

# MEMORIA

---

# **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS**



## ÍNDICE DEL CAPÍTULO

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1-1
1.1. Los vertederos de residuos urbanos.....	1-1
1.2. Antecedentes del trabajo .....	1-5
1.3. Objetivos .....	1-7
1.4. Estructura del trabajo .....	1-8
1.5. Referencias .....	1-10

# 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1. LOS VERTEDEROS DE RESIDUOS URBANOS

Un vertedero de residuos es “una instalación para eliminación de residuos mediante su depósito subterráneo o en superficie” (R.D. 1481/2001).

Tradicionalmente las basuras domésticas y residuos urbanos en general han sido abandonados directamente en lugares más o menos próximos a las poblaciones. Estas prácticas han dado lugar a numerosos problemas ambientales que se agravan al aumentar la cantidad de residuos y complicarse su naturaleza.

Los residuos sólidos abandonados sufren procesos de degradación que se extienden durante décadas y pueden dar lugar a grandes contaminaciones de agua, suelo y aire. En vertederos de residuos urbanos, gran parte de estos impactos son resultado de la presencia de materia orgánica que va siendo degradada por microorganismos a lo largo del tiempo. Como consecuencia de estos fenómenos el agua infiltrada en la masa de residuos arrastra componentes orgánicos no estabilizados y otras sustancias que se disuelven, generándose además gas y calor. La emisión de este gas, formado principalmente por metano y dióxido de carbono, a la atmósfera puede contribuir al efecto invernadero y la destrucción de la capa de ozono (por la presencia de hidrocarburos orgánicos volátiles clorados y fluorados) y generar molestias locales por olores. Además algunos compuestos orgánicos volátiles presentes en cantidades traza son altamente tóxicos. Por otra parte las sustancias arrastradas por el lixiviado, orgánicas o no (como metales pesados ó sales), según dónde llegue su influencia, pueden contaminar los terrenos circundantes al vertido y las aguas superficiales y subterráneas. Por otro lado el calor puede provocar incendios por combustión espontánea del residuo.

Para evitar estos efectos, y otros que afectan directamente a la salud humana, como la proliferación de vectores sanitarios (insectos, pájaros, roedores), en torno a los depósitos de basuras, a mediados del siglo pasado comenzaron a establecerse medidas de protección y control de estos emplazamientos. Estas medidas han ido extendiéndose junto con la conciencia ambiental en las sociedades más desarrolladas, hasta plasmarse recientemente en una extensa normativa sobre gestión de los residuos.

En Europa las directrices sobre protección del medio ambiente frente a los impactos de la acumulación de residuos en vertederos se recogen en la Directiva 1999/31/CE, transpuesta al ordenamiento español en el Real Decreto 1481/2001. Se distinguen tres categorías de vertedero (de residuos peligrosos, no peligrosos e inertes) y se establecen los requisitos exigibles a cada uno de los mismos en materia de protección y seguimiento ambiental.

Estos documentos se enmarcan en las nuevas políticas de gestión de residuos desarrolladas en los países más industrializados, que dan prioridad a cualquier tipo de aprovechamiento relegando el vertido a la última posición entre las alternativas de gestión de los residuos urbanos. A pesar de ello, la explotación y conservación en condiciones ambientalmente adecuadas de los vertederos continuará siendo motivo de interés durante largo tiempo. Tras cualquier tipo de aprovechamiento del residuo original (reutilización, reciclaje, compostaje o recuperación de energía) es inevitable un rechazo que ha de ser depositado en condiciones de seguridad para la salud humana y el medio ambiente. Por otro lado no se puede olvidar que en países donde no existe tanta presión sobre el suelo disponible el vertido es la alternativa de disposición final preferida para los residuos no recuperables. Estas circunstancias impiden la desaparición de los vertederos de residuos sólidos, cuya clausura, por otra parte, no implica tampoco olvidar su control y gestión: puede ser precisamente en esa fase en la que sea necesario adoptar medidas de protección ambiental más importantes. Pruebas de la importancia ambiental de estas últimas etapas en el ciclo de vida del vertedero son las exigencias recogidas en el Real Decreto mencionado, que establece períodos de vigilancia post-clausura “que deberán ser fijados por la autoridad competente teniendo en cuenta el tiempo durante el cual el vertedero pueda entrañar un riesgo significativo para la salud de las personas y el medio ambiente. En ningún caso dicho plazo podrá ser inferior a treinta años”.

