



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MEDELLIN

“MODELO DE BALANCE HÍDRICO PARA LA ESTIMACIÓN DE LOS CAUDALES DE LIXIVIADOS GENERADOS EN LA OPERACIÓN DEL RELLENO SANITARIO DEL CENTRO INDUSTRIAL DEL SUR - EL GUACAL, HELICONIA – ANTIOQUIA”

MARINELLA VARGAS GUERRERO, I.S.A.

ESCUELA DE GEOCIENCIAS Y MEDIOAMBIENTE
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE MINAS
MEDELLÍN
JULIO DE 2009

“MODELO DE BALANCE HÍDRICO PARA LA ESTIMACIÓN DE LOS CAUDALES DE LIXIVIADOS GENERADOS EN LA OPERACIÓN DEL RELLENO SANITARIO DEL CENTRO INDUSTRIAL DEL SUR - EL GUACAL, HELICONIA – ANTIOQUIA”

MARINELLA VARGAS GUERRERO, I.S.A.

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO DE: MAGÍSTER EN INGENIERÍA – RECURSOS HIDRÁULICOS

**DIRECTOR
JAIME IGNACIO VÉLEZ UPEGUI**

ESCUELA DE GEOCIENCIAS Y MEDIOAMBIENTE

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

FACULTAD DE MINAS

MEDELLÍN

JULIO DE 2009

A mi mejor amigo: mi padre.
Porque hubo algo que nunca me faltó,
tu apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por todo lo vivido y aprendido durante éste tiempo.

A mi madre, padre y hermanos, por creer en mí.

A Lucho, por ser mi gran guía y fortaleza. El haberlo conocido hizo posible vivir ésta experiencia.

A la empresa EVAS ENVIAMBIENTALES S.A. E.S.P., por la realización de éste convenio.

A la firma ARES Ltda., por su colaboración en el suministro de la información.

A mi director de tesis, Jaime Ignacio Vélez, por su valiosa orientación.

A mi codirector de tesis, Santiago Cardona, por su gran apoyo.

A los jurados, Ramiro Marbello y Manuel Villarraga, por sus buenos aportes para fortalecer este trabajo.

A todos mis profesores, en especial a: Lilian Posada, Maria Victoria Vélez, Gladys Bernal, Oscar Mesa y Luis Fernando Carvajal.

A Sebastián Giraldo por su disponibilidad y colaboración.

A todos mis amigos del Posgrado, especialmente a: Adriana, Mechas, Sebas, Aura, Alejo, Camilo, Juanse, Jovany, Mauricio, Carlos y Mario, por sus buenos consejos, alegrías y colaboraciones.

Muchos agradecimientos a: Monica, Gloria, Diana, Mari Luz y Carolina A., por su gran amabilidad.

A Manuela, mi compañera incondicional. Aunque no eres humana, tienes mucho más alma y corazón.

RESUMEN

Se revisaron y analizaron los modelos desarrollados para estimar los caudales de lixiviados que se generan en un relleno sanitario. Los modelos analizados fueron de tipo hidrológico, de biodegradación de residuos sólidos e integrados. Se seleccionaron los modelos de mayor aplicación y aceptación para modelar las condiciones operativas del relleno sanitario El Guacal (Heliconia – Antioquia, Colombia). Igualmente, se identificaron las limitaciones y desventajas de los modelos desarrollados.

Teniendo en cuenta las debilidades de los modelos seleccionados, se desarrolló un modelo de balance hídrico para estimar los aportes de escorrentías y lixiviados generados en cada una de las etapas de evolución del relleno sanitario El Guacal, desde su construcción hasta su clausura.

Se presentan los resultados de la modelación del balance hídrico para el relleno sanitario El Guacal mediante el uso del modelo HELP 3.0, los resultados de la aplicación del modelo desarrollado y los resultados de diferentes escenarios de modelación.

Se analizó la influencia del método de operación del relleno sanitario y de las variables climáticas del sitio de localización sobre la producción de lixiviados. Finalmente, se presentan varias recomendaciones para mejorar las condiciones de manejo del relleno sanitario El Guacal.

Palabras claves: relleno sanitario, lixiviados, balance hídrico, modelos hidrológicos, variables climáticas.

ABSTRACT

Models of estimation of leachates in landfills were revised and analyzed. The models studied were hydrological models, models of biodegradation of solid waste and integrated models. Models of greater acceptance and implementation were selected to model the operating conditions of landfill the Guacal (Heliconia – Antioquia, Colombia). Similarly, limitations and disadvantages of the models developed were identified.

A hydrological balance model was designed taking into account the limitations of selected models. The model was used to determine runoffs and leachates produced in all stages of evolution of landfill the Guacal, from construction until the closure.

The results of the modeling of hydrological balance for landfill the Guacal using the HELP model 3.0, the results of applying the model developed and the results of different modeling sceneries are presented in this document.

The influence of the operation of landfill and the climate variables of the site location in the production of leachates were analyzed. Finally, several recommendations to improve management of landfill the Guacal are presented.

Key words: landfill, leachates, hydrological balance, hydrological models, climate variables.

SINTESIS DEL DOCUMENTO

El documento que se presenta a continuación, contiene el resultado del desarrollo de los objetivos planteados para el trabajo de investigación “Modelo de balance hídrico para la estimación de los caudales de lixiviados generados en la operación del relleno sanitario del Centro Industrial del Sur (CIS) - El Guacal, Envigado – Antioquia”.

La investigación surge como resultado del Convenio de Cooperación Interinstitucional llevado a cabo entre la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín y la Empresa EVAS ENVIAMBIENTALES S.A. E.S.P., empresa encargada de la administración del CIS El Guacal, lugar en el cual se encuentra localizado el relleno sanitario utilizado como caso de aplicación.

El Capítulo 1, presenta los objetivos planteados para el presente trabajo, una breve descripción del problema y la hipótesis establecida en la investigación.

El Capítulo 2, denominado marco teórico y estado del arte, pretende introducir al lector en el tema de los rellenos sanitarios y en muchos de sus aspectos. Igualmente, se hace una presentación de los aspectos normativos en materia de rellenos sanitarios, se muestran los resultados de la revisión de varios trabajos llevados a cabo sobre el tema de modelación de balances hídricos en rellenos sanitarios, y se presenta una descripción completa de los modelos aplicados en la investigación.

El Capítulo 3, describe las generalidades del sitio de estudio (relleno sanitario del CIS – El Guacal) tales como: aspectos climáticos, descripción del proceso constructivo y operativo del relleno sanitario y registros de toda la información necesaria para el desarrollo de las diversas modelaciones.

En el Capítulo 4, se describe la metodología de trabajo llevada a cabo para la aplicación del modelo de balance hídrico HELP, y se muestran los resultados obtenidos con este modelo.

El Capítulo 5, presenta toda la descripción conceptual del modelo de balance hídrico desarrollado en la investigación, con el cual, se simuló y estimó los caudales de lixiviados generados durante la operación del relleno sanitario El Guacal. La metodología para el desarrollo del modelo, los resultados de las simulaciones y sus análisis, también hacen parte de este capítulo.

El Capítulo 6 corresponde a las conclusiones obtenidas con el desarrollo de los alcances planteados en el Capítulo 1.

El Capítulo 7, presenta las recomendaciones que se deben tener en cuenta para la operación de un relleno sanitario con relación a la generación de los lixiviados y sus efectos adversos. Las referencias bibliográficas de toda la revisión de documentos, libros, artículos, informes, etc., son presentados en el Capítulo 8.

TABLA DE CONTENIDO

1. GENERALIDADES	1-1
1.1 OBJETIVOS.....	1-1
1.1.1 OBJETIVO GENERAL	1-1
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	1-1
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	1-1
1.3 HIPÓTESIS	1-2
1.4 RESULTADOS ESPERADOS.....	1-2
2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	2-1
2.1 INTRODUCCIÓN.....	2-1
2.2 LOS RELLENOS SANITARIOS O VERTEDEROS.....	2-1
2.2.1 COMPONENTES DE UN RELLENO SANITARIO.....	2-2
2.2.2 FACTORES DETERMINANTES EN EL DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE LOS RELLENOS SANITARIOS.....	2-5
2.2.3 MÉTODOS DE OPERACIÓN DE UN RELLENO SANITARIO	2-8
2.2.4 DESCOMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS Y PROCESOS EVOLUTIVOS EN UN RELLENO SANITARIO.....	2-13
2.2.5 LIXIVIADOS DE UN RELLENO SANITARIO: CARACTERÍSTICAS.....	2-16
2.3 MODELACIÓN EN RELLENOS SANITARIOS.....	2-20
2.3.1 MODELOS HIDROLÓGICOS	2-21
2.3.2 MODELOS DE BIODEGRADACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS	2-50
2.3.3 MODELOS INTEGRADOS.....	2-53
2.3.4 ANÁLISIS DE LOS MODELOS HELP, BASE Y MODUELO 2	2-80
3. DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO.....	3-1
3.1 LOCALIZACIÓN DEL RELLENO SANITARIO EL GUACAL.....	3-1
3.2 ASPECTOS CLIMÁTICOS DEL SITIO DE ESTUDIO	3-3
3.2.1 PRECIPITACIÓN.....	3-4
3.2.2 TEMPERATURA	3-6
3.2.3 EVAPOTRANSPIRACIÓN	3-7

