetivo de este estudio es desarrollar una metodología de cálculo que permita reproducir la vida útil de un depósito controlado, y posteriormente calcular el flujo mensual de lixiviado durante ese tiempo. Para ello, en primer lugar se deben identificar los factores influyentes en la generación del lixiviado, en segundo lugar, como interactúan estos factores, y en tercer lugar, el volumen de lixiviado que finalmente se genera.

Para alcanzar este objetivo, la metodología debe considerar las variaciones de todos los factores en función del tiempo. Entre los factores destacan la climatología de la zona, la capacidad y la estructura del depósito controlado, el ritmo de vertido, las características de los residuos, y como aspecto más crítico; las posibles variaciones de todos estos valores a lo largo de la vida útil del depósito controlado.

Se espera que la estructura del estudio presentado sea incorporada en la herramienta para el diseño de vertederos de residuos sólidos urbanos (LABWASTE) y permita determinar el flujo mensual de lixiviado durante las fases de explotación y clausura a nivel de anteproyecto. Así pues, este estudio muestra la estructura de la metodología que se está desarrollando y realiza una primera simulación con un depósito controlado de la Comunidad Valenciana. Tras la validación se plantearán las mejoras a incorporar para incrementar la precisión de la metodología.

3. Metodología

El desarrollo de este estudio ha sido realizado con el programa informático Excel®, y está estructurado en tres capítulos. Estos, a su vez, se subdividen en grupos que permiten definir las expresiones matemáticas de las distintas variables contempladas, unificando así la información por temáticas. De este modo se desarrolla una metodología aplicable a cualquier depósito controlado, ya que, todas las variables pueden ser modificadas automáticamente en función del tipo de depósito sobre el que se desea realizar la simulación. Este sistema determina automáticamente el flujo mensual de lixiviado generado, así como su volumen en función del tiempo. A continuación se muestra detalladamente la estructura de todos los capítulos, así como de los grupos y variables consideradas:

3.1 Datos generales del depósito controlado

El primer paso consiste en crear una base de datos que considere la siguiente información:

- Datos generales de la instalación: Los factores a considerar son: población equivalente, tasa de generación, tratamiento de los residuos, tasa de vertido y densidad alcanzada.

Tabla 1: Datos generales de la instalación

Variable considerada	Opciones	Simulación
Identificación de la Comunidad Autónoma:	Seleccionar	C. Valenciana
Identificación del Consorcio:	Indicar	Consorcio Provincial
Municipios que lo constituyen:	Indicar	49 Municipios
Año y cifra de población equivalente:	Indicar	2003 / 159.117 ^{*1} hab
Clasificación en función del tipo de residuo:	Seleccionar	Urbanos

Variable considerada	Opciones	Simulación
Año y producción de residuos:	Indicar	2003 / 81.308 t/año
Cantidad de residuos eliminados el depósito controlado		
Residuos sometidos a tratamiento previo:	Seleccionar	Sí
Tasa de generación:	Dato automático ^{*2}	1,40 kg/día
Tipo de instalación de tratamiento:	Seleccionar	Triaje y compostaje
Porcentaje de rechazos:	Seleccionar	73 %
Tasa de vertido:	Dato automático ^{*3}	1,02 kg/hab·día
Ubicación de la zona de vertido:	Seleccionar	Interior
Clase de depósito controlado según topografía:	Seleccionar	Área
Clase de depósito controlado según residuo:	Dato automático	Rechazos (RZ)
Densidad media de los residuos depositados:	Seleccionar	1.000 kg/m ³

*1 Población equivalente. Plan Integral de Residuos de la Zona I de la Comunidad Valenciana.

*2 La cantidad de residuos y la población equivalente indicada permiten obtener la tasa de generación.

*3 La tasa de generación y el tratamiento aplicado en los residuos permite calcular la tasa de vertido.

- Datos generales de los residuos depositados: La caracterización de los residuos permite identificar las fracciones predominantes, y a partir de ello, definir las propiedades físicas y químicas asignables por contribuir activamente en la producción del lixiviado y en su composición. Para este estudio se introducen por defecto los resultados obtenidos por Gallardo et al. (2010) y Gallardo et al. (2012).