El control de las emisiones del vertedero que se propone en la normativa implica su emplazamiento en lugares donde se minimice el impacto y la aplicación de medidas correctoras que eviten daños ambientales graves. Para proteger el suelo y los cursos de agua se combinan “barreras geológicas” y revestimientos artificiales impermeables extendidos en todo el vaso de vertido (la base y los lados del depósito), sobre los que se dispone un sistema de recogida y evacuación a tratamiento de los lixiviados. Se construyen cunetas perimetrales y otros elementos que impidan la penetración en el residuo de aguas superficiales o subterráneas y capas de cobertura impermeable, así como redes de captación y gestión (con aprovechamiento o no) del biogás generado.

El objetivo de estos sistemas de protección es fundamentalmente aislar el vertedero para evitar la entrada de agua exterior, que favorece la degradación y da lugar al lixiviado y la salida de contaminantes. Pero estas medidas no resuelven el problema por completo. Cualquier aporte de humedad (por impermeabilización inexistente, defectuosa o por aparición de grietas en la misma, lo cual es habitual al envejecer los materiales) reanuda los procesos de biodegradación que, como se ha señalado, son los responsables principales de la contaminación en el vertedero.

Por eso hoy en día se buscan técnicas que permitan mejorar la gestión medioambiental de los vertederos tanto durante su explotación como en el período post-clausura. En los últimos años han surgido soluciones alternativas al tradicional confinamiento de la masa de residuos para desactivar el problema y no trasladarlo a generaciones futuras. Entre las soluciones diseñadas destacan las que plantean una aceleración controlada del proceso de biodegradación hasta conseguir la estabilización del residuo. Este aumento de la velocidad de consumo de la materia orgánica por parte de los microorganismos puede lograrse aireando artificialmente la masa de residuos o bien asegurando unas condiciones adecuadas de humedad en todo momento por recirculación del propio lixiviado. En el primer caso se favorecen las reacciones aerobias frente a las anaerobias que se producen normalmente. En el segundo se acelera la degradación anaerobia manteniendo las condiciones óptimas para la descomposición de los residuos. Además el agua en cierta cantidad produce un efecto de lavado por arrastre de los contaminantes de los residuos, que de otra manera seguirán presentes en el lugar. Estas prácticas pueden realizarse durante la explotación del área de vertido o como medidas de biorrecuperación en vertederos abandonados o clausurados. Hoy en día son cada vez más comunes en ambas situaciones. El hecho de que las normativas empiecen a exigir a las entidades explotadoras que se hagan cargo (técnica y sobre todo económicamente) de la fase post-clausura, ha impulsado estas iniciativas.

Los sistemas clásicos de control del impacto del vertedero en el entorno han sido tradicionalmente diseñados mediante criterios dictados por la experiencia y con la ayuda de modelos simplificados basados en balances hidrológicos a gran escala. No se abordaba, por ejemplo, el estudio del efecto de los sistemas instalados en el vertedero en sus distintas etapas de actividad, o la optimización del diseño en función de los cambios a lo largo del tiempo. En cuanto a las medidas de protección “sostenible” en desarrollo suelen ser proyectadas de una forma tentativa (método de

ensayo – error) pues apenas existen experiencias previas que sirvan de base para una estandarización en los cálculos.

Ante esta situación, como en muchos otros campos de la ingeniería, se acude a la modelización para el estudio de los procesos del vertedero. Si se dispone de una representación matemática de la masa de residuos que permita predecir la respuesta ante distintos diseños, acciones y medidas de recuperación será más sencillo proyectarlas, prevenir su impacto sobre el medio circundante y realizar su seguimiento. Pero para ello es preciso conocer en profundidad los fenómenos de interés y este caso es especialmente complejo por la heterogeneidad de cada vertedero, la cantidad de factores que intervienen, la diferencia entre unas instalaciones y otras. Por eso hoy en día, frente a otros campos de la ingeniería y en particular de su rama ambiental, no se dispone de un modelo de uso generalizado en el diseño, explotación y seguimiento de los vertederos de residuos urbanos.