3.3 ASPECTOS CONSTRUCTIVOS Y DE OPERACIÓN DEL RELLENO SANITARIO EL GUACAL	3-8
3.3.1 FASE CONSTRUCTIVA DEL RELLENO SANITARIO EL GUACAL	3-8
3.3.2 FASE OPERATIVA: DISPOSICIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS	3-10
4. APLICACIÓN DEL MODELO HELP	4-1
4.1 INTRODUCCIÓN.....	4-1
4.2 IDENTIFICACIÓN DE CONDICIONES RESTRICTIVAS PARA LA MODELACIÓN	4-3
4.3 FUNCIONAMIENTO DEL MODELO.....	4-7
4.4 PROCESO DE MODELACIÓN.....	4-8
4.4.1 ESCENARIOS DE MODELACIÓN	4-8
4.4.2 PROCESO DE CALIBRACIÓN	4-12
4.4.3 CORRIDAS PARA EL MODELO HELP	4-12
4.4.4 INFORMACIÓN UTILIZADA	4-13
4.5 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DEL MODELO HELP	4-16
4.5.1 RESULTADOS DE LOS ESCENARIOS DE MODELACIÓN	4-16
5. MODELO DE BALANCE HÍDRICO PARA estimación de caudales de lixiviados en UN RELLENO SANITARIO	5-1
5.1 INTRODUCCIÓN.....	5-1
5.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO	5-5
5.2.1 VARIABLES Y PARÁMETROS QUE CONSIDERA EL MODELO.....	5-8
5.2.2 MODELO CONCEPTUAL.....	5-16
5.3 FUNCIONAMIENTO DEL MODELO.....	5-29
5.4 APLICACIÓN DEL MODELO	5-31
5.4.1 INFORMACIÓN UTILIZADA	5-31
5.4.2 ENSAYOS DEL MODELO	5-37
5.4.3 PROCESO DE CALIBRACIÓN	5-39
5.4.4 ESCENARIOS DE MODELACIÓN	5-40
5.5 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DEL MODELO	5-46
5.5.1 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LA MODELACIÓN	5-46
5.5.2 RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DEL MODELO	5-53
5.5.3 RESULTADOS DE LOS ESCENARIOS DE MODELACIÓN	5-57
5.5.4 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS EN LOS CAUDALES DE LIXIVIADOS	5-68
6. CONCLUSIONES	6-1

7. RECOMENDACIONES	7-1
8. BIBLIOGRAFÍA	8-1

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Diagrama esquemático del sistema de componentes de un relleno.....	2-4
Figura 2.	Métodos de operación de un relleno sanitario.....	2-9
Figura 3.	Variaciones de los gases y lixiviados en las fases de un relleno sanitario ..	2-16
Figura 4.	Componentes del balance hídrico de un relleno sanitario.....	2-22
Figura 5.	Flujo en el interior de un relleno sanitario	2-25
Figura 6.	Esquema conceptual del modelo HELP.....	2-30
Figura 7.	Algoritmo general del programa MODUELO 1	2-57
Figura 8.	Algoritmo para el balance hidrológico en MODUELO 2.....	2-62
Figura 9.	Algoritmo del flujo en el interior del vertedero para MODUELO 2	2-71
Figura 10.	Esquema de definición del modelo de flujo al dren	2-74
Figura 11.	Esquema del flujo de humedad en una dirección.....	2-76
Figura 12.	Descomposición de un componente del residuo	2-78
Figura 13.	Localización del Centro Industrial del Sur CIS – El Guacal	3-2
Figura 14.	Delimitación de las subcuencas de los vasos del relleno sanitario	3-3
Figura 15.	Distribución temporal de la precipitación.....	3-5
Figura 16.	Ciclo anual de la precipitación: estaciones cercanas al CIS – EL Guacal	3-6
Figura 17.	Mapa de la variación espacial de la temperatura	3-7
Figura 18.	Mapa de evapotranspiración real media	3-8

Figura 19.	Forma constructiva del fondo del relleno sanitario El Guacal	3-10
Figura 20.	Cantidades de residuos sólidos dispuestas.....	3-11
Figura 21.	Porcentajes de cantidades de residuos sólidos dispuestos según el tipo .	3-13
Figura 22.	Conformación de celdas	3-14
Figura 23.	Adecuación inicial del vaso norte del relleno sanitario.....	3-15
Figura 24.	Esquema idealizado para la operación del relleno sanitario El Guacal..	3-17
Figura 25.	Variación de los valores de densidad de compactación de los residuos sólidos	3-19
Figura 26.	Variación de los valores de permeabilidad de los residuos	3-19
Figura 27.	Variación de los valores de densidad de compactación	3-21
Figura 28.	Variación de los valores de permeabilidad del material de cobertura....	3-22
Figura 29.	Esquema del sistema de recolección y transporte de lixiviados	3-23
Figura 30.	Variaciones del caudal de lixiviados en el años 2006 -2008.....	3-24
Figura 31.	Esquema de la conformación de un vertedero típico - modelo HELP.....	4-2
Figura 32.	Relaciones de parámetros de humedad y texturas del suelo	4-6
Figura 33.	Esquema de la conformación actual del relleno sanitario El Guacal.....	4-9
Figura 34.	Esquema de la conformación constructiva ideal para el relleno sanitario .	4-10
Figura 35.	Mapa de áreas aptas para la disposición final de residuos sólidos.....	4-11
Figura 36.	Caudales de lixiviados simulados por el HELP – Corrida No. 1.....	4-18
Figura 37.	Caudales de lixiviados simulados por el HELP – Corrida No. 2.....	4-19
Figura 38.	Caudales de lixiviados simulados por el HELP – Escenario 4	4-23

Figura 39.	Esquema del modelo conceptual de balance hídrico rellenos sanitarios	5-3
Figura 40.	Esquema conceptual del modelo de tanques.....	5-4
Figura 41.	Esquema del modelo conceptual de balance hídrico para la Etapa 0....	5-18
Figura 42.	Esquema del modelo conceptual de balance hídrico para la Etapa 1....	5-23
Figura 43.	Esquema del modelo conceptual de balance hídrico para la Etapa 2....	5-26
Figura 44.	Esquema del modelo conceptual de balance hídrico para la Etapa 3....	5-28
Figura 45.	Serie de precipitación diaria.....	5-32
Figura 46.	Serie de caudales de lixiviados reales	5-33
Figura 47.	Esquema operativo planteado para el relleno sanitario El Guacal.....	5-34
Figura 48.	Esquema del vaso norte del relleno sanitario El Guacal - Clausura	5-34
Figura 49.	Sitios potenciales de disposición final para escenarios de localización.	5-42
Figura 50.	Mapa de precipitación medial anual para los municipios donde se localizan los sitios potenciales de disposición final	5-43
Figura 51.	Serie de caudales Vs. Precipitación. Ensayo 1 (Etapa 0 y Etapa 1).....	5-47
Figura 52.	Serie de caudales simulados Vs. caudales reales. Ensayo 2 (Etapa 2)	5-50
Figura 53.	Serie de caudales simulados Vs. caudales reales. Ensayo 3 (Etapa 2)	5-52
Figura 54.	Resultado de la calibración del modelo.....	5-55
Figura 55.	Curva de duración – Series de caudales de lixiviados	5-56
Figura 56.	Ajustes de los caudales simulados con los caudales reales.....	5-57
Figura 57.	Caudales de lixiviados para el vaso norte del relleno sanitario	5-59
Figura 58.	Comparación de series de precipitación	5-60
Figura 59.	Caudales de lixiviados - escenario de variables climáticas distintas.....	5-61

Figura 60.	Caudales de lixiviados simulados para el escenario 3	5-63
Figura 61.	Caudales de lixiviados simulados para el escenario 4	5-66
Figura 62.	Caudales de lixiviados simulados para una operación ideal.....	5-67
Figura 63.	Relación de los caudales de lixiviados con la precipitación.....	5-69
Figura 64.	Relación de los caudales de lixiviados simulados con la precipitación .	5-71
Figura 65.	Relación de caudales de lixiviados y de escorrentía VS precipitación...	5-72

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Biodegradabilidad de los principales componentes de los residuos municipales, según varios autores.....	2-13
Tabla 2. Valores típicos de parámetros de lixiviados que varían con la edad del relleno sanitario.....	2-17
Tabla 3. Composición de los lixiviados - Diferentes parámetros según edad y localización	2-19
Tabla 4. Resumen de las referencias encontradas sobre otros modelos “integrales” de simulación del vertedero que incluyen biodegradación (I)	2-54
Tabla 5. Resumen de las referencias encontradas sobre otros modelos “integrales” de simulación del vertedero que incluyen biodegradación (II)	2-55
Tabla 6. Estaciones de precipitación cercanas al relleno sanitario El Guacal.....	3-4
Tabla 7. Precipitación media anual en las estaciones cercanas al relleno sanitario El Guacal	3-5
Tabla 8. Características técnicas de la capa de geomembrana	3-9
Tabla 9. Cantidades de residuos sólidos dispuestas durante la operación del relleno sanitario	3-11
Tabla 10. Caracterización de los residuos sólidos del municipio de Envigado	3-12
Tabla 11. Valores de los ensayos de densidad de compactación de los residuos	3-18
Tabla 12. Valores de los ensayos de permeabilidad de los residuos sólidos.....	3-19

Tabla 13. Valores de los ensayos de densidad de compactación del material de cobertura (limo)	3-20
Tabla 14. Valores de los ensayos de permeabilidad del material de cobertura	3-22
Tabla 15. Información de clima utilizada para aplicación del modelo HELP	4-13
Tabla 16. Información de diseño del relleno sanitario y datos de suelo.....	4-13
Tabla 17. Valores para las características de las capas – Corrida 1	4-17
Tabla 18. Valores para las características de las capas – Corrida 2	4-18
Tabla 19. Valores para las características de las capas – Escenario 4 (Corrida No. 5). 4-21	
Tabla 20. Valores de densidades de acuerdo al grado de compactación.....	5-13
Tabla 21. Cantidades de residuos sólidos dispuestos en el relleno sanitario del CIS El Guacal	5-35
Tabla 22. Datos de ensayos de densidad	5-35
Tabla 23. Datos de ensayos de permeabilidad	5-36
Tabla 24. Valores ingresados inicialmente al modelo – Ensayo 1	5-47
Tabla 25. Información climática ingresada al modelo.....	5-49
Tabla 26. Características para la capa de residuos sólidos - Ensayo 2.....	5-49
Tabla 27. Valores ingresados inicialmente al modelo – Ensayo 2.....	5-49
Tabla 28. Características para la capa de residuos sólidos – Calibración del modelo... 5-54	
Tabla 29. Valores ingresados inicialmente al modelo – Calibración del modelo.....	5-54
Tabla 30. Información climática ingresada al modelo.....	5-58
Tabla 31. Valores ingresados en el modelo: cobertura del relleno sanitario – Escenario 1 5-58	

Tabla 32. Valores ingresados al modelo: capa de residuos sólidos y drenaje – Escenario 1 5-58

Tabla 33. Características para la capa de residuos sólidos..... 5-65

Tabla 34. Valores ingresados inicialmente al modelo..... 5-65

1. GENERALIDADES

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo general

Desarrollar un modelo de balance hídrico que permita la estimación de caudales de lixiviados para el relleno sanitario del centro industrial del sur - El Guacal, Envigado – Antioquia.

