

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Dpto. de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente

TESIS DOCTORAL

Desarrollo de MODUELO 2: herramienta para la evaluación de la contaminación
producida en vertederos de residuos sólidos urbanos

Directores:

Iñaki Tejero Monzón

Javier Temprano González

Amaya Lobo García de Cortázar
Santander, Octubre 2003

A Pasguas

AGRADECIMIENTOS

Quiero mostrar mi gratitud hacia todas las personas e instituciones cuyo apoyo y colaboración han hecho posible este trabajo.

Me gustaría agradecer especialmente su colaboración a:

Maria del Mar Sánchez Román

Iñaki Tejero Monzón y Javier Temprano González

Empresa de Residuos de Cantabria S.A. y en particular a María Fantelli Lamia

El organismo gestor del vertedero "X" y en particular a los técnicos encargados de la explotación del mismo

Los Ministerios de Ciencia y Tecnología y Medio Ambiente. Parte de este trabajo se ha desarrollado en el marco del Proyecto 2000/023 del Plan Nacional de Medio Ambiente.

RESUMEN

En esta tesis se desarrolla una nueva versión de MODUELO, programa de simulación dinámica de vertederos de residuos urbanos en que viene trabajando desde 1998 el Grupo de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Cantabria.

El programa permite, a partir de datos topográficos, meteorológicos, de caracterización del residuo vertido y de explotación del vertedero, estimar la contaminación emitida en el lixiviado y como biogás. Para ello se crea una representación tridimensional del vertedero discretizado en capas formadas por celdas cuadradas, sobre la que se reproduce el historial de vertido. El modelo se estructura en dos módulos principales: el "hidrológico" y el de "degradación del residuo". El primero calcula horariamente el balance superficial, el intercambio de humedad entre las celdas y la cantidad de agua que llega a las conducciones de lixiviado. Como resultado estima el volumen diario de lixiviado y establece las condiciones de humedad en cada celda, que sirven de dato al módulo de degradación. En este módulo se calcula la contaminación producida por biodegradación de la materia orgánica del residuo. Sus resultados son las cargas de contaminantes orgánicos biodegradables y no biodegradables en el lixiviado, las concentraciones de DQO y DBO, y el volumen y composición del biogás generado diariamente.

Los modelos incluidos en MODUELO son simplificaciones o adaptaciones a la representación del vertedero, elegidas de expresiones publicadas por otros autores sobre los distintos fenómenos que aborda. En esta tesis se presenta una nueva versión, MODUELO 2, en la que se solucionan varios aspectos mejorables detectados en las aplicaciones a distintos casos de la primera versión (MODUELO 1). Ahora se incluye el recuento de la escorrentía superficial conectada a la red de recolección de lixiviados, el modelo de flujo saturado corregido, una expresión que considera la variación de la permeabilidad con la sobrecarga y nuevos modelos en el balance superficial, de cálculo del flujo hacia los drenes y de biodegradación del residuo.

Para probar la incorporación en el programa MODUELO 2 de los nuevos algoritmos y su aplicabilidad a casos reales se han simulado dos vertederos modélicos en cuanto a su gestión y seguimiento: Meruelo I (Cantabria) y otro vertedero europeo cuyo organismo gestor prefiere que permanezca no identificado, motivo por el cual se ha denominado "X" en este trabajo.

Los resultados de simulación hidrológica de Meruelo I con MODUELO 2 reproducen más adecuadamente los caudales de lixiviado infiltrado medidos en ese vertedero entre marzo y octubre de 1990, en comparación con los modelos HELP y

MODUELO 1. La serie de lluvias disponible, que no es completa, no permite alcanzar la misma aproximación a los caudales totales, debido a la importancia que tiene la penetración de aguas de lluvia en la red de evacuación.

Con la parte hidrológica calibrada se comprueba el nuevo modelo de biodegradación contrastando sus resultados con los datos obtenidos en Meruelo I durante el mismo período y las tendencias generales que siguen distintas emisiones en vertederos según lo publicado por distintos autores. Se presenta además un análisis de sensibilidad a los parámetros de biodegradación, en el que se concluye que los que más influencia tienen sobre los resultados de producción de contaminación disuelta y biogás son las constantes de hidrólisis.

Probada la aplicabilidad de la estructura teórica de MODUELO 2 se realiza el modelo del otro vertedero, cuyos resultados se comparan con los datos medidos en el período enero de 1990 – mayo 2002. La simulación de este vertedero muestra la infiltración de gran parte de la escorrentía superficial procedente de las superficies adyacentes de su misma cuenca además de la lluvia caída directamente sobre las celdas de vertido. El régimen de lixiviados está marcado también por la penetración directa de aguas de lluvia en el sistema de evacuación y la presencia de corrientes subterráneas.