Los primeros esfuerzos de modelización en este sentido se centraron en tratar de predecir, por un lado las condiciones de generación de lixiviados para prevenir la contaminación de recursos hidrológicos cercanos, y por otro la producción de biogás, buscando optimizar su aprovechamiento energético. Así se ha llegado a programas de simulación hidrológica de gran uso, como el HELP (Schroeder *et al.*, 1994) y a diversas expresiones matemáticas de predicción de la generación de gas aplicables específicamente en las instalaciones para las que fueron creadas. En otra dirección aparecieron modelos de asentamientos de la masa de residuos útiles en vertederos concretos, pero no generalizados (es el caso del modelo “Meruelo” [Arias, 1994]). Todos estos planteamientos abordan los fenómenos, en realidad interrelacionados, de manera independiente, tratando de simplificar el problema. Sólo a comienzos de este siglo aparecen trabajos sobre modelos “integrados” del vertedero [White *et al.* (2001); Hanel *et al.* (2001), Lobo *et al.* (2002a y 2002b)] que simulan, a partir de una representación ideal del mismo, las distintas manifestaciones a que dan lugar los procesos hidráulicos y de descomposición del residuo (generación de gas y lixiviado, su contaminación, incremento de temperaturas, asentamiento de la masa). Se trata de programas que todavía están en fase de desarrollo y no han sido contrastados por aplicación generalizada en distintos casos reales. En este contexto se desarrolla “MODUELO”.

## 1.2. ANTECEDENTES DEL TRABAJO

En el marco del Convenio de Colaboración entre la Universidad de Cantabria y la Diputación Regional de Cantabria titulado “Diseño de Programas de Gestión de los Residuos Sólidos en Cantabria” (1998) el Grupo de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Cantabria comenzó el desarrollo de “MODUELO: modelo hidrológico, biológico y de producción para el diseño de vertederos”. El modelo, programado en C++, se planteó como herramienta para la gestión y seguimiento de vertederos con características similares al de Meruelo (Cantabria). Se trata de un modelo global del vertedero de residuos urbanos que simula dinámicamente la entrada y disposición de los residuos, y los fenómenos hidrológicos y de biodegradación que suceden en el mismo. A partir de datos meteorológicos, de producción de residuos y diseño y planificación del relleno sanitario, estima los volúmenes de lixiviado producidos a lo largo del tiempo, y la contaminación orgánica disuelta y el gas generados en la degradación biológica de la materia orgánica.

La versión inicial (denominada en lo que sigue MODUELO 1) representa los fenómenos con modelos elementales tomados directamente de la literatura e incorporando “parámetros de calibración” que no tienen interpretación física directa y por tanto tampoco posibilidad de comprobación experimental. Aun así se realizaron varias calibraciones de MODUELO 1 cuyo resultado fue esperanzador. La aplicación base para el desarrollo de la primera versión del programa fue en Meruelo I, primera fase (1989-1990) del vertedero de Meruelo [Herrero y Montero (1999) y Lobo *et al.* (2002 y 2003)]. En estos dos últimos trabajos, cada uno de los cuales describe una parte del modelo y su primera aplicación, se concluye la necesidad de incorporar la escorrentía superficial como fenómeno que aumenta los caudales de lixiviado y, entre otros modelos que permitan simular la estabilización del residuo (como el de variación de la temperatura, recirculación de lixiviados o el movimiento de los gases generados en el seno del residuo), la generación de gases en las etapas intermedias de descomposición.

Seguidamente Dupuy (2000) modelizó la experiencia de laboratorio descrita por Rodríguez (1999) (degradación de residuos urbanos en condiciones controladas dentro de un lisímetro) y la clausura de un vertedero de residuos en Galicia. Ambos fueron trabajos de calibración del modelo para contrastarlo en distintas aplicaciones reales. En la calibración con los resultados de laboratorio se consiguió aproximar adecuadamente el volumen de biogás generado a lo largo del tiempo, pero no su



composición. Del volumen y contaminación del lixiviado sólo pudo aproximarse la forma de las curvas de aparición (máximos y tiempo de presentación de los mismos) por falta de datos experimentales. En cuanto a la aplicación de campo se trataba simplemente de una simulación de las emisiones del vertedero a clausurar a partir de una calibración con datos puntuales del momento de sellado. De nuevo las curvas emisión – tiempo parecían reproducir aproximadamente las tendencias generales observadas en otras instalaciones, pero Dupuy (2000) detectó varios problemas en MODUELO 1, además de plantear algunas sugerencias para mejorar la operatividad del mismo (modificación de los ficheros de discretización del terreno, de la presentación de resultados, etc.). En lo que afecta a los modelos desarrollados se observó que el flujo vertical en celdas sin cobertura era calculado con los mismos parámetros independientemente del tipo de celda de que se tratase, que se obtenían concentraciones de DBO y DQO en el lixiviado y caudales de biogás negativos e inestabilidades en el cálculo de concentraciones.