1.1.2 Objetivos específicos

Revisar modelos de estimación de caudales de lixiviados en rellenos sanitarios.

Realizar modelaciones para la estimación de caudales de lixiviados a partir de modelos desarrollados para balances hídricos en rellenos sanitarios.

Diseñar un modelo de balance hídrico aplicado a la generación de caudales de lixiviados en el relleno sanitario del Centro Industrial del Sur - El Guacal.

Analizar el comportamiento de los caudales de los lixiviados a lo largo de las diferentes etapas del relleno sanitario.

Establecer la influencia de las variables climatológicas y la operación del relleno sanitario en la producción de los lixiviados.

Realizar un diagnóstico sobre la generación de lixiviados del relleno sanitario de Centro Industrial del Sur - el Guacal, presentando recomendaciones para el control de su producción y su efectos.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El crecimiento de las poblaciones y, por consiguiente, el aumento de las actividades antrópicas, trae consigo una alta generación de residuos sólidos que obligatoriamente, deben ser dispuestos en sitios de disposición final como los rellenos sanitarios. La puesta en marcha de estos sitios genera principalmente, entre otros impactos, la formación de

lixiviados, producto de la descomposición de estos residuos y la incorporación del agua proveniente de la precipitación.

En Colombia, la mayoría de las entidades encargadas del funcionamiento de los rellenos sanitarios no estiman de forma precisa la cantidad de lixiviados que se generan durante las etapas de conformación, operación y clausura de estos sitios; esto es evidente al encontrar en los rellenos sanitarios, sistemas de recolección y tratamiento con capacidades insuficientes para manejar los caudales máximos de lixiviados generados en épocas de invierno, quedando como única alternativa, el vertimiento directo de estos líquidos a los cuerpos de agua cercanos a la zona de localización del relleno, ocasionando así, un deterioro ambiental significativo de estos recursos, por lo que es de gran utilidad, predecir en un futuro de forma correcta la generación de lixiviados, a fin de evitar el anterior problema.

Frente a la necesidad de seguir ampliando los rellenos sanitarios, se considera de gran importancia predecir la generación de estos líquidos, con el fin de controlar los impactos ambientales adversos que se presentarían ante un manejo inadecuado de los lixiviados.

1.3 HIPÓTESIS

La producción de lixiviados en un relleno sanitario esta influenciada por las condiciones de operación del relleno, los factores climatológicos de la zona de localización y las medidas de control para la generación de los mismos.

1.4 RESULTADOS ESPERADOS

Los resultados de esta investigación consisten en obtener una herramienta útil que sirva para estimar caudales de lixiviados, para el relleno sanitario del Centro Industrial del Sur - el Guacal y que, a su vez, pueda ser adaptada a otros rellenos sanitarios.

2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

2.1 INTRODUCCIÓN

A continuación se presentan los resultados de una revisión general sobre conceptos, aspectos técnicos y ambientales, consideraciones principales, y herramientas de modelación para los rellenos sanitarios o vertederos de residuos sólidos municipales.

Aunque el desarrollo del tema sobre los rellenos sanitarios es completamente amplio e interdisciplinario, en este marco teórico se resumen los aspectos elementales para comprender el funcionamiento de un vertedero o relleno sanitario, se presentan algunas generalidades sobre los componentes de un vertedero, factores determinantes en el diseño, métodos de operación de un relleno sanitario, procesos evolutivos y transformación de los residuos, además, se describe la formación y características de los lixiviados generados en las diferentes etapas de un relleno sanitario.

Teniendo en cuenta los objetivos específicos, también se presentan los resultados de una revisión bibliográfica de varios modelos desarrollados para simular la formación de los lixiviados en un relleno sanitario. La revisión comprende la descripción conceptual y de fundamentos matemáticos de: modelos hidrológicos, modelos de biodegradación de residuos y modelos integrados. Estos temas permitieron realizar un análisis de las bondades y limitaciones de los modelos estudiados, además de permitir el desarrollo de una herramienta de modelación para rellenos sanitarios basada en los fundamentos conceptuales de los modelos mencionados anteriormente.

2.2 LOS RELLENOS SANITARIOS O VERTEDEROS

El relleno sanitario o vertedero es un método diseñado para la disposición final de los residuos sólidos “no aprovechables”, el cual consiste en depositar en sitios preparados los residuos sólidos, esparcirlos y compactarlos hasta reducirlos al menor volumen posible para que ocupen una pequeña área. En el pasado, el término de relleno sanitario fue usado para denotar simplemente el sitio en el cual los residuos eran depositados en el suelo y cubiertos. En la actualidad, el relleno sanitario moderno se refiere a una instalación diseñada y manejada como una obra de saneamiento básico, que cuenta con elementos de vigilancia lo suficientemente seguros y cuyo éxito radica en la adecuada selección del sitio, en su diseño y, por consiguiente, en su óptima operación y control (Allende, 2001).

Los rellenos sanitarios o vertederos han sido, en la mayoría de los casos, el resultado de la evolución de las soluciones adoptadas para la disposición masiva de los residuos sólidos, y son vistos en la actualidad como una alternativa para frenar los impactos asociados al manejo inadecuado de los residuos sólidos. En el comienzo, cuando se descargaban los residuos en zonas de poco atractivo o valor, se observaban los problemas que iban asociados a esta práctica, por ejemplo: proliferación de todo tipo de vectores, olores, contaminación de aguas, suelos, etc., por lo que se incluyeron excavaciones y quemas para reducir el volumen de los residuos; posteriormente se estableció la recomendación de cubrir los residuos diariamente con capas de tierra, lo cual fue considerado como el inicio del relleno sanitario. Posterior a la puesta en marcha de los vertederos, se identificaron los problemas que esta medida acarrearía, como es la generación de líquidos contaminados altamente concentrados (lixiviados) y gases (con cierto riesgo de explosión y toxicidad).

Modificaciones a los primeros diseños de rellenos sanitarios, con el fin de controlar los problemas asociados a su operación, dieron lugar a diseños acompañados de sistemas de recolección de lixiviados, empleo de capas combinadas con distintos materiales para cubrir los residuos y/o impermeabilizar el relleno, instalación de tuberías para evacuación de gases, así como alternativas de recirculación de lixiviados a través del relleno y construcción de plantas de tratamiento previamente diseñadas, para reducir las cargas contaminantes de estos líquidos.

2.2.1 Componentes de un relleno sanitario

Un relleno sanitario debe tener un diseño y una construcción cuidadosos, cuyo fin sea envolver los residuos y prevenir el escape de los lixiviados al medioambiente. En forma general, la composición de un relleno sanitario consiste básicamente de una cobertura superior, la cual puede estar conformada por capas de suelos como arcillas y arenas, capas de geomembrana y una cubierta final de suelo con vegetación. El interior del relleno sanitario lo conforman las celdas de residuos. Su parte inferior, consta de un sistema de drenajes o filtros; capas de suelos con baja permeabilidad, las cuales se comportan como barreras; y capas de geomembranas en su fondo para la protección de las aguas subterráneas y el control de fugas de lixiviados.

Adicional al conjunto de capas que conforman el interior y exterior de un relleno sanitario, este sitio de disposición final de residuos sólidos debe presentar un sistema para la evacuación de los gases que se generan en su interior. En la mayoría de los rellenos sanitarios, este sistema está conformado por un conjunto de tuberías localizadas en diferentes puntos del vertedero o chimeneas, en otros rellenos sanitarios que presentan alternativas de aprovechamiento de los gases, el sistema de evacuación consta de una interconexión entre tuberías, que finalmente tienen como fin conducir los gases hasta una planta de aprovechamiento de energía.

Con relación a los lixiviados que se producen en un relleno sanitario, el monitoreo del nivel de estos líquidos en el interior del vertedero es de gran importancia, lo mismo que el sistema de recolección, recirculación (cuando se considere necesario) y tratamiento, por lo cual la instrumentación con piezómetros, las tuberías de conducción de los lixiviados y una planta o unidad de tratamiento, se consideran componentes esenciales de la operación adecuada de un relleno sanitario. En la Figura 1 se presenta un esquema de un relleno sanitario moderno y sus componentes.

Específicamente, las coberturas como componentes de un relleno sanitario, son la consideración más importante en su diseño, éstas tienen como fin aislar al medio ambiente de los efectos del relleno sanitario, y viceversa, ya sea el escape de lixiviados, la infiltración por precipitación, la generación de gases, la contaminación de las aguas subterráneas, etc.

Los principales componentes y elementos necesarios para la cobertura y funcionamiento óptimo de un relleno sanitario de residuos sólidos municipales son:

- Sistema de impermeabilización en lados laterales y parte inferior
- Sistema de recolección y remoción de lixiviados y gases
- Sistema de control de lixiviados
- Sistema de cobertura final
- Sistema de manejo de aguas lluvias
- Sistema de monitoreo de aguas subterráneas
- Sistema de monitoreo de gas

De acuerdo con Qian et al. (2002), el sistema de impermeabilización para el vertedero es el conjunto de capas que tienen la función de manejar los efectos contaminantes de los lixiviados, mediante el control del comportamiento físico de estos líquidos, el cual se basa en dos mecanismos de transporte: advección y difusión. En el primero, deben controlar el transporte o movimiento del lixiviado que ocurre bajo un gradiente hidráulico a través del medio poroso (advección), para el segundo mecanismo, la funcionalidad de este sistema es intervenir en el movimiento de los solutos que se encuentran disueltos en el lixiviado (compuestos orgánicos e inorgánicos). Este movimiento se da bajo un gradiente químico o de concentración, el cual permite que los solutos puedan pasar de una zona de alta concentración a una de baja concentración (difusión).