Con la simulación completa de X se aproxima adecuadamente la evolución de los flujos de N-NH_4^+ y NTK, pero no la de DBO y DQO, debido probablemente a la falta y calidad de los datos disponibles y a la necesidad de emplear series más largas para la calibración de los parámetros. Se obtienen velocidades de degradación menores que en Meruelo I que pueden ser debidas en parte a la forma de explotación, en celdas aisladas de poca profundidad, y fundamentalmente a la mayor cantidad de materiales inertes vertidos, que retrasan la colonización del residuo orgánico por parte de la biomasa descomponedora. La estimación del biogás generado, en comparación con los datos de producción de energía con el biogás captado, permite evaluar las pérdidas del mismo.

Los modelos obtenidos para ambos vertederos son bastante aproximados pero la limitación en la cantidad y calidad de los datos disponibles compromete su validación. Esto evidencia la necesidad de disponer de registros de datos “adaptados a la modelización” en los que las medidas se tomen en consonancia con los resultados a obtener por el modelo (analizar muestras integradas en lugar de puntuales si el modelo estima valores diarios, por ejemplo) y se detallen al máximo las prácticas de explotación. Sólo así los modelos de vertederos pueden convertirse en herramientas útiles para el diseño, gestión y seguimiento de los vertederos.

PRÓLOGO

El trabajo de investigación que se presenta en este documento forma parte de los estudios que desarrolla el Grupo de Ingeniería Ambiental del Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y Medio Ambiente de la Universidad de Cantabria en su línea de investigación sobre residuos. El tema abordado es el de los vertederos de residuos urbanos, en concreto su modelización. A lo largo del período de formación de la autora se realizaron varios trabajos en relación con estos temas. Los documentos a que dieron lugar se presentan a continuación.

Grupo de Ingeniería Ambiental (1998). “Diseño de Programas de Gestión de Residuos Sólidos en Cantabria” Informe Final (VI tomos). Santander, Convenio entre la Diputación Regional de Cantabria y la Universidad de Cantabria.

LOBO, Amaya; TEJERO, Iñaki e IZAGUIRRE, Jon Koldo (1999). “Gestión integral de los residuos orgánicos para un desarrollo sostenible. Aproximación holística a la gestión comarcal de los residuos sólidos orgánicos” en *1er Concurso Fundación Agbar: Tecnologías para el Desarrollo Sostenible. Trabajos finalistas*. Can Serra, Cornellà de Llobregat, Fundación Agbar.

SUÁREZ, Begoña; LOBO, Amaya; SÁNCHEZ Concepción y TEJERO Iñaki (2000). “Estimación de la producción de residuos peligrosos domésticos. Base para el diseño de programas específicos de gestión” en *Jornadas Internacionales de Ingeniería Ambiental, 99ICEE. Libro de Resúmenes*. 9 – 10 de septiembre de 1999, Cartagena, Universidad de Murcia. Servicio de Publicaciones. pp 231- 232.

DUPUY, Paul-Henry (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. Dirigida por **Amaya Lobo** e Iñaki Tejero Monzón.

LOBO Amaya; ESTEBAN Lorena; DOMÍNGUEZ Belén; MUÑOZ Jaime y TEJERO Iñaki (2001). “Reducción de la vida de vertederos mediante biorrecuperación”. Actas del “VII Congreso de Ingeniería Ambiental”. 27 de febrero – 2 de marzo de 2001, Bilbao, pp. 149-155.

LOBO Amaya; ESTEBAN Lorena; DOMÍNGUEZ Belén; MUÑOZ Jaime y TEJERO Iñaki. (2001). “Reducción de la vida de vertederos mediante biorrecuperación”. Revista Técnica de Medio Ambiente, 81, pp. 57-67.

LODDO, Alessandra (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. Dirigido por Belén Domínguez, Lorena Esteban, **Amaya Lobo** e Iñaki Tejero.

MUÑOZ JOFRÉ, Jaime (2001). *Diseño de una metodología de caracterización de residuos sólidos domésticos*. Tesina de Máster. Dpto. de Ciencias y Técnicas del Agua y Medio Ambiente. Universidad de Cantabria. Dirigida por **Amaya Lobo** e Iñaki Tejero.

SUÁREZ, Begoña; **LOBO, Amaya**; SÁNCHEZ Concepción y TEJERO Iñaki (2002). "Estimación de la producción de residuos peligrosos domésticos. Base para el diseño de programas específicos de gestión" en *Avances en Ingeniería Ambiental. Libro de textos completos de las jornadas internacionales de Ingeniería Ambiental. Volumen I: Aire, suelos, residuos y modelización ambiental*. Departamento de Ingeniería química y ambiental, Universidad politécnica de Cartagena. pp 273 – 282.

LOBO, Amaya; HERRERO, Javier; MONTERO, Oscar; FANTELLI, María y TEJERO, Iñaki (2002). "Modeling for Environmental Assessment of Municipal Solid Waste Landfills (Part 1: Hydrology)". *Waste Management and Research*, 20(2), pp. 198 – 210.