El siguiente trabajo de aplicación del programa fue presentado por Lobo *et al.* (2001a y 2001b) y, junto con una descripción general de las tendencias en modelización de vertederos, en Lobo *et al.* (2002c). Se trataba de un análisis teórico de distintas opciones de clausura del vertedero Meruelo I: mediante impermeabilización total con riesgo de fallo de la cobertura al cabo de cierto tiempo, mediante cubierta con material de tipo margo-arcilloso como el del vaso y mediante estabilización previa con mantenimiento de altos niveles de humedad en el residuo. A pesar de que se detectaron las mismas dificultades que en Dupuy (2000) el programa reprodujo como se esperaba el tipo de respuesta ante las distintas actuaciones. Sin embargo aunque las tendencias en las emisiones eran “lógicas” las concentraciones de contaminantes que seguían apareciendo con el lixiviado a largo plazo eran excesivas.

La última aplicación práctica de la primera versión fue basada en la segunda fase de explotación del vertedero de Meruelo (Loddo, 2001), para la que se realizó una calibración y un análisis de sensibilidad de los parámetros hidrológicos. Esta autora detectó una gran sensibilidad del modelo a los parámetros de calibración “radio de influencia horizontal” y “radio de influencia horizontal por frente”, que no tenían ninguna correspondencia con propiedades hidráulicas reales. Además encontró la necesidad de incorporar las infiltraciones a través del vaso para ajustar el modelo. Como recomendaciones finales sugería que el módulo de generación de datos meteorológicos, basado en la simple copia de años anteriores, fuera sustituido por otro

con fundamento estadístico, y que se facilitase la introducción de datos, tanto meteorológicos como de caracterización del vertedero. En los resultados de contaminación se confirma la aparición de resultados negativos que no tienen sentido.

Un denominador común de todos estos trabajos es la ausencia de una revisión bibliográfica completa sobre el tema. Así los modelos incluidos en MODUELO 1 no quedaban suficientemente fundamentados y no se disponía de referencias iniciales para los valores paramétricos a emplear en cada nueva aplicación.

Entre enero de 2001 y hasta mayo de 2003 el Grupo de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Cantabria ha trabajado en el Proyecto 2000/032 “Desarrollo de una herramienta para la gestión y biorrecuperación de los suelos contaminados por vertederos de residuos sólidos urbanos”, que dio lugar a MODUELO 3. En esta versión del programa se incorporan modelos de recirculación del lixiviado (incluyendo las estrategias de tratamiento previo del mismo), filtración a través del vaso de vertido, de cálculo del flujo hidráulico en zona no saturada, de variación de la temperatura en el vertedero y su influencia en la biodegradación y del asentamiento de la masa de residuos. Además se resuelven varios problemas de aplicación del programa. Los nuevos modelos se desarrollaron a partir de revisiones bibliográficas pormenorizadas, adaptando en ocasiones expresiones matemáticas probadas en otros campos (como el del flujo en el terreno). Hasta la fecha no se han realizado aplicaciones de MODUELO 3. Queda por contrastar prácticamente los modelos incorporados y solucionar los problemas que surjan en su aplicación.

El trabajo que se presenta en esta memoria ha dado lugar a MODUELO 2, versión intermedia entre las dos descritas arriba. Los objetivos planteados se describen en el próximo apartado.

### **1.3. OBJETIVOS**

El objetivo de este trabajo es modificar los modelos incluidos en la primera versión de MODUELO para que éste constituya una herramienta de utilidad en análisis y seguimiento de la contaminación producida en vertederos de residuos urbanos y establecer las bases para su empleo en diseño y diagnóstico de los mismos.