En esta medida, es de gran importancia la selección de los materiales que han de conformar las barreras o capas, lo cual implica el análisis de la conductividad hidráulica para diferentes tipos de material natural o sintético. Esta característica física de los materiales es la que determina qué tipo de proceso de transporte del lixiviado predomina dentro del relleno. Trabajos realizados por Gillham et al. (1984), Crooks y Quigley (1984);

y Schackelford (1988), citados en Qian et al. (2002), han mostrado que en materiales de granos finos (por ejemplo, arcilla) el flujo de solutos en gran parte es gobernado por la difusión, y a medida que la conductividad hidráulica del material disminuye la difusión como una vía de transporte aumenta, permitiendo que se reduzca la concentración de los lixiviados a través de las capas del relleno.

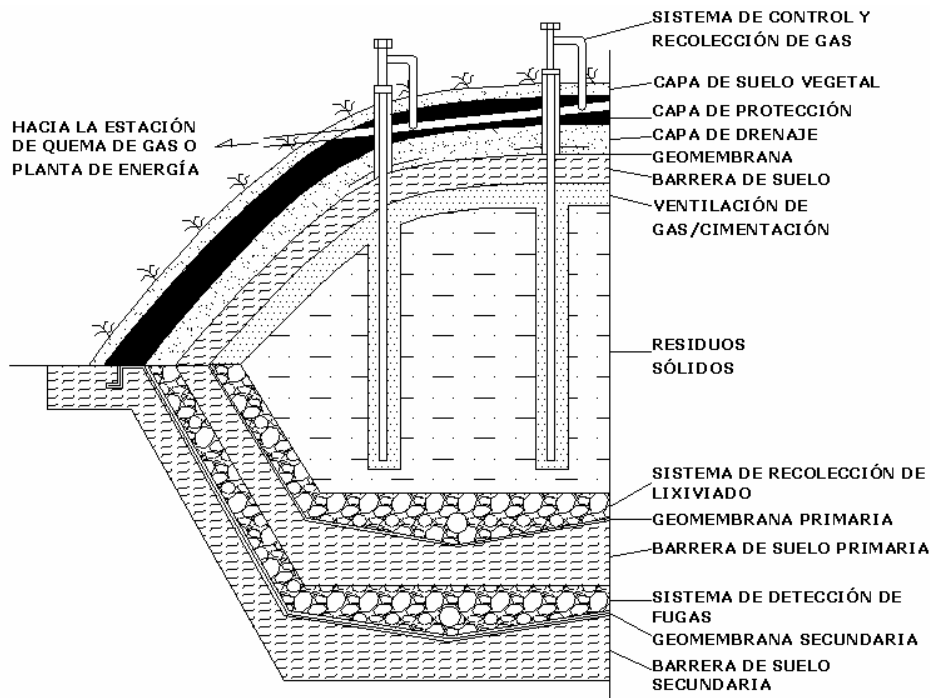


Figura 1. Diagrama esquemático del sistema de componentes de un relleno sanitario
Fuente: Qian et al. (2002).

El lixiviado que se produce en el vertedero, a causa del líquido que expulsan los residuos durante su descomposición y por el agua que se infiltra dentro del relleno, y que percola a través de las capas, debe manejarse por un sistema de recolección y remoción de lixiviados, para prevenir la acumulación de estos líquidos en el interior del relleno, y transportarlos hasta una planta de tratamiento. Además de los lixiviados, la descomposición de los residuos sólidos genera gases como el metano (CH_4) y el dióxido de carbono (CO_2); éstos deben controlarse durante la operación y clausura del relleno, para este propósito se instala en el vertedero un sistema de recolección y evacuación de gases, los cuales pueden emplearse para la producción de energía, o quemados bajo condiciones seguras.

Para el control de los lixiviados el sistema de manejo de estos contaminantes, se considera como el principal requerimiento en el diseño y operación de un vertedero. Para lograr un control sobre los riesgos que implica la producción de lixiviados, un vertedero debe contar con varios tipos de capas que impidan la infiltración y/o permitan el drenaje adecuado de los lixiviados hasta el sistema de recolección. Muchos materiales, en su

mayoría fabricados, se emplean para este propósito, como las capas de membranas flexibles llamada geomembranas. Para el drenaje de los lixiviados se utilizan los filtros y/o tuberías.

De acuerdo con Qasim y Chiang (1994), cada uno de los anteriores componentes del sistema de control de lixiviados es usado para condiciones especiales de acuerdo a sus características:

Geomembranas: son usadas para proporcionar una barrera entre los contaminantes liberados por los residuos sólidos y las aguas subterráneas. En la clausura del vertedero, las geomembranas se utilizan para proporcionar una barrera de cobertura con baja permeabilidad, lo cual ayuda a prevenir la infiltración del agua lluvia y reducir de esta forma la generación de lixiviados.

Capas geosintéticas de arcilla: están fabricadas de bentonita sódica, la cual es distribuida en espesores uniformes entre dos geotextiles. La bentonita sódica tiene una baja permeabilidad, esto hace que este tipo de material sea una alternativa adecuada para conformar las líneas de barrera, que a su vez, son las que funcionan como capas impermeables dentro del vertedero.

Tuberías: las tuberías plásticas se emplean para el drenaje en la recolección de lixiviados, en los sistemas de remoción y en el monitoreo de estos contaminantes.

De otra parte, el sistema de cobertura final, formado por capas impermeables y capas de drenaje, tienen como función proteger las coberturas internas del relleno sanitario de los efectos del ambiente, principalmente los producidos por la infiltración del agua exterior, ya que ésta puede aumentar la producción de lixiviados, después de la clausura del vertedero. La función del sistema de cobertura final debe estar reforzada por el sistema de manejo de aguas lluvias, que tiene como finalidad ayudar a evacuar o drenar de forma rápida la cantidad de agua de precipitación que cae en el vertedero, facilitando así la esorrentía superficial, y disminuyendo las posibilidades de infiltración.

El sistema de monitoreo de aguas subterráneas consta de la instalación de pozos, los cuales deben ser ubicados en las profundidades y lugares adecuados de las fronteras del sitio del vertedero, a fin de obtener muestras del acuífero que puede presentar impactos sobre la calidad del agua (Qasim y Chiang, 1994).

2.2.2 Factores determinantes en el diseño, construcción y funcionamiento de los rellenos sanitarios

Para la selección del sitio de localización del relleno, su diseño, técnicas de manejo y plan de clausura, se deben considerar los factores determinantes en los procesos del relleno sanitario, durante y después de su operación.

La selección de un sitio para la puesta en marcha de un vertedero, es tal vez el más difícil y controversial tema en la planificación de este tipo de obras, sobre todo por los agentes sociales que visionan un relleno sanitario como una amenaza ambiental. A esto se suman los costos de inversión y operación, que implican el transporte de los residuos sólidos, su disposición y su cobertura diaria (cuando las condiciones del sitio no permiten la disponibilidad de materiales naturales para la cobertura de los desechos). Además, desde el punto de vista ambiental, la localización geográfica de un relleno sanitario es determinante con relación a la influencia de las variables climáticas en la producción y composición de los lixiviados (degradación de residuos, caudales y concentración de contaminantes de los lixiviados), lo que, a su vez, influye en la selección de sistemas de cobertura para el relleno sanitario y sistemas de tratamiento capaces de manejar las variaciones hidráulicas y de composición que pueden presentar los lixiviados, en distintas épocas del año y durante la evolución del relleno. Adicional a las condiciones climáticas, las características de los residuos mismos, las condiciones hidrogeológicas y topográficas del sitio, y otros factores, también juegan un papel importante como limitantes o facilitadores en la operación del vertedero.

A continuación, se presenta una descripción general de los factores determinantes en el diseño, construcción y funcionamiento de un relleno sanitario.

- **Suelo y condiciones geológicas**

Las características del suelo presente en el sitio de localización del vertedero son un factor importante en el diseño y operación de los rellenos sanitarios. Dentro de estas características se pueden mencionar: la topografía, el tipo de suelo, en especial, cómo éste puede relacionarse con el movimiento del agua y de los gases; su estratigrafía y estructura, la permeabilidad, manejabilidad, la vegetación, etc.

Es importante considerar la clasificación y las propiedades físicas y químicas de los suelos, a la hora de establecer su uso para construir las capas que conforman el vertedero. Muchas de estas propiedades influyen en el movimiento del flujo en el interior del vertedero a través de diferentes capas; por ejemplo, la arcilla compactada se ha utilizado tradicionalmente como cubierta en la parte superior de los vertederos para aislar los residuos de la intemperie, o también es utilizada para interceptar flujos verticales en el interior del vertedero (barreras de suelo); eso se debe principalmente a su baja conductividad hidráulica; sin embargo, algunas veces su baja plasticidad puede dificultar su colocación y compactación, y su grado de contracción – dilatación puede conducir a un agrietamiento que podría afectar la calidad del sitio. De esta manera, desde el punto de vista técnico, el mejor material para la construcción de capas de barrera de suelo, será aquel que tenga el valor de conductividad hidráulica más bajo posible, que presente plasticidad adecuada para su manejo al compactarse, que logre controlar las infiltraciones de agua al interior del vertedero y, en el caso de sitios de disposición final con

aprovechamiento de biogas, el material de suelo debe minimizar la salida de gas hacia la atmósfera (Qasim y Chiang, 1994).

- **Factores climáticos**

Las variables climáticas del lugar de localización de un relleno sanitario tienen gran importancia en el diseño, construcción, operación y clausura del mismo. La precipitación es una de las variables que más reviste interés en las distintas fases del relleno sanitario, por ejemplo, para el diseño de las capas del vertedero y los sistemas de recolección de lixiviados, se debe tener en cuenta la caracterización de la precipitación del lugar donde operaría el relleno sanitario.

En zonas donde las precipitaciones son muy altas, se esperaría que los caudales de lixiviados que se generan en un relleno sanitario presenten magnitudes acordes con la cantidad de agua que cae en el interior del mismo; bajo estas condiciones, se puede considerar necesario para su diseño y operación, la construcción de capas y usos de coberturas con materiales cuyas características físicas ayuden a controlar la incorporación de grandes cantidades de agua, que, finalmente, llegan a dificultar la operación del relleno y aumentar los volúmenes de líquidos que afloran de su interior.