LOBO, Amaya; HERRERO, Javier; MONTERO, Oscar; FANTELLI, María y TEJERO, Iñaki (2002). "Modeling for Environmental Assessment of Municipal Solid Waste Landfills (Part 2: Biodegradation)". *Waste Management and Research*, 20(6), pp. 514 – 528.

LOBO, Amaya; TEJERO, Iñaki; SÁNCHEZ, María del Mar; ESTEBAN, Lorena; MONTERO, Oscar y HERRERO, Javier (2002). "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". 4 y 5 diciembre de 2002, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid.

Dpto. Ciencias y Técnicas del Agua y Medio Ambiente. Universidad de Cantabria (2003). "Modelización para la biorrecuperación de suelos contaminados por vertederos de residuos sólidos urbanos" Informe final. Proyecto 2000/032 del Plan Nacional de Medio Ambiente. Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica. Instituto Tecnológico Geominero de España, Ministerio de Ciencia y Tecnología – Ministerio de Medio Ambiente.

MUÑOZ, Jaime; **LOBO, Amaya**; SZANTO, Marcel y TEJERO, Iñaki (2003). "Daily evolution of the biogas emissions in the Meruelo landfill (Spain)". Actas del Congreso "Sardinia 2003, 9th International Landfill Symposium". 6 -10 de octubre de 2003, CISA, Centro de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Cagliari, Italia.

LOBO, Amaya; MUÑOZ, Jaime; SÁNCHEZ, María del Mar y TEJERO, Iñaki (2003). "Comparative analysis of three hydrological landfill models through a practical application (MODUELO, HELP and MODUELO 1)". Actas del Congreso "Sardinia 2003, 9th International Landfill Symposium". 6 -10 de octubre de 2003, CISA, Centro de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Cagliari, Italia.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

PRÓLOGO

ÍNDICE GENERAL

RELACIÓN DE FIGURAS

RELACIÓN DE TABLAS

MEMORIA

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

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

CAPÍTULO 2. MODELOS HIDROLÓGICOS Y DE BIODEGRADACIÓN DEL VERTEDERO

2.1. Modelos de simulación del vertedero existentes.....	2-1
2.2. Modelos hidrológicos.....	2-6
2.2.1. Introducción	2-6
2.2.2. Balance hidrológico superficial	2-7
2.2.2.1. Introducción	2-7
2.2.2.2. Modelos de simulación de la evapotranspiración	2-8
2.2.2.3. Escorrentía superficial	2-10

2.2.3. Flujo en el interior del vertedero	2-11
2.2.3.1. Introducción.....	2-11
2.2.3.2. Modelos de flujo de humedad en el residuo	2-16
2.2.3.3. Modelos de variación de los parámetros hidrológicos.	2-22
2.3. Degradación de los residuos en el vertedero	2-26
2.3.1. Introducción	2-26
2.3.1.1. Procesos de descomposición del residuo.....	2-26
2.3.1.2. Factores que influyen en la descomposición.	2-30
2.3.2. Estudios sobre la biodegradabilidad de los residuos.....	2-31
2.3.3. Modelos de biodegradación del residuo existentes.....	2-34
2.3.3.1. Caracterización matemática de la degradabilidad del residuo.....	2-39
2.3.3.2. Etapas de degradación	2-41
2.3.3.3. Velocidad de degradación del residuo	2-43
2.3.3.4. Modelización de los factores que influyen en la degradación.....	2-51
2.4. Referencias	2-54

CAPÍTULO 3. MODELOS INCLUIDOS EN EL PROGRAMA MODUELO 1

3.1. Introducción	3-1
3.2. Algoritmo general	3-2
3.3. Bloque de producción de residuos	3-3
3.4. Bloque de configuración actual del vertedero.....	3-4
3.5. Bloque de clima	3-6
3.6. Módulo hidrológico	3-7
3.6.1. Balance hidrológico superficial	3-7
3.6.2. Flujo entre celdas interiores.....	3-8
3.6.2.1. Flujo horizontal.....	3-9
3.6.2.2. Flujo vertical	3-10

3.6.2.3. Limitaciones al flujo.....	3-12
3.6.2.4. Flujo hacia el dren.....	3-12
3.6.2.5. Variación de la capacidad de campo	3-13
3.7. Módulo de degradación de los residuos.....	3-13
3.7.1. Introducción	3-13
3.7.2. Datos previos.....	3-14
3.7.3. Hidrólisis	3-14
3.7.4. Transporte de contaminantes	3-18
3.7.5. Biodegradación.....	3-18
3.7.6. Parámetros de contaminación orgánica	3-19
3.8. Aspectos mejorados en este trabajo	3-20
3.9. Referencias	3-21