Para ello se establecen los siguientes objetivos parciales:

.- Puesta a punto de MODUELO 2, versión mejorada de MODUELO 1, mediante planteamiento de los modelos matemáticos necesarios, desarrollo de los algoritmos y comprobación de su funcionamiento en el programa.

.- Evaluación de la aplicabilidad de MODUELO 2 por simulación de casos reales a partir de datos existentes:

- . Calibración y validación de modelos de vertederos reales.
- . Evaluación del submodelo hidrológico por comparación con otros programas.
- . Análisis de sensibilidad del submodelo de biodegradación.

## **1.4. ESTRUCTURA DEL TRABAJO**

Este trabajo se ha estructurado en dos bloques: memoria y anejos. La memoria a su vez se subdivide en ocho capítulos, cuyo contenido se describe brevemente a continuación.

### **Capítulo 1. Introducción y objetivos.**

Es el capítulo en que se inscribe este apartado. Pretende introducir al lector en el tema de investigación abordado haciendo una presentación general del mismo y de sus antecedentes, enumerando sus objetivos y describiendo la configuración del documento que se presenta.

### **Capítulo 2. Modelos hidrológicos y de biodegradación del vertedero.**

Resume el estado actual de las investigaciones sobre los fenómenos hidrológicos y de biodegradación en los vertederos de residuos urbanos y su modelización.

El capítulo comienza presentando los trabajos realizados por otros autores para la creación de programas de simulación que incluyan estos fenómenos. Los apartados siguientes se centran en los modelos de cada uno de ellos: los modelos hidrológicos y los de biodegradación. Entre los primeros se describen primero los trabajos sobre el balance hidrológico superficial y después los dedicados al flujo en el interior del residuo. El punto dedicado a modelos de biodegradación presenta a su vez la

caracterización de la biodegradabilidad del residuo por un lado y los procesos de descomposición por otro.

En cada punto se describe el fenómeno estudiado para luego presentar los trabajos de modelización revisados.

### **Capítulo 3. Modelos incluidos en el programa MODUELO 1.**

En este capítulo se presentan los modelos que han sido la base para el desarrollo de MODUELO 2. Comienza con una descripción general del programa y de los bloques de introducción de datos (de producción de residuos, de terreno y de clima). Seguidamente se presentan los modelos hidrológico y de biodegradación, finalizando con la enumeración de los aspectos mejorados en el trabajo.

### **Capítulo 4. Modelo propuesto.**

Se presentan y justifican las modificaciones propuestas para el modelo anterior, y que dan lugar a MODUELO 2. Como en el capítulo anterior se incluyen primero los modelos hidrológicos (balance superficial, flujo en el interior del vertedero y representación del sistema de drenaje) y después los de biodegradación (definición de la biodegradabilidad del residuo y procesos de descomposición biológica).

### **Capítulo 5. Comparación con otros modelos hidrológicos de simulación.**

En este capítulo se presenta la evaluación del modelo hidrológico propuesto por comparación con otros modelos de simulación: el de uso más común en simulación hidrológica de vertederos, HELP (Schroeder *et al.*, 1994) y la versión anterior del programa MODUELO (MODUELO 1). Los tres modelos se aplican al vertedero Meruelo I (Cantabria) y se comparan los resultados de simulación para extraer conclusiones sobre la aplicabilidad del nuevo modelo.

### **Capítulo 6. Evaluación del modelo de biodegradación. Calibración y análisis de sensibilidad.**

Previa a la aplicación completa de MODUELO 2 en un caso real, y una vez probado el modelo hidrológico, se presenta la comprobación de la aplicabilidad del modelo de biodegradación en un caso real, como es el de Meruelo I. El modelo de biodegradación de este vertedero se calibra en base a una serie de datos de campo

disponible y a referencias publicadas por otros autores sobre tendencias generales en las emisiones de vertederos.

Se muestran también en este capítulo los resultados del análisis de sensibilidad del modelo de biodegradación, realizado con el modelo de Meruelo I.

### **Capítulo 7. Aplicación a un caso real. El vertedero “X”.**

Finalmente se presenta una aplicación completa del programa MODUELO 2 a un vertedero europeo cuyo organismo gestor ha preferido que no sea identificado en este trabajo, motivo por el cual se ha optado por denominarlo “X”. A partir de información suministrada por dicho organismo se configura el modelo del vertedero. Con series de datos de caudal medio diario de lixiviado entre enero de 1999 y diciembre de 2000 se calibra el modelo hidrológico, cuyo resultado se comprueba con la serie de caudales entre enero de 2001 y mayo de 2002. Del mismo modo se procede con el modelo de biodegradación, a partir de las series de medidas puntuales de contaminación en el lixiviado y de energía producida a partir del biogás extraído.