La precipitación no sólo juega un papel importante en la parte operativa y constructiva del vertedero; esta variable, junto con la evaporación, evapotranspiración y temperatura ambiente, interviene en la generación de los lixiviados, en la descomposición de los residuos, en las variaciones de los almacenamientos de humedad de las capas de suelo del relleno y en diversos procesos físicos, biológicos y químicos que ocurren en el interior del vertedero; por lo tanto, deben ser consideradas en los balances hídricos, en el análisis de la biodegradación de los residuos sólidos en el relleno, en los diseños de los sistemas de tratamientos de lixiviados, entre otros.

Otra variable climática que tiene importancia en los rellenos sanitarios son los vientos, en especial por su relación con el transporte de olores y biogases que se producen en el interior del vertedero, siendo estas condiciones, parámetros determinantes en la localización y operación de un relleno sanitario.

- **Factores hidrológicos**

Los factores hidrológicos se pueden establecer como determinantes para la localización, construcción y operación del relleno sanitario, debido a su influencia en la producción de lixiviados y los riesgos de contaminación por parte de estos líquidos en las fuentes de aguas superficiales y subterráneas. Con relación a lo anterior, es necesario considerar las reglamentaciones establecidas por las autoridades ambientales, para la localización del relleno sanitario con relación a corrientes de agua y acuíferos presentes en la zona del proyecto.

- **Características físicas de los residuos y los materiales de las capas**

Las características de los residuos sólidos y de los materiales para la construcción de las capas y coberturas de un relleno sanitario, de interés, son las que se asocian al movimiento del fluido en el interior del vertedero y a la protección del medio ambiente frente los efectos adversos de la operación del relleno sanitario (escape de gases, fugas de lixiviados, contaminación de las corrientes de agua superficiales y subterráneas, etc.).

Entre las características físicas más importantes de los residuos sólidos y de los materiales artificiales y naturales a emplear en la operación y clausura del vertedero, se encuentran la permeabilidad y la densidad de compactación de los mismos, sobre todo, teniendo en cuenta que estas características influyen directamente en el movimiento del flujo (lixiviados y/o agua de infiltración) en el interior del relleno sanitario.

2.2.3 Métodos de operación de un relleno sanitario

La disposición de los residuos sólidos en el relleno y su cobertura se puede realizar en diferentes configuraciones geométricas y espaciales. Estas configuraciones definen el método a utilizar para la operación del relleno sanitario y deben seleccionarse con base en las condiciones topográficas, geotécnicas e hidrogeológicas del sitio seleccionado para la disposición final de los residuos.

De acuerdo con Qian et al. (2002), los métodos de operación a implementarse en un relleno sanitario son:

- **Método de trinchera**

Para este método los residuos sólidos son vertidos en zanjas profundas y estrechas, y son cubiertos con el material producto de la excavación de cada trinchera. Este método se utiliza generalmente para pequeñas cantidades de residuos.

- **Método del área**

Este método debe utilizarse en áreas relativamente planas, donde no es factible excavar trincheras para enterrar los residuos sólidos. Éstos pueden depositarse directamente sobre el área, en cuyo caso el material de cobertura deberá importarse de otros sitios, o si es posible, puede extraerse de la capa superficial. Este método también se adapta para rellenar depresiones naturales o artificiales. El material de cobertura se excava de las laderas del terreno, procurando que sea lo más cerca posible, para evitar sobrecostos en el transporte.

- **Método combinado**

Los métodos de área y trinchera, por poseer técnicas similares de operación, pueden combinarse para obtener un mejor aprovechamiento del terreno del material de cobertura y rendimientos en la operación. Si las condiciones topográficas lo permiten, se pueden combinar los métodos.

- **Método de valle**

En este método, los residuos sólidos se depositan entre colinas o en terrenos ondulados. La operación del relleno puede planearse de manera que se formen escalones, haciendo pequeñas excavaciones para obtener el material de cubierta.

La Figura 2 presenta los esquemas de los diferentes métodos de operación de un relleno sanitario

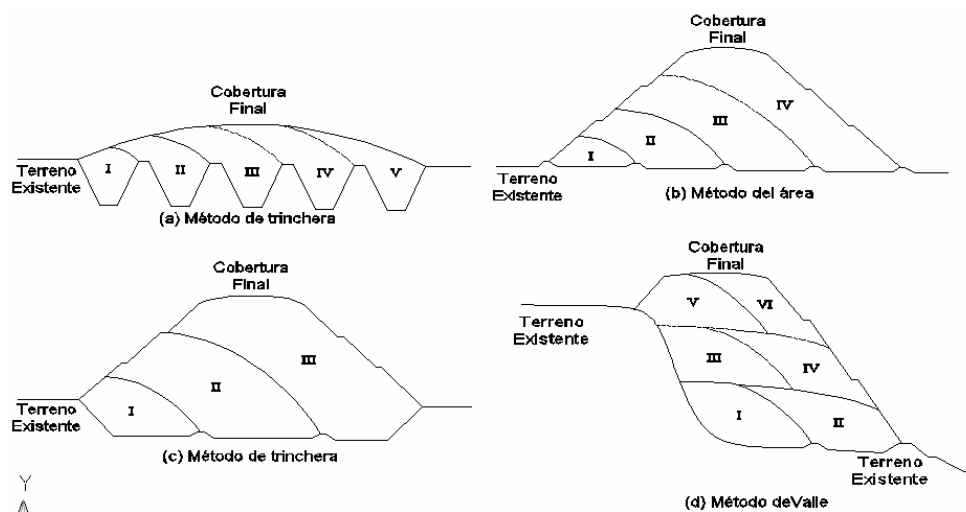


Figura 2. Métodos de operación de un relleno sanitario
Fuente: Quian et al. (2002).

- **Aspectos normativos**

Los aspectos normativos hacen referencia a los criterios vigentes que son de obligatorio cumplimiento, presentados en reglamentaciones, resoluciones, decretos y otros, para el diseño, construcción, operación, clausura y posclausura de los rellenos sanitarios.

En el presente trabajo de investigación, se han considerado las normatividades vigentes para los países de Colombia, España y Estados Unidos, teniendo en cuenta que los modelos analizados en esta tesis se han desarrollado para dichos países, y que el desarrollo y aplicación de los modelos han tenido en cuenta las exigencias establecidas por las entidades ambientales de cada país, con relación a los estudios previos y

evaluaciones necesarias para el desarrollo de las diferentes etapas de un relleno sanitario.

Colombia: a nivel de nuestro país, actualmente se encuentra vigente el Decreto 838 de 2005, expedido por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial – MAVDT (MAVDT, 2005), este decreto modifica el Decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y dicta otras disposiciones. En él se presentan las reglamentaciones sobre la localización de áreas para la disposición final de residuos sólidos, tales como: procedimiento, criterios, metodología, prohibiciones y restricciones.

Para la localización del relleno sanitario, el decreto establece la metodología de selección del sitio, considerando varios criterios y restricciones, con relación a las condiciones del uso del suelo, accesibilidad vial, topografía, condiciones geotécnicas y geomorfológicas distancia al perímetro urbano, distancia a cuerpos hídricos, fuentes de aguas superficiales y subterráneas, dirección de vientos, entre otros aspectos.

El decreto igualmente fija las consideraciones ambientales y técnicas para la planeación, construcción, operación y clausura de los rellenos sanitarios. Para esta parte, el decreto determina que se deben considerar las especificaciones técnicas establecidas en el Título F del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS 2000 (Ministerio de Desarrollo Económico - MinDesarrollo, 2000) el cual se instituye como de obligatorio cumplimiento. Cabe resaltar que las consideraciones ambientales y técnicas a las que hace referencia el Decreto 838 de 2005, y que se deben cumplir de acuerdo al RAS – 2000, son: el reglamento operativo para el relleno sanitario, el plan de trabajo y construcción, los criterios operacionales, y el control y monitoreo ambiental sobre la zona de localización del relleno sanitario y sus recursos naturales. Con relación a este último punto, el decreto se refiere a que se deben incluir en los diseños del relleno sanitario, la red de monitoreo de aguas subterráneas, la identificación de las fuentes superficiales y los puntos donde se realizará el control y monitoreo; además, establece cuáles son los parámetros y la frecuencia para realizar el análisis de la calidad de los cuerpos de agua que pueden ser vulnerables a los rellenos sanitarios.

En cuanto a los alcances de este trabajo de investigación, es importante mencionar lo establecido en el RAS 2000 en el numeral F6.3.6 referente a la generación de lixiviados: “debe aplicarse un modelo matemático para conocer de manera confiable la cantidad de lixiviados a generarse en el relleno sanitario, tanto en la operación como en el cerramiento a 20 años. Para determinar la generación de lixiviados, deben tenerse en cuenta los factores climatológicos, así como las características de los residuos, las características del material de cobertura, las características de la operación, las características del cerramiento final y el mantenimiento a largo plazo de éste. Debe hacerse un análisis de escenarios de trabajo para las diferentes características mencionadas, incluyendo operaciones adecuadas e inadecuadas del sistema. De manera específica deben tenerse en cuenta las infiltraciones de aguas lluvias, de escorrentía y del nivel freático al relleno.

El modelo a utilizar para la generación de lixiviados debe igualmente considerar la generación de éstos por efectos de la descomposición de la fracción orgánica de los residuos en el relleno. Deben igualmente verificarse las capacidades de drenaje del sistema, para garantizar que el lixiviado producido se pueda evacuar” (MinDesarrollo, 2000).

De acuerdo con lo anterior, está visto que el desarrollo o aplicación de un modelo para estimar correctamente la generación de lixiviados en un relleno sanitario, desde su operación, hasta después de su clausura, es de obligatorio cumplimiento por parte del prestador del servicio público de aseo, en la actividad complementaria de disposición final de residuos sólidos.

Finalmente, en el Decreto 838 de 2005, se fijan las competencias de los municipios, distritos, departamentos y prestadores del servicio público de aseo, para la gestión política, social, ambiental técnica y económica necesaria para la puesta en marcha de los sitios de disposición final. Igualmente, se dedica un título de este decreto al fomento de la regionalización de los sitios de disposición final y, por último, se presentan las disposiciones referentes a la selección del método del relleno sanitario y a la recuperación, y usos actuales y futuros de los sitios de disposición final.

España: en este país con relación a la eliminación de los residuos sólidos mediante su depósito en vertederos, se encuentra vigente el Real Decreto 1481/2001 del 27 de diciembre. Decreto establecido por la Directiva 1999/31/CE - Consejo de la Unión Europea (Directiva del CE, 1999).