CAPÍTULO 4. MODELO PROPUESTO

4.1. Introducción.....	4-1
4.2. Modelo hidrológico	4-3
4.2.1. Balance hidrológico superficial	4-3
4.2.1.1. Algoritmo general.....	4-3
4.2.1.2. Modelo de evaporación-evapotranspiración	4-5
4.2.1.3. Infiltración.....	4-11
4.2.1.4. Escorrentía superficial	4-13
4.2.2. Flujo en el interior del vertedero	4-15
4.2.2.1. Introducción	4-15
4.2.2.2. Modelo de flujo vertical	4-16
4.2.2.3. Modelo de flujo hacia el dren.....	4-19
4.2.2.4. Modelo de flujo horizontal	4-23
4.3. Módulo de biodegradación	4-32

4.3.1. Caracterización del residuo	4-32
4.3.2. Procesos de degradación	4-35
4.3.2.1. Bioquímica	4-35
4.3.2.2. Cinéticas	4-41
4.3.2.3. Resolución numérica.....	4-44
4.3.3. Transporte de contaminantes	4-47
4.3.4. Resultados del modelo	4-48
4.3.5. Equilibrio de gases.....	4-51
4.3.6. Simulación de una celda cerrada.....	4-55
4.3.7. Equilibrio carbónico.....	4-62
4.3.7.1. Aproximación de Tchobanoglous <i>et al.</i> (1994).....	4-62
4.3.7.2. Aproximación de El-Fadel <i>et al.</i> (1996a).....	4-63
4.3.7.3. Discusión.....	4-64
4.3.8. Resumen de los cambios en el modelo de biodegradación	4-65
4.4. Resumen de parámetros del modelo	4-67
4.5. Referencias	4-70

CAPÍTULO 5. COMPARACIÓN CON OTROS MODELOS HIDROLÓGICOS DE SIMULACIÓN

5.1. Objetivos.....	5-1
5.2. Vertedero simulado	5-2
5.2.1. Localización	5-2
5.2.2. Forma de explotación	5-2
5.2.3. Residuos	5-4
5.2.4. Clima.....	5-4
5.2.5. Características notables	5-4
5.3. Modelo en MODUELO.....	5-4
5.3.1. Introducción. Datos disponibles	5-4

5.3.2. Datos meteorológicos	5-5
5.3.3. El terreno	5-6
5.3.4. Residuos vertidos	5-9
5.3.5. Información sobre emisiones producidas	5-11
5.4. Modelo con los otros programas	5-12
5.4.1. Con HELP.....	5-12
5.4.2. Con MODUELO 1	5-15
5.5. Comparación	5-16
5.5.1. Simulación del período de explotación	5-16
5.5.2. Simulación del vertedero clausurado.....	5-21
5.6. Discusión	5-24
5.7. Referencias	5-25

CAPÍTULO 6. EVALUACIÓN DEL MODELO DE BIODEGRADACIÓN. CALIBRACIÓN Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

6.1. Objetivos	6-1
6.2. Metodología.....	6-1
6.3. Resultados y discusión de la calibración.....	6-4
6.3.1. Comprobación del ajuste.....	6-4
6.3.2. Evolución de las emisiones en el tiempo.....	6-9
6.4. Análisis de sensibilidad	6-16
6.4.1. Sensibilidad a las velocidades de hidrólisis.....	6-18
6.4.2. Sensibilidad a la constante de acetogénesis.....	6-18
6.4.3. Sensibilidad a la constante de metanogénesis acetofílica.	6-19
6.4.4. Sensibilidad a la constante “fracción de arrastre”.....	6-19
6.4.5. Sensibilidad a la constante de metanogénesis hidrogenofílica.	6-20
6.5. Referencias	6-31

CAPÍTULO 7. APLICACIÓN A UN CASO REAL. EL VERTEDERO “X”

7.1. Descripción del vertedero.....	7-1
7.1.1. Forma de explotación	7-1
7.1.2. Los residuos.....	7-6
7.1.3. El clima	7-9
7.1.4. Otras características notables	7-9
7.2. El modelo.....	7-10
7.2.1. Introducción. Información disponible.	7-10
7.2.2. Datos meteorológicos	7-10
7.2.3. El terreno	7-11
7.2.4. Residuos vertidos	7-18
7.2.5. Información sobre emisiones producidas	7-27
7.3. Calibración del modelo hidrológico.....	7-28
7.3.1. Metodología	7-28
7.3.2. Comentarios sobre significado y sensibilidad de los parámetros	7-30
7.3.2.1. La permeabilidad inicial.....	7-30
7.3.2.2. Los parámetros de incremento de la infiltración, FLL y dp.....	7-32
7.3.2.3. El factor de escorrentía.....	7-34
7.3.3. Resultados obtenidos y discusión.....	7-34
7.4. El modelo biológico	7-44
7.4.1. Metodología	7-44
7.4.2. Resultados obtenidos y discusión.....	7-45
7.4.2.1. Biogás	7-55
7.4.2.2. Los parámetros	7-56
7.5. Referencias	7-59