Tabla 2: Datos generales de los residuos eliminados en el depósito

Variable considerada	Opciones	Simulación																					
Promedio composición (C) y humedad residuos (H):	Seleccionar	Rechazos																					
		<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <thead> <tr> <th></th> <th>Orgánica</th> <th>Papel/cartón</th> <th>Plástico</th> <th>Vidrio</th> <th>Metales</th> <th>Resto</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>C</td> <td>20,67%</td> <td>30,53%</td> <td>20,45%</td> <td>0,87%</td> <td>3,90%</td> <td>23,60%</td> </tr> <tr> <td>H</td> <td>55,71%</td> <td>42,90%</td> <td>20,37%</td> <td>1,32%</td> <td>16,44%</td> <td>33,67%</td> </tr> </tbody> </table>		Orgánica	Papel/cartón	Plástico	Vidrio	Metales	Resto	C	20,67%	30,53%	20,45%	0,87%	3,90%	23,60%	H	55,71%	42,90%	20,37%	1,32%	16,44%	33,67%
	Orgánica	Papel/cartón	Plástico	Vidrio	Metales	Resto																	
C	20,67%	30,53%	20,45%	0,87%	3,90%	23,60%																	
H	55,71%	42,90%	20,37%	1,32%	16,44%	33,67%																	
Humedad promedio de los residuos	Seleccionar	37,37%																					
Capacidad de campo de los residuos	Seleccionar	94,00% (López et. al 2008)																					

*1 Esta información permite asignar los valores correspondientes al porcentaje promedio de humedad y capacidad de campo. Es utilizada en los siguientes epígrafes para determinar la capacidad de retención de humedad, aspecto a considerar para determinar la cantidad de agua que puede ser retenida por la masa de residuos antes de generar lixiviado.

- Datos climáticos de la zona: Las condiciones climatológicas de la zona influyen activamente en la generación del lixiviado. Los valores ofrecidos por una estación meteorológica de referencia, generalmente ubicada en la zona de explotación o cercana a esta, permiten definir estas condiciones.

En primer lugar, para calcular la evaporación del agua disponible en la zona de explotación se requiere la siguiente información (Tabla 3).

Tabla 3: Datos estación meteorológica^{*1}

Variable considerada			Opciones	Simulación
Localización de la estación meteorológica:			Indicar	Municipio
Ubicación de la estación meteorológica				
Latitud en grados SEXAGESIMALES			Periodo recogida de datos	
Grados	Minutos	Segundos	(m)	Desde Hasta
40°	27'	43''	316	2004 2014
Grados decimales:	40	Hemisferio:	Norte	10 Años

^{*1} Esta información es utilizada en la ecuación FAO Penman-Monteith para la determinación de datos climáticos faltantes de radiación solar desde una estación meteorológica cercana.

En segundo lugar, se consideran los siguientes parámetros climáticos: pluviometría, temperatura, insolación, humedad relativa y velocidad del viento (Tabla 4).

Tabla 4: Datos climáticos^{*1}

Mes	Variables consideradas ^{*2}								
	Precipitación			Temperatura			Insolación	H.R.	Viento
	PM _{MED} (l/m ²)	PM _{MAX} (l/m ²)	PM _{MIN} (n°)	TM _{MED} (°C)	TM _{MAX} (°C)	TM _{MIN} (°C)	IM _{MED} (horas/mes)	HM _{MED} (%)	VM _{MED} (m/s)
Ene.	36,00	126,30	4,20	10,60	15,30	5,80	180	67	2
Feb.	31,00	92,40	3,50	11,30	16,20	6,40	179	66	2
Mar.	31,00	115,20	3,30	13,40	18,50	8,30	209	64	2
Abr.	42,00	146,80	4,60	15,40	20,50	10,30	235	63	2
May.	44,00	151,90	4,70	18,50	23,40	13,60	272	63	2
Jun.	19,00	77,50	2,80	22,50	27,30	17,60	296	63	2
Jul.	9,00	61,80	1,40	25,30	30,00	20,60	329	64	2
Ago.	24,00	191,80	2,40	25,60	30,30	20,90	290	66	2
Sep.	71,00	329,80	5,00	22,90	27,60	18,10	229	68	2
Oct.	70,00	297,60	5,00	19,00	23,50	14,40	203	69	2
Nov.	49,00	248,70	4,20	14,30	18,80	9,80	173	68	2
Dic.	42,00	210,70	4,40	11,40	15,80	7,00	164	68	2