En este documento se fija un régimen concreto para la eliminación de los residuos sólidos mediante el uso de vertederos. Se configuran las líneas básicas de su regulación, la clasificación de los vertederos en tres categorías, la definición de los tipos de residuos aceptables en cada una de dichas categorías, el establecimiento de una serie de requisitos técnicos exigibles a las instalaciones, la obligación de gestionar los vertederos después de su clausura y una nueva estructura e imputación de los costos de las actividades de vertido de residuos sólidos.

Es importante resaltar que el Real Decreto 1481/2001 delimita los criterios técnicos mínimos para el diseño, construcción, explotación, clausura y mantenimiento de los vertederos. También incluye la adaptación de los vertederos actuales a las exigencias del Real Decreto y los impactos ambientales a considerar en una nueva situación.

Además de los artículos principales, en este Real Decreto se presentan como Anexo I los requisitos generales para toda clase de vertedero, en lo que se refiere a: ubicación; control de aguas y gestión de lixiviados; protección del suelo y de las aguas, punto en el cual se establecen las condiciones de permeabilidad y espesor de las barreras geológicas naturales y artificiales; además se exige el uso de revestimientos artificiales bajo la masa

de residuos sólidos para cierta categoría de vertederos, todo con el fin de impedir la contaminación del suelo, de las aguas subterráneas o de las aguas superficiales, y garantizar la recogida eficaz de los lixiviados. Para mayor claridad sobre la conformación de barreras bajo la masa de residuos sólidos, en el numeral 3 del Anexo I de este Real Decreto se presentan esquemáticamente dichas conformaciones para cada categoría de vertedero.

Los otros puntos que toca el Real Decreto como Anexo I son: los requerimientos para el control de gases; la mitigación, reducción y control de molestias y riesgos; el manejo de la estabilidad del vertedero, con relación a la disposición de los residuos sólidos y las medidas de seguridad para el acceso al vertedero.

En un Anexo II se presentan claramente los criterios y procedimientos para la admisión de los residuos; los tipos de residuos que deben ingresar al vertedero; los procedimientos para la caracterización básica de los residuos; las pruebas de cumplimiento y la verificación in situ.

En el Anexo III, como parte importante de la gestión de los vertederos, durante la fase de explotación y de mantenimiento posterior, se presentan los procedimientos para el control y vigilancia, con el fin de comprobar que: los residuos han sido admitidos para su eliminación de acuerdo con los criterios fijados para la clase de vertedero de que se trate; los procesos dentro del vertedero se producen de la forma deseada; y que los sistemas de protección del medio ambiente funcionan plenamente según las condiciones establecidas por la autoridad ambiental para el vertedero.

Para el control y monitoreo, en el Anexo III se presentan las consideraciones para la toma de datos meteorológicos necesarios para los balances hidrológicos de estimación de caudales de lixiviados; datos de emisión para el control de aguas, lixiviados y gases, en sí, los parámetros para los monitoreos y la frecuencia con que éstos se deben realizar. Con relación a las aguas subterráneas, se establecen los procedimientos para la toma de muestras, vigilancia de la calidad del agua y el procedimiento para los niveles de intervención, si la calidad del agua se ha visto afectada; finalmente, se presentan los requerimientos para las actividades de topografía en el vaso de vertido.

Estados Unidos: en este país, las reglamentaciones de obligatorio cumplimiento para cualquier vertedero son las contenidas en el *Code of Federal Regulations 40* (CFR) en su parte 258 Subtitulo D - *Criteria For Municipal Solid Waste Landfills* de la *Resource Conservation and Recovery Act* (RCRA). La aplicación de este código se hace mediante la *U.S. Environmental Protection Agency* (EPA), bajo la autoridad del epígrafe D del RCRA.

El CFR establece los requisitos reglamentarios para la localización, diseño y operación para nuevos vertederos o para aquellos que se piensan ampliar; para el monitoreo de las

aguas subterráneas y acciones correctivas; los cuidados para la clausura y posclausura de los vertederos; y los criterios para las garantías de financiación de las etapas de clausura, posclausura y acciones correctivas. Todas las regulaciones de este código son aplicables desde el año de 1994.

2.2.4 Descomposición de los residuos y procesos evolutivos en un relleno sanitario

Lobo (2003) establece que son muchas las variables que condicionan el proceso de descomposición del residuo: las características del propio residuo (composición, densidad, tamaño de partícula); la presencia de humedad; la temperatura; pH; la disponibilidad de nutrientes y presencia de microorganismos; la existencia de factores inhibidores como son el oxígeno, metales, sulfato, etc.; sin embargo, las variables fundamentales, al estudiar la degradación en el vertedero es la naturaleza de los residuos, materiales que lo componen, composición química y estructura de los mismos.

Estas características son difíciles de conocer en detalle; sin embargo, para conocer el potencial de producción de metano (PBM – Potencial Bioquímico de Metano) y humedad de los residuos, es importante contar con datos estimados de composición y porcentajes de biodegradabilidad de los residuos municipales que llegan a un vertedero (Lobo, 2003). En la Tabla 1 se presentan estos datos provenientes de diferentes autores de estudios sobre biodegradabilidad de los residuos.

Tabla 1. Biodegradabilidad de los principales componentes de los residuos municipales, según varios autores

Componente del residuo		Papel	Cartón	Residuos de alimentos	Residuos de Jardín	Madera	Textil	Goma - Cuero
Composición media (1) (%)	C	43.50	44.00	48.00	47.80	49.50	55.00	69.00
	H	6.00	5.90	6.40	6.00	6.00	6.60	9.00
	O	44.00	44.60	37.60	38.00	42.70	31.20	5.80
	N	0.30	0.30	2.60	3.40	0.20	4.60	6.00
	S	0.20	0.20	0.40	0.30	0.10	0.15	0.20
Fracción gasificable (1)		12%	11%	22%	10%	8%	5%	6%
Fracción biodegradable (2)		44%	38%	58%	45%	61%	40%	0%
PBM (mlCH ₄ /g seco)		184	161	281	207	294	222	0
PBM (mlCH₄/g seco) (3)		74 - 217	152	301	31 - 144	63		
Fracción biodegradable correspondiente		19% - 56%	39%	70%	7% - 34%	14%		
PBM (mlCH₄/g seco) (4)		93 - 249	183	16 - 94*	91 - 235	14 - 158	94 - 142	
Fracción biodegradable correspondiente		30% - 40%	44%		20% - 51%	3% - 33%	17% - 25%	

Fuente: Lobo et al. (2002): El PBM se obtiene aplicando la reacción de descomposición total a la "fórmula química" correspondiente; (2) Tchobanoglous et al. (1994); (3) Barlaz et al. (1997); (4) Harries et al. (2001); citados en Lobo (2003).

Una vez ha iniciado el depósito de los residuos sólidos en el relleno sanitario, éstos comienzan a degradarse, como consecuencia de: la naturaleza de los desechos, la humedad (tanto la del residuo, como la de la infiltración), la temperatura, el pH, la presencia de microorganismos y la disponibilidad de nutrientes. Los resultados de esta degradación, dependiendo de la fase en la que se encuentre el relleno, son: generación de lixiviados, producción de biogas y estabilización del residuo.

Las fases anteriormente mencionadas fueron descritas en forma resumida por Tchobanoglous et al., (1994), en donde se definen como una sucesión de etapas más o menos secuenciales, de acuerdo al proceso de degradación de los residuos sólidos en un relleno típico. González y Espinosa (2001) explican estas fases de la siguiente forma:

- **Fase I - Descomposición inicial**

En esta fase los residuos experimentan una descomposición aeróbica, producto del oxígeno presente en el aire atrapado durante la conformación de las celdas y de la acción de los organismos presentes en el suelo y en los residuos. A medida que se generan las reacciones químicas en esta etapa el oxígeno es totalmente consumido.

- **Fase II - Descomposición anaerobia**

En esta fase se consume el oxígeno disponible y se inicia progresivamente la etapa anaerobia de descomposición. Por una parte, los nitratos y los sulfatos presentes pueden ser reducidos a gas nitrógeno y a ácido sulfhídrico (H_2S). La comunidad microbiana inicia la conversión de la materia orgánica en metano (CH_4) y en dióxido de carbono (CO_2); el pH del lixiviado que se va formando empieza a descender, como respuesta a la presencia de gases orgánicos y a la elevada concentración de CO_2 .

- **Fase III – Acidificación**

En esta fase, la acidificación comenzada en la fase anterior se acelera con la producción de ácidos orgánicos y menores cantidades de gas hidrógeno (H_2). Tienen lugar, entonces, tres pasos en el proceso: el primero, la hidrólisis de los compuestos molecularmente complejos, como los lípidos, los polisacáridos, las proteínas y los ácidos nucleicos; el segundo paso es la acidogénesis propiamente dicha; por último, se da la formación del ácido acético (CH_3COOH). El gas formado en esta fase es el dióxido de carbono (CO_2); el pH del lixiviado baja durante esta fase a 5 ó menos. La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y la demanda química de oxígeno (DQO) aumentan considerablemente en esta etapa. Algunos metales pesados son solubilizados, como respuesta al descenso del pH. Muchos nutrientes esenciales del proceso son liberados al lixiviado en esta fase, por lo cual, si no se recircula el lixiviado, los nutrientes se perderán para el sistema.

▪ Fase IV – Metanogénesis

En esta fase, un segundo grupo de microorganismos se hace predominante; éstos convierten el ácido acético y el gas hidrógeno en metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). El proceso es estrictamente anaerobio; además, la producción de ácidos se reduce, con lo cual el valor del pH en el lixiviado sube a valores entre 6.8 y 8, así pocos constituyentes inorgánicos pueden permanecer en solución; los metales pesados disueltos en lixiviados también disminuirán, porque se precipitan dentro del relleno.

▪ Fase V – Maduración

El relleno entra en la fase de maduración cuando el material biodegradable fácilmente transformable ha sido convertido a CH_4 y CO_2 en la fase anterior. La cantidad de gas producida en esta fase disminuye notablemente, ya que los nutrientes han sido evacuados con el lixiviado en las fases previas, y porque los remanentes sólidos dentro del relleno son biodegradados en forma más lenta. Pequeñas cantidades de oxígeno y nitrógeno comienzan a penetrar en el relleno, en esta fase.