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

8.1. Conclusiones.....	8-1
8.2. Recomendaciones y consideraciones finales	8-3

ANEJOS

ANEJO I. PRIMERAS MODIFICACIONES AL MODELO DE BIODEGRADACIÓN

I.1. Introducción.....	I-1
I.2. Reacciones de biodegradación	I-1
I.3. Cinéticas.....	I-3
I.4. Simulación de una celda cerrada	I-5
I.5. Referencias	I-12

ANEJO II. FOTOGRAFÍAS DEL VERTEDERO MERUELO I

RELACIÓN DE FIGURAS

CAPÍTULO 2. MODELOS HIDROLÓGICOS Y DE BIODEGRADACIÓN DEL VERTEDERO

- Figura 2.1. Esquema de las reacciones en la digestión anaerobia de materiales poliméricos (adaptado de Zehnder, 1982, Gujer y Zehnder, 1983 y Zinder, 1984).....2-27
- Figura 2.2. Evolución en el tiempo de las emisiones del vertedero. Fases “de ajuste inicial” (I y II), “ácida” (III), “metanogénica” (IV) y de “maduración” (V). (Tchobanoglous *et al.*, 1994).....2-28

CAPÍTULO 3. MODELOS INCLUIDOS EN EL PROGRAMA MODUELO 1

- Figura 3.1. Algoritmo general del programa MODUELO 1.3-2
- Figura 3.2. Esquema representativo del modelo de flujo horizontal adoptado en MODUELO 1 (Herrero y Montero, 1999).....3-10
- Figura 3.3. Casos considerados en el modelo de flujo vertical.....3-12
- Figura 3.4. Diagrama de flujos de las distintas sustancias en su proceso de degradación según MODUELO 1.....3-17

CAPÍTULO 4. MODELO PROPUESTO

- Figura 4.1. Algoritmo adoptado en el balance hidrológico superficial.....4-4
- Figura 4.2. Algoritmo de cálculo de la evapotranspiración.4-6
- Figura 4.3. Algoritmo de cálculo de la infiltración.....4-12
- Figura 4.4. Algoritmo de cálculo de la escorrentía superficial.....4-14
- Figura 4.5. Esquema del algoritmo general de cálculo.....4-16
- Figura 4.6. Esquema de definición del modelo de flujo al dren.4-19
- Figura 4.7. Esquema de definición del sistema de drenaje en MODUELO.4-21
- Figura 4.8. Esquema del flujo de humedad en una dirección.....4-23
- Figura 4.9. Descomposición de un componente del residuo según fracciones de biodegradabilidad.....4-34
- Figura 4.10. Variación de FH con la humedad del residuo (ejemplo para $H_{lim} \cdot \omega_{cc} = 25\%$ y $\omega_{SAT} = 75\%$)4-42

Figura 4.11. Resultados de las simulaciones de una celda cerrada con MODUELO 1 (a la derecha) y MODUELO 2 (a la izquierda): materiales sólidos y disueltos. 4-60

Figura 4.12. Resultados de las simulaciones de una celda cerrada con MODUELO 1 (a la derecha) y MODUELO 2 (a la izquierda): sustancias gaseosas. 4-61

CAPÍTULO 5. COMPARACIÓN CON OTROS MODELOS HIDROLÓGICOS DE SIMULACIÓN

Figura 5.1. Localización de Meruelo. 5-2

Figura 5.2. Esquema del sistema de drenaje en Meruelo I. 5-3

Figura 5.3. Pantalla de definición del modelo morfológico de Meruelo I en MODUELO. 5-7

Figura 5.4. Esquema del modelo del vertedero Meruelo I clausurado en HELP con variación de las características hidráulicas ("HK", a la izquierda) y sin variación de las mismas ("HW", a la derecha). 5-14

Figura 5.5. Caudal diario de lixiviado en Meruelo durante la campaña de caracterización de 1990. Valores medidos y simulados con HELP, MODUELO 1 y MODUELO 2. 5-17

Figura 5.6. Resultados de la simulación de Meruelo I clausurado con HELP (H) y MODUELO (M) considerando (HK y MK) y despreciando (HW y MW) los cambios de la capacidad de campo y la conductividad hidráulica en profundidad. 5-22

CAPÍTULO 6. EVALUACIÓN DEL MODELO DE BIODEGRADACIÓN. CALIBRACIÓN Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Figura 6.1. Contraste de los resultados de simulación de Meruelo I calibrado con os datos de referencia. Cargas (DQO y $N-NH_4^+$) y caudal medios diarios correspondientes a cada mes de la campaña de medida. 6-6

Figura 6.2. Contraste de los resultados de simulación de Meruelo I calibrado con los datos de referencia. Concentraciones de DQO y $N-NH_4^+$ medias diarias correspondientes a cada mes de la campaña de medida. 6-8

Figura 6.3. Resultados de simulación de Meruelo I calibrado. Concentración de contaminantes (DQO, DBO y $N-NH_4^+$). 6-12