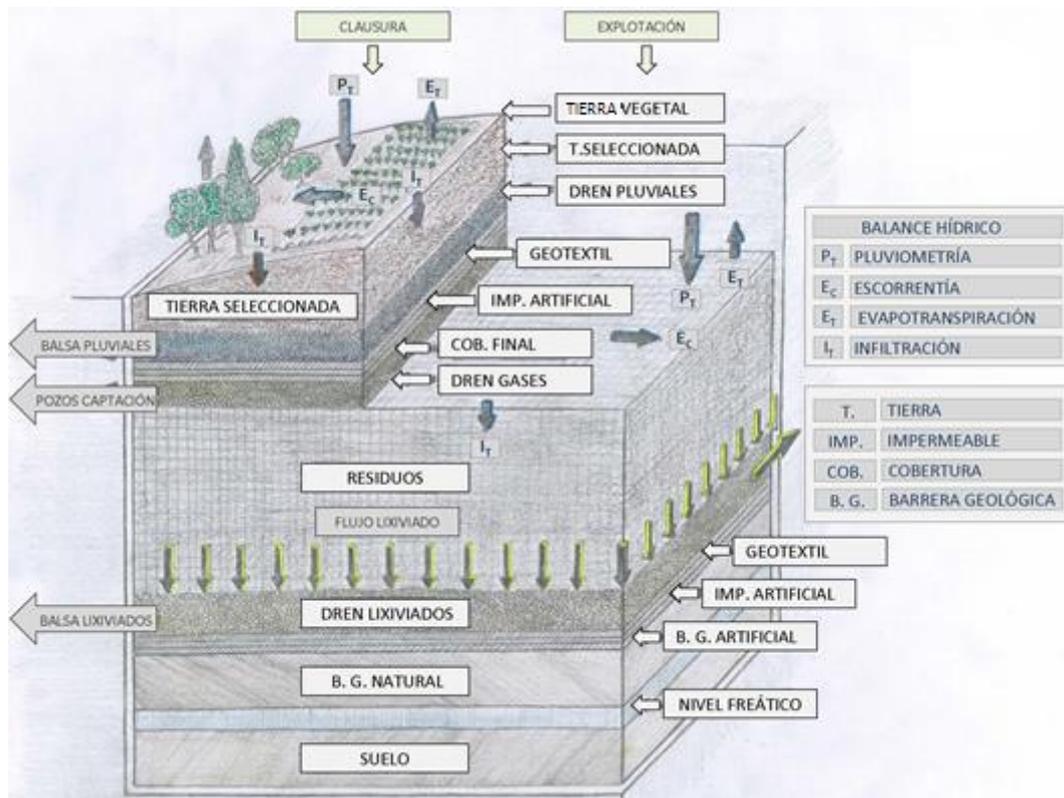
^{*1} Estos parámetros permiten determinar la energía potencial de evaporación mediante la aplicación de la ecuación de FAO Penman-Monteith.

^{*2} Precipitación media mensual (PM_{MED}), precipitación media mensual máxima (PM_{MAX}), precipitación media mensual mínima (PM_{MIN}), temperatura media mensual (TM_{MED}), temperatura media mensual máxima (TM_{MAX}), temperatura media mensual mínima (TM_{MIN}), insolación media mensual (IM_{MED}), humedad relativa media mensual (HM_{MED}), velocidad del viento media mensual (VM_{MED}).

3.2 Datos estructura del depósito controlado

La configuración geométrica del depósito controlado se estructura mediante un perfil de capas (figura 1). Los espesores, las superficies disponibles y la textura de los materiales seleccionados en las capas determinan la velocidad de infiltración del agua, su retención y finalmente el flujo de lixiviado generado por percolación.

Figura 1: Estructura por capas del depósito controlado.