Los resultados obtenidos en cada caso permiten extraer conclusiones sobre la aplicabilidad de MODUELO 2 y recomendaciones para su mejora.

### **Capítulo 8. Conclusiones, recomendaciones y consideraciones finales.**

## **1.5. REFERENCIAS**

ARIAS, A. (1994). *Modelo de asentamientos de vertederos controlados de residuos sólidos urbanos*. Tesina de Máster en Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Dpto. CC. y TT. del Agua y el Medio Ambiente. Universidad de Cantabria.

Directiva 1999/31/CE del Consejo, de 26 de abril, relativa al vertido de residuos. (DOCE L N°182, de 16-7-1999).

DUPUY, P. (2000): Simulación de producción de lixiviados en vertederos basado en MODUELO. Tesina de Máster en Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Dpto. CC. Y TT. del Agua y Medio Ambiente. Universidad de Cantabria.

HANEL, J.; DINKLER, D. y AHRENS, H. (2001). “Coupled processes of waste degradation, gas and leachate transport in municipal landfills”. Actas del congreso “Sardinia 2001, Eighth International Waste Management and Landfill Symposium”. CISA, Centro de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Cagliari, Italia.

- LOBO A.; ESTEBAN L.; DOMÍNGUEZ B.; MUÑOZ J. y TEJERO I. (2001a). "Reducción de la vida de vertederos mediante biorrecuperación". Actas del "VII Congreso de Ingeniería Ambiental". Bilbao, pp. 149-155.
- LOBO A.; ESTEBAN L.; DOMÍNGUEZ B.; MUÑOZ J. y TEJERO I. (2001b). "Reducción de la vida de vertederos mediante biorrecuperación". Revista Técnica de Medio Ambiente, 81, pp. 57-67.
- LOBO, A.; HERRERO, J.; MONTERO, O.; FANTELLI, M. y TEJERO, I. (2002a). "Modeling for Environmental Assessment of Municipal Solid Waste Landfills (Part 1: Hydrology)". Waste Management and Research, 20(2), pp. 198 – 210.
- LOBO, A.; HERRERO, J.; MONTERO, O.; FANTELLI, M. y TEJERO, I. (2002b). "Modeling for Environmental Assessment of Municipal Solid Waste Landfills (Part 2: Biodegradation)". Waste Management and Research, 20(6), pp. 514 – 528.
- LOBO, A.; TEJERO, I.; SÁNCHEZ, M. M.; ESTEBAN, L.; MONTERO, O. y HERRERO, J. (2002c). "Nuevas Herramientas de Predicción para el control ambiental de vertederos de residuos urbanos." Actas del Congreso "I Jornadas Nacionales sobre Innovación y Nuevas Tecnologías en la Ingeniería Civil". Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, 4 y 5 diciembre.
- LODDO, A. (2001). *Análisis del modelo MODUELO de simulación hidrológica y de degradación biológica en vertedero. Aplicación al caso de Meruelo*. Proyecto fin de carrera. Dpto. Ciencias y Técnicas del Agua y Medio Ambiente. Universidad de Cantabria.
- Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero. Ministerio de Medio Ambiente. (BOE N°5, 29 de enero de 2002).
- RODRÍGUEZ IGLESIAS, J. (1999). *Digestión anaerobia de residuos sólidos urbanos en planta piloto*. Tesis doctoral. Universidad de Oviedo.
- SCHROEDER, P. R.; DOZIER, T. S.; ZAPPI, P. A.; McENROE, B. M.; SJOSTROM, J. W. y PEYTON, R. L. (1994). *The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model. Engineering documentation for version 3*. EPA/600/r-94/168b. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, Estados Unidos.
- WHITE, J.; ROBINSON, J. y REN, Q. (2001). "A framework to contain a spatially distributed model of the degradation of solid waste in landfills". Actas del congreso "Sardinia 2001, Eighth International Waste Management and Landfill Symposium". CISA, Centro de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Cagliari, Italia. pp. 109 –118.