Figura 6.4. Resultados de simulación de Meruelo I calibrado. Carga de contaminantes (DQO, DBO, compuestos intermedios y acetato). 6-13

Figura 6.5. Resultados de simulación de Meruelo I calibrado. Carga de contaminantes (nitrógeno amoniacal y orgánico). 6-14

Figura 6.6. Resultados de simulación de Meruelo I calibrado. Biogás emitido, composición. 6-15

Figura 6.7. Resultados de simulación de Meruelo I en los casos “calibración”, S1 y S2. Biogás emitido.	6-21
Figura 6.8. Resultados de simulación de Meruelo I en los casos “calibración”, S1 y S2. Concentraciones de DBO, DQO y N-NH ₄ ⁺ en el lixiviado.	6-22
Figura 6.9. Resultados de simulación de Meruelo I en los casos “calibración”, S3 y S4. Biogás emitido.	6-23
Figura 6.10. Resultados de simulación de Meruelo I en los casos “calibración”, S3 y S4. Concentraciones de DBO, DQO y N-NH ₄ ⁺ en el lixiviado.	6-24
Figura 6.11. Resultados de simulación de Meruelo I en los casos “calibración”, S5 y S6. Biogás emitido.	6-25
Figura 6.12. Resultados de simulación de Meruelo I en los casos “calibración”, S5 y S6. Concentraciones de DBO, DQO y N-NH ₄ ⁺ en el lixiviado.	6-26
Figura 6.13. Resultados de simulación de Meruelo I en los casos “calibración”, S7 y S8. Biogás emitido.	6-27
Figura 6.14. Resultados de simulación de Meruelo I en los casos “calibración”, S7 y S8. Concentraciones de DBO, DQO y N-NH ₄ ⁺ en el lixiviado.	6-28
Figura 6.15. Resultados de simulación de Meruelo I en los casos “calibración”, S9 y S10. Biogás emitido.	6-29
Figura 6.16. Resultados de simulación de Meruelo I en los casos “calibración”, S9 y S10. Concentraciones de DBO, DQO y N-NH ₄ ⁺ en el lixiviado.	6-30

CAPÍTULO 7. APLICACIÓN A UN CASO REAL. EL VERTEDERO “X”

Figura 7.1. Esquema de explotación de la primera fase del vertedero X. Celdas de vertido.	7-2
Figura 7.2. Secciones tipo del sistema de drenaje inferior en las celdas de X.	7-3
Figura 7.3. Esquema del orden de llenado de cada celda de explotación en el vertedero X.	7-5
Figura 7.4. Comparación entre las series de precipitación diaria acumulada obtenida a partir de los datos de las estaciones situadas en poblaciones cercanas al vertedero y la facilitada por la empresa gestora del vertedero. .	7-11
Figura 7.5. Modelo de la configuración espacial del vertedero de X en MODUELO.	7-15
Figura 7.6. Comparación entre caudales medidos y simulados con KRU0 = 10 ⁻⁴ m/s y KRU0 = 25.10 ⁻⁴ m/s durante todo el período de estudio del modelo de X.	7-31
Figura 7.7. Esquema de posibles entradas de escorrentía externa en las celdas de vertido de X.	7-33

- Figura 7.8. Comparación entre caudales medidos y simulados con FLL = 2'5 y dp = 0 mm ("x2'5+0") y FLL = 2 y dp = 50 mm ("x2+50"), en ambos casos con las series de precipitación de la población cercana, durante todo el período de calibración y validación del modelo de X. 7-38
- Figura 7.9. Resultados de la simulación hidrológica del vertedero X calibrada a partir de las series de lluvias registradas en el vertedero y FE determinado con el criterio de minimización de los errores cuadrados. Período de calibración. 7-39
- Figura 7.10. Resultados de la simulación hidrológica del vertedero X calibrada a partir de las series de lluvias registradas en el vertedero y FE determinado con el criterio de minimización de los errores cuadrados. Período de validación..... 7-40
- Figura 7.11. Resultados de simulación del vertedero X en todo el período de estudio con todos los parámetros calibrados "visualmente"..... 7-41
- Figura 7.12. Comparación de los resultados de simulación de X calibrado con las series medidas. Carga de contaminantes (DBO y DQO) y caudal medio diario de lixiviado correspondientes a cada mes..... 7-47
- Figura 7.13. Comparación de los resultados de simulación de X calibrado con las series medidas. Carga de contaminantes (NTK y N-NH₄⁺) y caudal medio diario de lixiviado correspondientes a cada mes..... 7-48
- Figura 7.14. Comparación de los resultados de simulación de X calibrado con las series medidas. Biogás generado cada mes..... 7-49
- Figura 7.15. Valores puntuales y medias mensuales de flujo de DQO obtenidos a partir de los datos de campo de X y flujos diarios resultantes de la simulación..... 7-50
- Figura 7.16. Valores puntuales y medias mensuales de flujo de DBO obtenidos a partir de los datos de campo de X y flujos diarios resultantes de la simulación..... 7-51
- Figura 7.17. Valores puntuales y medias mensuales de flujo de NTK obtenidos a partir de los datos de campo de X y flujos diarios resultantes de la simulación..... 7-51
- Figura 7.18. Valores puntuales y medias mensuales de flujo de N-NH₄⁺ obtenidos a partir de los datos de campo de X y flujos diarios resultantes de la simulación..... 7-52
- Figura 7.19. Contraste de los resultados de simulación de X calibrado con los datos de referencia. Cargas (DQO y DBO) medias diarias correspondientes a cada mes del período de calibración y validación. 7-54
- Figura 7.20. Contraste de los resultados de simulación de X calibrado con los datos de referencia. Cargas (NTK y N-NH₄⁺) medias diarias correspondientes a cada mes del período de calibración y validación. 7-54
- Figura 7.21. Comparación entre las concentraciones medias mensuales de DQO y DBO en los lixiviados de X obtenidas a partir de la serie de datos medidos y las simuladas. 7-55