- Datos de la estructura: La tasa de generación, la población equivalente y la eficacia del tratamiento aplicado sobre los residuos permite estimar la tasa de vertido, y en base a ello, determinar el ritmo de vertido. Conocido este valor, es necesario definir la estructura del depósito controlado por capas para estimar posteriormente la vida útil (Tabla 4).

Tabla 4: Datos generales de las capas del depósito controlado*1

Variables consideradas	Opciones	Simulación
FASE III: Clausura		
13. Cobertura vegetal	Indicar si incorpora	Incorpora
12. Tierra vegetal	Indicar si incorpora	Incorpora
11. Tierra seleccionada	Obligatoria	Incorpora
10. Drenaje de pluviales	Indicar si incorpora	Incorpora
9. Impermeabilización	Indicar si incorpora	Incorpora

Variables consideradas	Opciones	Simulación
FASE II: Explotación		
8. Cobertura final	Obligatoria	Incorpora
7. Drenaje de gases	Indicar si incorpora	Incorpora
6. Cobertura diaria	Indicar si incorpora	Incorpora
5. Residuos	Obligatoria	Incorpora
FASE I: Construcción^{*2}		
4. Drenaje de lixiviados	Obligatoria	Incorpora
3. Impermeabilización	Obligatoria	Incorpora
2. Barrera geológica artificial	Obligatoria ^{*3}	Incorpora
1. Barrera geológica natural	Obligatoria	Incorpora

^{*1} Se debe indicar el espesor y el tipo de textura del material utilizado. Este último parámetro permite determinar la capacidad de campo, humedad inicial, velocidad de infiltración y en base a ello el flujo del lixiviado percolado.

^{*2} Se puede seleccionar la incorporación de un sistema de control de fugas. La configuración de este sistema se define mediante la incorporación de dos capas adicionales (capas de drenaje e impermeabilización de seguridad).

^{*3} Si la barrera geológica natural no cumple con las condiciones geológicas mínimas indicadas en el tercer apartado del Anexo I del RD 1481/2001, se establece como obligatoria la incorporación de una barrera geológica artificial.

- Datos de programación de vertido: La información introducida en los epígrafes anteriores permite estimar automáticamente la superficie y el volumen de residuos depositados (estimación diaria, semanal, mensual y anual). Esta Información es utilizada en el próximo epígrafe para determinar el ritmo de llenado y la vida útil del depósito controlado. Se considera la siguiente información (Tabla 5).

Tabla 5: Datos generales de las celdas unitarias

Variables consideradas	Opciones	Simulación		
Espesor de la capa de cobertura:	Dato automático*	0,30 m		
Espesor de la capa de residuos:	Dato automático*	3,00 m		
Superficie y volumen necesario para el vertido de residuos				
Residuos depositados	Diario	Semanal	Mensual	Anual
Superficie ocupada	49 m ²	345 m ²	1.478 m ²	17.986 m ²
Volumen ocupado	163 m ³	1.138 m ³	4.879 m ³	59.355 m ³

^{*1} La tasa de vertido, la población equivalente, la densidad de los residuos depositados y los espesores de las celdas unitarias (capa de residuos y cobertura diaria) determinan la superficie y el volumen necesario para la eliminación de los residuos. La vida útil del depósito controlado depende activamente de estos factores.

Para determinar el ritmo de llenado se debe contemplar en la fase de diseño de un depósito controlado la posibilidad de establecer divisiones estructurales por etapas y fases de llenado. La metodología planteada considera como etapas la posibilidad de dividir la base del depósito mediante la construcción de diques de drenaje (Rain-flap), y como fases, la división vertical que define el orden de llenado (Tabla 6).

Tabla 6: División del depósito controlado por etapas y fases*¹

Variables consideradas			Opciones		Simulación
Número de etapas superficie del vaso:			Indicar si incorpora		1 Ud
Número de fases de vertido:			Indicar si incorpora		2 Ud
Definición de las fases de vertido					
Fases	Etapas I	Capas RSU	Fases	Etapas II	Capas RSU
1	Fase _{1.1}	4	-	Fase _{2.1}	-
2	Fase _{1.2}	6	-	Fase _{2.2}	-
-	Fase _{1.3}	-	-	Fase _{2.3}	-
-	Fase _{1.4}	-	-	Fase _{2.4}	-
-	Fase _{1.5}	-	-	Fase _{2.5}	-

*¹ Esta metodología de cálculo permite considerar depósitos con configuraciones de hasta cuatro etapas y un total de veinte fases (a razón de cinco fases por etapa). La división de cada etapa se establece mediante la ejecución de un Rain-Flap. Este sistema permite reducir la generación de lixiviado hasta un 75% en depósitos con 4 etapas.