Esta última fase de los procesos evolutivos en un vertedero es también conocida como fase húmica. La duración de esta fase se espera a muy largo plazo (probablemente a muchos cientos de años) e inicia partir de la finalización de la producción de metano. Antes de esta fase, sólo una muy pequeña parte de los metales tóxicos depositados en un vertedero lixivía, y por tanto, los depósitos de residuos todavía tienen un gran potencial de contaminación. Más del 99,9% de los metales se encuentra aún en los residuos sólidos residuales de la fase anaeróbica (Belevi y Baccini, 1989; citados en Bozkurtu et al., 1999). La Figura 3 representa, mediante curvas, la variación de las características de los gases y lixiviados en cada una de las fases antes mencionadas.

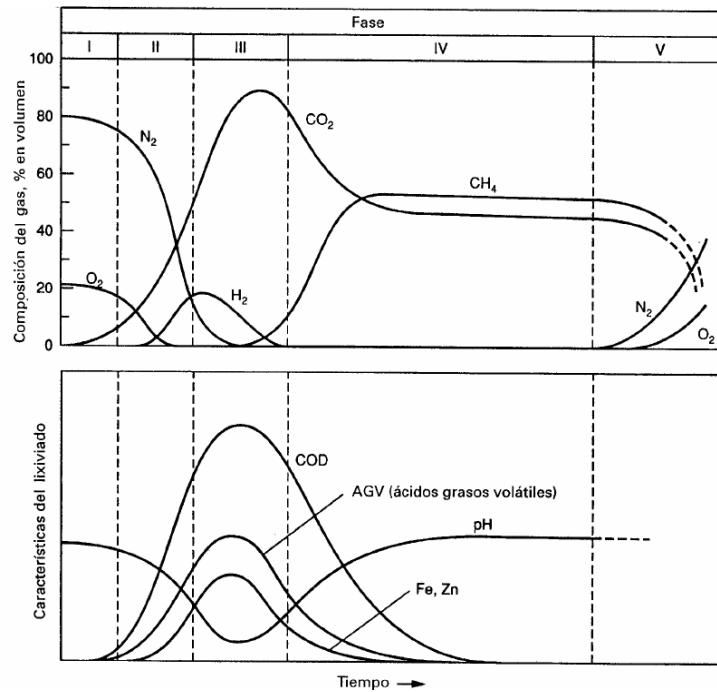


Figura 3. Variaciones de los gases y lixiviados en las fases de un relleno sanitario
Fuente: Tchobanoglous et al. (1994).

Algunos investigadores coinciden en señalar que la humedad parece ser el parámetro que más condiciona la velocidad de descomposición en el vertedero (Barlaz et al. (1990); Young (1995); El-Fadel et al. (1997); citados en Lobo (2003)). De otra parte, El-Fadel et al. (1996), expone que otras variables en la degradación anaeróbica, como la temperatura y el pH, no muestran un efecto tan pronunciado, porque los rangos en que se mueven en las instalaciones de vertido no llegan a ser inhibitorios; sin embargo, de acuerdo con Bozkurtu et al., (1999), el pH al igual que el potencial redox, son de gran importancia en la última fase de la evolución del vertedero, por condicionar la movilidad de los metales pesados y su retención. Además, sí la capacidad reductora disminuye y la capacidad amortiguadora del pH de los principales componentes inorgánicos presentes en el vertedero es agotada, entonces, los metales pueden disolverse en el agua ácido-oxidante retenida en los poros de las capas del relleno, logrando, de esta forma, salir del vertedero con el agua que fluye a través del mismo.

2.2.5 Lixiviados de un relleno sanitario: características

Los lixiviados son un líquido que se forma por la descomposición de los materiales que constituyen los residuos sólidos, ya sea por las mismas características de los componentes de los residuos y/o por el contacto de estos con el agua que logra infiltrar en el relleno, dando como resultado una sustancia con elevadas cargas orgánicas, metales pesados, ácidos, sales y microorganismos, convirtiéndolos en un contaminante altamente agresivo para el ambiente. La composición media de estos líquidos varía según la

localización geográfica, edad y el tipo de residuo depositado en el vertedero; sin embargo, todos los lixiviados coinciden en presentar una alta carga orgánica contaminante (Agudelo, 1998).

Con relación a la localización geográfica, los caudales de lixiviados y su concentración de contaminantes están estrechamente relacionados con la precipitación, la escorrentía superficial, la infiltración, las pérdidas por evaporación y la intrusión de aguas subterráneas que se filtran a través del vertedero. Tal como se describe en el numeral 2.2.4, la edad del relleno sanitario también influye en la presencia de compuestos orgánicos e inorgánicos en los lixiviados.

Los parámetros básicos de caracterización de un lixiviado son, entre otros: carga orgánica, pH, concentración de sólidos disueltos y en suspensión, dureza, concentración en fosfatos y nitratos, etc.

En la Tabla 2 se presentan los valores típicos de los parámetros de lixiviados de un relleno sanitario reportados por Tchobanoglous et al. (1994).

Tabla 2. Valores típicos de parámetros de lixiviados que varían con la edad del relleno sanitario

Parámetro (unidad)	Relleno nuevo (menos de 5 años)	Relleno maduro (mayor de 10 años)
	Rango	Rango
DBO ₅ (mg/l)	2,000 – 30,000	100 – 200
COT (carbono orgánico total) (mg/l)	1,500 – 20,000	80 – 160
DQO (mg/l)	3,000 – 60,000	100 – 500
Sólidos totales en suspensión (mg/l)	200 – 2,000	100 – 400
N-org (mg/l)	10 – 800	80 – 120
NH ₄ (mg/l)	10 – 800	80 – 120
NO ₃ (mg/l)	10 – 800	5 – 10
P total (mg/l)	5 - 100	5 – 10
Ortofosfato (mg/l)	4 – 80	4 – 8
Alcalinidad (mg/lCaCO ₃)	1,000 – 10,000	200 – 1,000
pH	4.5 – 7.5	6.6 – 7.5
Dureza total (mg/l CaCO ₃)	300 – 10,000	200 – 500
Ca (mg/l)	200 – 3,000	100 - 400
Mg (mg/l)	50 – 1,500	50 – 200
K (mg/l)	200 – 1,000	50 – 400
Na (mg/l)	200 – 2,500	100 – 200
Cl (mg/l)	200 – 3,000	100 – 400
SO ₄ (mg/l)	50 – 1,000	20 – 50
Fe total (mg/l)	50 – 1,200	20 - 200

Fuente: Tchobanoglous et al. (1994).

Los valores de los componentes de los lixiviados presentados en la Tabla 2 están contenidos dentro de unos rangos típicos, que permiten variaciones dependiendo de la edad del vertedero; sin embargo, la localización geográfica del vertedero y los tipos de residuos depositados en el mismo, que, a su vez, están ligados a las crecientes actividades comerciales e industriales y a los estilos de vida de cada país, hacen que los valores de estos componentes puedan variar de un país a otro. Renou et al. (2007) recopiló diferentes estudios de caracterización de lixiviados para varios rellenos en diversos países, y compiló los valores encontrados para los principales parámetros de caracterización de lixiviados, estos valores se presentan en la Tabla 3, evidenciando que la edad del vertedero y el grado de estabilización de los residuos sólidos tiene un efecto significativo en la composición de los lixiviados.

Tabla 3. Composición de los lixiviados - Diferentes parámetros según edad y localización

Edad	Sitio del vertedero	DQO (mg/l)	DBO (mg/l)	DBO/DQO (mg/l)	pH	SS (mg/l)	NTK	NH ₃ -N (mg/l)
J	Canadá ¹	13.800	9.660	0,70	5,8	-	212	42
J	Canadá ¹	1.870	90	0,05	6,6	-	75	10
J	China, Hong Kong ¹	15.700	4.200	0,27	7,7	-	2.260	2.260
J	China, Hong Kong ¹	17.000	7.300	0,43	7,0 – 8,3	> 5.000	3.200	3.000
J	Grecia ¹	70.900	26.800	0,38	6,2	950	3.400	3.100
J	Italia ¹	19.900	4.000	0,20	8,0	-	-	3.917
J	Turbia ¹	16.200 – 20.000	10.800 – 11.000	0,55 - 0,67	7,3 – 7,8	2.400	-	1.682
J	Colombia ²	25.622	17.456	0,68	7,9	2.069	-	1.649
EM	Canadá ¹	3,210 - 9,190		-	6,9 – 9,0	-	-	-
EM	China, Hong Kong ¹	7.439	1.436	0,19	8,22	784	-	-
EM	Grecia ¹	5.350	1.050	0,20	7,9	480	1.100	940
EM	Italia ¹	5.050	1.270	0,25	8,38			1.330
EM	Turkia ¹	9.500		-	8,15		1.450	1.270
V	Brasil ¹	3.460	150	0,04	8,2			800
V	Francia ¹	500	7,1	0,01	7,5	130	540	430
V	Colombia ³	290	108	0,37	6,84	9.020	-	897,15

J: vertedero joven, ≤ 5 años. EM: vertedero de edad media, $> 5 \leq 10$ años. V: vertedero viejo, > 10 años. 1: Fuente: Renou et al. (2007). 2: Relleno sanitario La Pradera (Don Matías, Antioquia), Fuente: EE.VV.M (2006). 3: Relleno sanitario Curva de Rodas (Bello, Antioquia), Fuente: EE.VV.M (2006).

2.3 MODELACIÓN EN RELLENOS SANITARIOS

La generación de lixiviados en los sitios de disposición final ha sido motivo de estudio desde hace mucho tiempo, por varios investigadores, por lo que se han desarrollado y mejorado diversas herramientas para predecir la generación y composición de estos líquidos.

Para poder prever y cuantificar la generación, composición y comportamiento de los lixiviados, y cómo controlarlos o tratarlos, se requiere saber el tiempo que tardan los lixiviados en aparecer y la cantidad aproximada que se genera a lo largo de la vida del relleno sanitario. Esta información resulta ser muy útil para diseñar los dispositivos de manejo de lixiviados, tales como líneas de conducción o sistemas de recirculación, laguna de evaporación o plantas de tratamiento (El-Fadel et al., 1997).