RELACIÓN DE TABLAS

CAPÍTULO 2. MODELOS HIDROLÓGICOS Y DE BIODEGRADACIÓN DEL VERTEDERO

Tabla 2.1. Resumen de las referencias encontradas sobre otros modelos “integrales” de simulación del vertedero que incluyen biodegradación (I). ...	2-4
Tabla 2.2. Resumen de las referencias encontradas sobre otros modelos “integrales” de simulación del vertedero que incluyen biodegradación (II). ..	2-5
Tabla 2.3. Valores de los parámetros hidráulicos del residuo en vertedero observados por otros autores.....	2-15
Tabla 2.4. Biodegradabilidad de los principales componentes del residuo urbano según varios autores.....	2-33
Tabla 2.5. Modelos de biodegradación de residuos urbanos en el vertedero publicados por otros autores (I).....	2-36
Tabla 2.6. Modelos de biodegradación de residuos urbanos en el vertedero publicados por otros autores (II).....	2-37
Tabla 2.7. Modelos de biodegradación de residuos urbanos en el vertedero publicados por otros autores (y III).....	2-38
Tabla 2.8. Tasas de producción de biogás por descomposición de residuos sólidos urbanos publicadas por varios autores.	2-44
Tabla 2.9. Constantes de hidrólisis de primer orden para distintos compuestos. (García-Heras, 2002)	2-45
Tabla 2.10. Constantes cinéticas de Monod para distintos procesos en la digestión anaerobia de residuos urbanos (García-Heras, 2002).....	2-46
Tabla 2.11. Valores cinéticos obtenidos en calibración de modelos de degradación del residuo en vertedero: etapas de hidrólisis (primer orden) y acidogénesis (Monod).....	2-48
Tabla 2.12. Valores cinéticos obtenidos en calibración de modelos de degradación del residuo en vertedero: etapa de metanogénesis.	2-49
Tabla 2.13. Modelo de Monod del crecimiento de la biomasa por consumo de sustrato.....	2-50
Tabla 2.14. Valores de las tasas de degradación del residuo resultantes de la calibración de modelos de otros autores(*).....	2-52

CAPÍTULO 3. MODELOS INCLUIDOS EN EL PROGRAMA MODUELO 1

Tabla 3.1. Categorías de residuo incluidas en el programa.....	3-4
Tabla 3.2. Valores del factor de influencia de la humedad sobre la hidrólisis (Arias <i>et al.</i> , 1995)	3-15

CAPÍTULO 4. MODELO PROPUESTO

Tabla 4.1. Valores orientativos de f_c (Musgrave, 1955).....	4-12
Tabla 4.2. Valores aproximados para f_0 (Huber y Dickinson, 1988).....	4-12
Tabla 4.3. Clasificación propuesta en MODUELO para los componentes principales del residuo según su biodegradabilidad.	4-33
Tabla 4.4. Reacciones de degradación del residuo según MODUELO 2 (I). Hidrólisis.....	4-39
Tabla 4.5. Reacciones de degradación del residuo según MODUELO 2 (II). Acetogénesis y metanogénesis.....	4-40
Tabla 4.6. Matriz de procesos del modelo de degradación en MODUELO 2 (I).....	4-49
Tabla 4.7. Matriz de procesos del modelo de degradación en MODUELO 2 (y II) ...	4-50
Tabla 4.8. Valores de las constantes de solubilidad de los distintos gases adoptados en MODUELO 2 (Stumm y Morgan, 1996).....	4-55
Tabla 4.9. Composición del residuo en Meruelo I. Moles de cada elemento químico correspondientes a las fracciones biodegradables por peso de residuo seco (RS).	4-56
Tabla 4.10. Parámetros de calibración de la degradación en la celda.....	4-57
Tabla 4.11. Resumen de cambios en el modelo MODUELO de degradación (I).....	4-65
Tabla 4.12. Resumen de cambios en el modelo MODUELO de degradación (II).....	4-66
Tabla 4.13. Lista de parámetros de los modelos hidrológicos (I).....	4-67
Tabla 4.14. Lista de parámetros de los modelos hidrológicos (II).....	4-68
Tabla 4.15. Parámetros del modelo de degradación propuesto	4-69