- Datos del perfil del depósito controlado: Definida la estructura del depósito controlado mediante un perfil de capas, y asignados para cada caso los espesores y las texturas de los materiales empleados, debe indicarse la superficie de cada capa. Esta información determina la geometría del depósito y en base a ello se estima la capacidad y la vida útil de cada etapa (Tabla 7), así como el material necesario (cobertura, tierra, grava, etc.).

Tabla 7: Perfil del depósito controlado

Variables consideradas		Opciones		Simulación	
Cota mínima del depósito controlado		Indicar		281 m	
Cota de rasante del depósito controlado		Indicar		316 m	
Fecha de inicio vertido de residuos* ¹		Indicar		01/01/2013	
ETAPA I					
Capa (C) / Barrera (B)	Textura	Superficie	Volumen	Tiempo	Cota* ³
Clausura	(Nº)	(m ²)	(m ³)	(meses)	(m)
C. Tierra vegetal	1	19.900	5.970	-	318
C. Tierra seleccionada	2	19.700	13.790	-	317
C. Drenaje de pluviales	3	19.500	5.850	-	317
C. Impermeable artificial	4	18.000	-	-	316
C. Cobertura final	5	18.000	9.000	-	316
C. Drenaje de gases	3	17.900	8.950	-	316

Explotación^{*3}

C. Residuos y cobertura	11	17.800	58.740	12	315
C. Residuos y cobertura	11	16.900	55.770	11	312
C. Residuos y cobertura	11	15.400	50.820	10	309
C. Residuos y cobertura	11	14.900	49.170	10	305
C. Residuos y cobertura	11	8.900	29.370	6	302
C. Residuos y cobertura	11	8.500	28.050	6	298
C. Residuos y cobertura	11	7.600	25.080	5	295
C. Residuos y cobertura	11	7.200	23.760	5	292
C. Residuos y cobertura	11	7.000	23.100	5	288
C. Residuos y cobertura	11	6.800	22.440	5	285

Construcción

C. Drenaje Lixiviados	3	6.800	3.400	-	282
C. Impermeable artificial	4	7.000	-	-	281
B. Geológica artificial	12	6.700	3.350	-	281

*1 La fecha de inicio del vertido permite estimar el flujo de lixiviado generado, todo ello en función de las condiciones climatológicas, de la geometría del depósito y del ritmo de llenado establecido durante la vida útil estimada.

*2 Las cotas de referencia permiten determinar la capa de residuos que alcanzará el nivel de rasante. Esta información es utilizada para considerar la evacuación de pluviales por escorrentía.

*3 Estas capas consideran toda la información introducida de las características de las celdas unitarias (EPA, 1993). Una celda incluye los propios residuos sólidos depositados y el material de cobertura (con 15 – 30 cm de espesor). Los valores de los espesores y de las superficies de cada capa permiten estimar la capacidad total y por etapas del depósito controlado.

- Datos de estimaciones por etapas: La información introducida en los epígrafes anteriores permite determinar el valor de la cota de fondo, cota máxima y capacidad total del depósito controlado por fases (construcción, explotación y clausura). Además de ello, se determina el año límite para finalizar la construcción del depósito controlado, y en base a ello, se determina el tiempo de explotación y el año previsto para iniciar la fase de clausura. (Tabla 7).

Tabla 7: Estimaciones por etapas

Etapa I ^{*1}	Cota		Capacidad	Vida útil del depósito controlado		
	C _{MIN}	C _{MAX}		6 años		
Clausura	315m	317m	39.980m ³	-	-	2018
Explotación	282m	315m	366.300m ³	-	2012-2018	-
Construcción	281m	282m	93.500m ³	2012	-	-

*1 La cota de fondo y cota máxima permite considerar escorrentía conectada al sistema de evacuación de pluviales cuando las celdas unitarias superan la cota de rasante. Este sistema permite reducir la cantidad de lixiviado generado si se ejecutan coberturas de arcilla provisionales que eviten que el agua de lluvia contacte con la masa de residuos.