CAPÍTULO 5. COMPARACIÓN CON OTROS MODELOS HIDROLÓGICOS DE SIMULACIÓN

Tabla 5.1. Características de las secciones drenantes empleadas en la definición del sistema de drenaje inferior en Meruelo.	5-8
--	-----

Tabla 5.2. Características de los drenes inferiores en Meruelo.....	5-8
Tabla 5.3. Parámetros hidrológicos adoptados en los modelo de Meruelo I en MODUELO 1 y MODUELO 2.	5-10
Tabla 5.4. Composición de los residuos vertidos en Meruelo I (Grupo de Ingeniería Ambiental, 1991).	5-11
Tabla 5.5. Volúmenes totales de los términos del balance hidrológico resultantes de cada modelo de simulación.....	5-19
Tabla 5.6. Errores cometidos en la simulación de los caudales diarios de Meruelo I durante los meses de marzo – octubre de 1990. a) Considerando todos los datos medidos.	5-20
Tabla 5.7. Errores cometidos en la simulación de los caudales diarios de Meruelo I durante los meses de marzo – octubre de 1990. b) Considerando solo los datos menores que 25 m ³ /d.....	5-21

CAPÍTULO 6. EVALUACIÓN DEL MODELO DE BIODEGRADACIÓN. CALIBRACIÓN Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Tabla 6.1. Resumen de valores paramétricos y resultados (error relativo de cargas acumuladas, suma de los cuadrados de las diferencias y máxima generación de biogás) en el proceso de calibración. (En la columna de definición de los parámetros aparece su relación con el valor inicial adoptado.)	6-5
Tabla 6.2. Parámetros resultantes de la calibración del modelo de biodegradación de Meruelo I.	6-6
Tabla 6.3. Errores en la simulación de la DQO y N-NH ₄ ⁺ de Meruelo 1 durante los meses de marzo a octubre de 1990.....	6-7
Tabla 6.4. Valores paramétricos empleados en el análisis de sensibilidad.....	6-17
Tabla 6.5. Valores de sensibilidad de los máximos a cada parámetro.	6-18

CAPÍTULO 7. APLICACIÓN A UN CASO REAL. EL VERTEDERO “X”

Tabla 7.1. Período de explotación, residuos depositados, área superficial y características de los “volúmenes unitarios” de las celdas de vertido en X (I).	7-7
Tabla 7.2. Período de explotación, residuos depositados, área superficial y características de los “volúmenes unitarios” de las celdas de vertido de X (II). ...	7-8
Tabla 7.3. Características de las secciones drenantes empleadas en la definición del sistema de drenaje inferior en X.	7-13
Tabla 7.4. Características de los drenes en la capa 1 del modelo de X.....	7-14
Tabla 7.5. Características hidrológicas asignadas a las celdas del modelo de X.....	7-17

Tabla 7.6. Toneladas de residuos de cada clase (según la clasificación de la empresa gestora) depositados en X desde 1992.	7-22
Tabla 7.7. Toneladas de residuos de cada clase (según la clasificación empleada en MODUELO) depositados en X desde 1992.	7-23
Tabla 7.8. Descripción de los residuos depositados en X. Equivalencia entre clases manejadas en el vertedero y los componentes del modelo MODUELO (I).....	7-24
Tabla 7.9. Descripción de los residuos depositados en X. Equivalencia entre clases manejadas en el vertedero y los componentes del modelo MODUELO (II).....	7-25
Tabla 7.10. Composición inicial y tasas evolución de cada clase de residuos a lo largo del tiempo introducidas en MODUELO para representar el tipo de residuos vertido a lo largo del tiempo en X.	7-26
Tabla 7.11. Valores de los parámetros de calibración del modelo hidráulico de X...	7-35
Tabla 7.12. Parámetros resultantes de la calibración del modelo de biodegradación de X.....	7-46
Tabla 7.13. Rango de variación y valor medio del período abril 1999 – mayo 2002 de las series de contaminación medida y simulada con el modelo de X.	7-50
Tabla 7.14. Desviaciones entre las series resultantes de la simulación calibrada y las medidas de flujo de contaminante en X (error medio, error porcentual medio y suma de errores cuadráticos).....	7-53
Tabla 7.15. Estimaciones de las emisiones totales de metano por superficie en vertederos de residuos urbanos	7-57
Tabla 7.16. Volumen anual de biogás (suma de dióxido de carbono y metano) emitidos en el vertedero X durante los años de simulación según el programa.....	7-58