3.3 Datos predicción de lixiviados

Las variables consideradas en los epígrafes anteriores permiten predecir el flujo de lixiviado generado durante la vida útil del depósito. El modelo de balance hídrico utilizado considera las variables definidas en las tablas anteriores, y en gran medida las contempladas en los modelos WBM y SWB.

Generalmente, en los modelos existentes la predicción del lixiviado se establece por simulación de su estructura en un momento determinado, sin considerar las modificaciones de sus variables por la continuidad del vertido de nuevos residuos. Así pues, este hecho requiere realizar simulaciones constantemente, principalmente por los cambios que experimenta la estructura del depósito durante la fase de explotación. La metodología propuesta en este trabajo ofrece una predicción del flujo de lixiviados realizando una única simulación. Las propiedades físicas de los residuos eliminados en el depósito, la población equivalente, la tasa de vertido estimada en función del tratamiento previo aplicado, las dimensiones de las celdas unitarias y del depósito diseñado determinan el lixiviado mensual generado por percolación a través de las celdas de residuos (Ecuación 1).

$$V_{LM1} = \left(\frac{T_{VR1} * P_{AB1} * D_{MS1}}{D_{VR1} * H_{VR1}} \right) * \left(P_{MM1} - E_{TM1} - E_{SC1} - \left(C_{CM1} - \frac{H_{IR1}}{100 - H_{IR1}} \right) * (D_{VR1} * H_{VR1} * (1 - 0,01 * H_{IR1})) \right) \quad (1)$$

	De donde*1	Unidades
V_{LM1}	Volumen de lixiviado mensual*1	L/mes
T_{VR1}	Tasa promedio de vertido diario	1,02 kg/hab·día
P_{AB1}	Población equivalente	159.117 hab
D_{MS1}	Número de días del mes*2	días
D_{VR1}	Densidad promedio de los residuos	1.000 kg/m ³
H_{VR1}	Altura de la celda unitaria	3,30 m
P_{MM1}	Precipitación media mensual*2	L/m ²
E_{TM1}	Evapotranspiración media mensual*2	L/m ²
E_{SC1}	Escorrentía promedio*3	L/m ²
H_{IR1}	Humedad inicial promedio de residuos*4	20 %
C_{CM1}	Capacidad de campo estimada residuos*4	0,96 kg _{H2O} /kg _{sec}

*1 Se estima el ritmo de llenado del depósito controlado y se calcula el flujo de lixiviado mensual considerando los factores indicados. La estructura del depósito controlado simulado presenta un sistema de evacuación del lixiviado a distintos niveles. Estos sistemas de evacuación secundaria enlazan aguas abajo con el colector principal.

*2 En función del mes se aplican los días correspondientes, así como los valores de pluviometría y evapotranspiración.

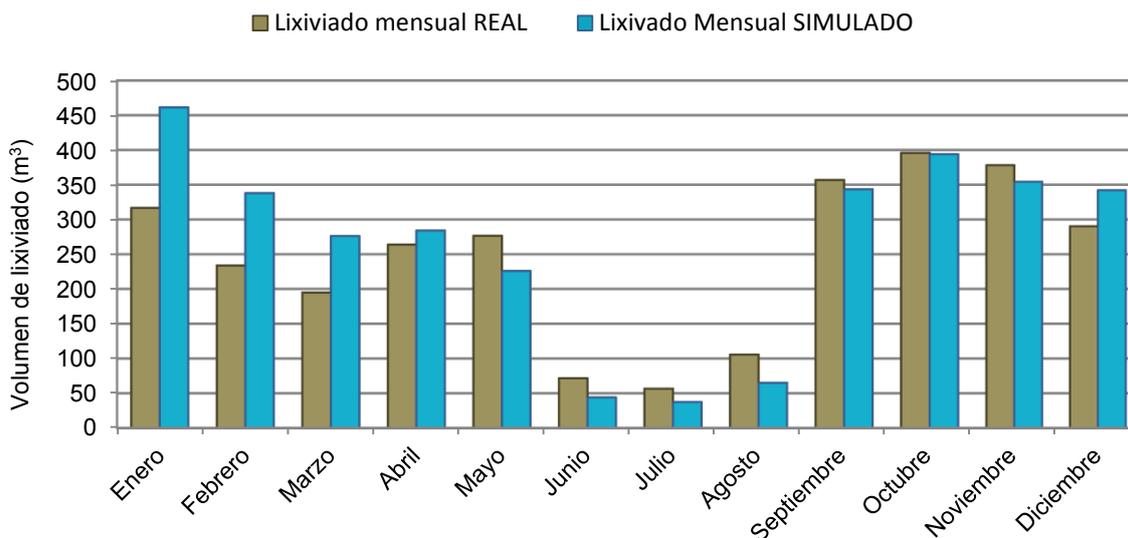
*3 La escorrentía generada se considera conectada por situarse la cota de explotación inferior a la cota de rasante. Así pues, la escorrentía generada sobre el frente de vertido se evacúa por el sistema de drenaje de lixiviados formando así parte del volumen total simulado.

*4 La humedad asignada a los rechazos y la capacidad de campo son valores representativos de las muestras analizadas en el laboratorio del grupo de investigación INGRES. La capacidad de retención de agua de los residuos caracterizados es del 85%. Este parámetro indica que el 15% del agua procedente de la lluvia, así como parte de la humedad del residuos acaba transformándose en lixiviado.

4. Resultados

La metodología de cálculo propuesta para este estudio ha sido validada con la información disponible del flujo de lixiviado mensual a lo largo del año 2013 de un depósito controlado de la Comunidad Valenciana. Para ello se han considerado las variables descritas en este trabajo y mediante la aplicación de la ecuación (Ecuación 1) se han obtenido los siguientes resultados (Figura 2):

Figura 2: Flujo de lixiviado mensual. Año 2013



Los resultados obtenidos tras la simulación estiman para el año 2013 una producción de 3.165,56 m³ de lixiviado frente a los 2.939,98 m³ obtenidos en la realidad. Esta simulación ofrece un incremento anual del 7,12% con respecto a los datos obtenidos. Las cifras de producción mensual real y las obtenidas son las siguientes:

Tabla 8: Flujo de lixiviado mensual. Año 2013

Flujo de lixiviado obtenido (m ³)											
Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
316,61	233,69	194,4	263,84	276,41	71,61	56,54	105,54	356,84	395,77	378,18	290,23
Flujo de lixiviado simulado (m ³)											
Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
461,39	337,96	276,23	284,07	225,86	43,94	37,35	64,94	343,47	393,93	354,27	342,14

La mayor aproximación obtenida tras la simulación se produce en septiembre (-3,74%), octubre (-0,46%) y noviembre (-6,32%). Por otra parte, la mayor variación se ha registrado en los meses de enero (45,73%), febrero (44,62%) y marzo (41,85%). La variación de los resultados obtenidos en la simulación y las cifras obtenidas en la realidad se deben asociar a la fluctuación de factores climáticos. La simulación considera datos promedio y los datos obtenidos del depósito atienden variaciones reales.

Estos aspectos deben ser considerados para conseguir desarrollar metodologías de cálculo más precisas, idóneas para continuar con el desarrollo de nuevas herramientas de cálculo destinadas a la optimización de la gestión de depósitos controlados.

5. Conclusiones

Este estudio permite determinar el flujo de lixiviado mensual de un depósito controlado. Esta metodología ha sido validada con la información facilitada por un depósito controlado de la Comunidad Valenciana. Para ello, se han considerado las modificaciones de los parámetros que influyen en la variación del flujo de lixiviado en función del tiempo (tasa de vertido, datos climáticos, estructura del depósito, etc.). En lo que refiere al diseño de la estructura del depósito controlado cabe indicar que la metodología planteada y diseñada en Excel® contempla:

- La simulación de depósitos controlados con hasta 4 etapas de división horizontal.
- La simulación de depósitos controlados con hasta 5 fases de división vertical por etapa.
- La simulación de depósitos controlados con de hasta 33 niveles de residuos por etapa.
- La simulación de depósitos controlados con una vida útil de hasta 99 años por etapa.
- La simulación del ritmo de llenado de depósitos controlados durante la vida útil estimada.
- Indicación de capacidad ocupada por residuos y capacidad disponible.

De este modo, se ha obtenido una metodología base que ofrece resultados alentadores para continuar con el desarrollo de metodologías más complejas, las cuales podrían incorporar nuevos fenómenos que se calibrarán con futuras simulaciones, entre ellos:

- Existencia de zonas no saturadas y de vías preferenciales.
- Variación demográfica de los municipios atendidos durante la vida útil del depósito.
- Variación de la tasa de generación durante la vida útil del depósito.
- Influencia del turismo durante determinados meses del año.
- Incorporación de Mejores Técnicas Disponibles para mejorar la gestión de la escorrentía superficial y minimizar la cantidad de lixiviados generados.

Las herramientas de cálculo actuales realizan esta predicción para un momento determinado del depósito sin considerar la modificación de la estructura del depósito por la eliminación de nuevos residuos. Así pues, la metodología que se ha descrito puede constituir una base adecuada para la simulación del flujo de lixiviados a nivel de anteproyecto, considerando todas las modificaciones estructurales y sin necesidad de recurrir a múltiples simulaciones.

6. Referencias bibliográficas

- Agostini, F., Sundberg, C. & Navia, R. (2012). *Is biodegradable waste a porous environment?. A review*. Waste Management & Research, 30(10) 1001–1015
- Al-Thani, A.A., Beaven, R.P. & White, J.K. (2004). *Modelling flow to leachate wells in landfills*. Waste Management, 24(3), pp. 271-276
- Bengtsson, L., Bendz, D., Hogland, W., Rosqvist, H. & Akesson, M. (1994). *Water balance for landfills of different age*. Journal of Hydrology 158, pp. 203-217
- Bou-Zeid, E. & El-Fadel, M. (2004). *Parametric sensitivity analysis of leachate transport simulations at landfills*. Waste Management 24(7), pp. 681-689
- Cossu R & Raga R (2008). *Test methods for assessing the biological stability of biodegradable waste*. Waste Management 28, pp. 381–388.
- El Fadel, M., Findikakis, A.N. & Leckie, O. (2010). *Modeling leachate generation and transport in solid waste landfills*. Environmental Technology, 18. pp. 669-686
- Fellner, J & Brunner P.H. (2010). *Modeling of leachate generation from MSW landfills by a 2-dimensional 2-domain approach*. Waste Management 30(11) pp. 2084–2095
- Fenn D. G., Hanley K. J. & Degeare. U.S Environmental Protection Agency, (1975). “*Use of the water balance method for predicting leachate T. V. generation from solid waste disposal sites*”. p. 3-35.
- Gallardo, A., Bovea, MD., Prades, M., Colomer, FJ, & Carlos M. (2010) *Comparison of different collection systems for sorted household waste in Spain*. Waste Management, 30 pp. 2430-2439.
- Gallardo, A., Bovea, MD., Prades, M. & Colomer, FJ (2012) *Analysis of collection systems for sorted household waste in Spain*. Waste Management, 32 pp. 2383-2395.
- Jain, P., Powell, J., Townsend, T., & Reinhart, D. (2006). *Estimating the Hydraulic Conductivity of Landfilled Municipal Solid Waste Using the Borehole Permeameter Test*. J. Environ. Eng., 132(6), 645–652.
- Lopez, A., Cobo, N., Tejero, I., & Lobo, A. (2008). *Simulación de un vertedero dentro de la evaluación de las alternativas de gestión de RSU*. Proceedings I Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos. Castellón.
- Orta M. T., Cruz R., Rojas N., Monje I., Sanchez J. (2003). *Serial wáter balance method for predicting leachate generation in landfills*. Waste Management & Research, p. 127-136.
- Rowe, K., Nadarajah, P. (1996). *Estimating leachate drawdown due to pumping wells in landfills*. Journal of Canadian Geotechnical, 33, pp. 1–10.