Para cuantificar y predecir la generación de lixiviados en un relleno sanitario, se han desarrollado varios modelos y programas basados en modelos matemáticos. La mayoría de estos modelos se basa en el *Water Balance Method* - WBM de la *Environmental Protection Agency* – EPA (Fenn et al., 1975). Este método se basa en la cuantificación de diversos parámetros que intervienen en la producción de lixiviados, tales como precipitación, evapotranspiración, escurrimiento superficial, infiltración y percolación, de los cuales, los parámetros climatológicos, se obtienen de datos meteorológicos mensuales totales multianuales y mensuales promedios (Cruz et al., 1997).

Como es visto, los modelos de estimación de lixiviados basados en el WBM sólo consideran la parte hidrológica y desligan de la modelación la generación del biogas y las variaciones de humedad aportadas por la degradación de los residuos a lo largo de la vida del vertedero, razón por la cual es necesario, a la hora de modelar, la generación de lixiviados, contar con un modelo que integre las variables hidrológicas y los procesos evolutivos de la degradación de los residuos.

Con el fin de simular la variedad de procesos que ocurren en el interior de un relleno, por ejemplo: la biodegradación de los residuos a lo largo de la vida del vertedero, la generación de los lixiviados y su variabilidad con relación a su composición, la producción y emisiones de biogas, etc., se ha desarrollado una variedad de modelos basados en formulaciones matemáticas que intentan predecir la ocurrencia y comportamiento de estos procesos; sin embargo, los numerosos intentos de modelación han sido desarrollados en su gran mayoría de forma aislada y pocos han intentado integrar los procesos hidrológicos con los químicos y los físicos, estos últimos relacionados con las condiciones de construcción y operación del relleno.

En Lobo (2003), se expone que Zacharof y Butler (1999) proponen un método que asocia un modelo simplificado de degradación del residuo con uno hidrológico y de transporte de contaminantes de tipo estocástico. Con él realizan simulaciones teóricas y de celdas experimentales en las que logran aproximaciones esperanzadoras. Pero esta clase de herramientas es difícilmente aplicable en fase de predicción, pues por su propia naturaleza no es posible la calibración, sin observaciones de campo previas. Además de este modelo, se han realizados otros trabajos con estos mismos alcances, los cuales serán descritos en una revisión del estado del arte presentada en este capítulo.

2.3.1 Modelos hidrológicos

Para cuantificar los lixiviados que se generan en un vertedero puede emplearse un balance hidrológico global, el cual, teniendo en cuenta la capacidad de retención de los residuos, los aportes, consumos y salidas de agua del vertedero, logra estimar la cantidad de lixiviado correspondiente.

El balance hídrico admite distintos modelos para cuantificar cada uno de sus términos, y por ello, surgen distintas formulaciones para aplicarlo. El planteamiento básico del método es que todo el agua que se infiltra a través de la capa superficial del vertedero y no es evapotranspirada, acaba apareciendo como lixiviado, lo que sólo ocurrirá en realidad cuando el vertedero haya cubierto su capacidad de retención de humedad, que puede tardar un tiempo considerable (Lobo, 2003).

La aplicación más general que se ha hecho para el balance hidrológico en un vertedero a través de programas, es la realizada por el modelo HSSWDS (*Hydrologic Simulation for Estimating Percolation at Solid Waste Disposal Sites*), desarrollado para la EPA por Perrier y Gibson (1980). Este modelo surge como una modificación del programa CREAMS (*Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems*) desarrollado por Knisel y Nicks (1980) del *Department of Agriculture* (USDA).

También se han desarrollado programas basados en la parte hidrológica, tales como el HELP (*Hydrology Evaluation Leachate Performance*) (EPA, 1984), el cual sólo reporta ser usado en Colombia por el trabajo de Giraldo (2005); el SOILINER (Jhonson, 1986), el FULLFILL (Noble et al., 1991), el FILL (*The Flow Investigation for Landfill Leachate*) (Noble et al., 1992), el Balance de Agua en Serie (BASE) (Cruz et al., 1997). Posteriormente, aparecen otros modelos, que, también, con balances “a corto plazo” (generalmente diarios), tratan de simular el caudal de lixiviado mediante expresiones empíricas. Es el caso de los modelos publicados por Guyonnet et al. (1998) y Butler et al. (1999). Existen otros programas que proporcionan soluciones numéricas unidimensionales, utilizando como herramienta las diferencias finitas. Cada programa presenta ciertas ventajas, restricciones y un grado de aproximación diferente.

La teoría en la que se basan los programas, además del balance hídrico, es la teoría del flujo en medios porosos, que obedece a la ley de Darcy. Este tipo de modelos o programas cada vez se perfecciona y calibra, con el fin de adaptarse mejor a sitios de disposición final reales (Uggiccioni et al., 1997).

▪ Balance hídrico en un relleno sanitario

El balance hídrico en un relleno sanitario considera las características de conformación del mismo (número y tipo de capas que lo conforman, tipo de cobertura superficial y de fondo, tipo de vegetación en la superficie, entre otras), así como las condiciones climáticas de su zona de localización, tales como: precipitación, temperatura, radiación solar, velocidad del viento, humedad relativa, etc. La Figura 4 ilustra las variables involucradas en el balance hídrico de un relleno sanitario (sin tener en cuenta los aportes de humedad de los residuos).

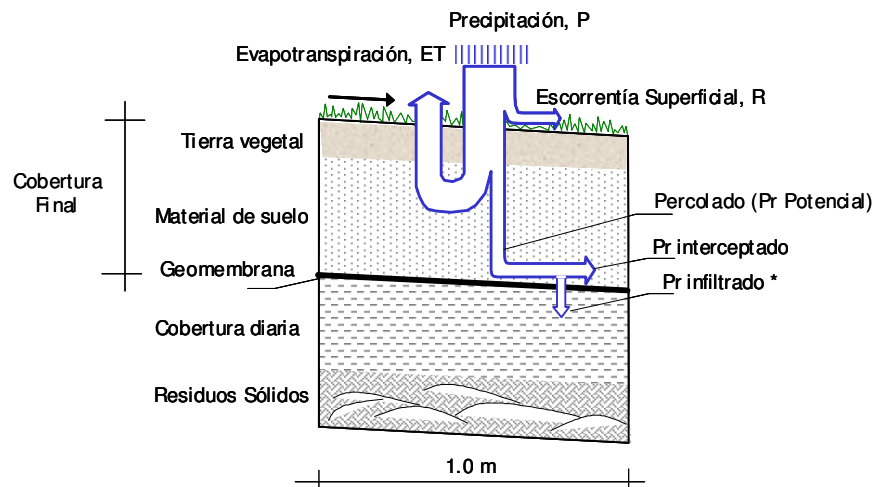


Figura 4. Componentes del balance hídrico de un relleno sanitario

Fuente: Universidad Sergio Robledo, Postgrado de Recursos Naturales (2002) – Material de clase.

Del agua que cae en la capa superficial del relleno (precipitación), una fracción penetra hacia el interior del mismo (infiltración), mientras que la fracción restante queda almacenada sobre la superficie formando charcos (almacenamiento superficial), o escurre hacia otras zonas (escorrentía superficial). En caso de existir una capa vegetal en la superficie del relleno, una porción del agua infiltrada que queda retenida en las zonas menos profundas volverá a la atmósfera por evaporación o evapotranspiración. De otra parte, la porción de agua infiltrada que logra llegar al interior del relleno y percolar, es la que participa en la formación de los lixiviados.

La expresión analítica de este balance se obtiene por aplicación de la ecuación de continuidad en la unidad elemental de volumen, que puede ser el vertedero en su

totalidad, las celdas de trabajo en el mismo, o las celdas resultantes de una idealización del relleno. En cualquier caso, el balance superficial puede expresarse según la ecuación 2.1, que permite conocer la variación de la humedad almacenada (ΔS) en el volumen de control, y es la que condiciona el flujo del lixiviado entre una celda y otra, a través del tiempo.

$$\Delta S(t) = P(t) - [ET(t) + R(t) + Pr(t)] \quad (2.1)$$

Donde, P: precipitación sobre el área superficial del volumen considerado en mm; R: volumen escurrido superficialmente en mm; ET: volumen de agua evapotranspirada en mm; Pr: “flujos” o volumen de agua transportado hacia elementos adyacentes en mm (de acuerdo con la Figura 4 corresponde al percolado interceptado).

La obtención de los valores de las variables en la ecuación 0 depende directamente de la información meteorológica disponible. En todo caso, siempre se partirá de las series de tiempo de precipitación ($P(t)$) y de otros registros, a partir de los cuales puedan estimarse, con mayor o menor aproximación, las variables restantes; para ello, los diferentes modelos basados en el balance hidrológico emplean distintas herramientas matemáticas, para estimar la evapotranspiración y la escorrentía (Lobo, 2003).

▪ Flujo en el interior del relleno sanitario

Parte del agua que se infiltra en el interior del vertedero, antes de formar parte del lixiviado debe pasar por diferentes estratos del mismo, los cuales condicionan el flujo de agua de acuerdo a sus características hidráulicas, por ejemplo, de acuerdo con Vélez (2004), el agua en un medio poroso se mueve a velocidades variables según el tamaño y orientación de los poros, en este sentido las condiciones de permeabilidad (forma, dimensiones e intercomunicación de los poros y granos) de las diferentes capas del relleno, influyen en el tiempo y recorrido que toma el agua hasta ser recogida como lixiviado.

Las variaciones de algunas características propias del fluido (peso específico y viscosidad) dependientes de la temperatura, también condicionan el flujo a través del relleno. Por ejemplo: la viscosidad del fluido (lixiviado o agua infiltrada) varía con la temperatura, en este caso, si se presentan aumentos de calor en el interior del relleno, la viscosidad disminuiría, facilitando el movimiento del fluido con relación a la permeabilidad de las capas del relleno. En Vélez (2004), se expone que la permeabilidad aumenta aproximadamente un 3% por cada grado centígrado, cuando la temperatura varía entre 10° C y 40° C; sin embargo, a pesar de no contar con datos sobre incrementos de la

permeabilidad para otros rangos de temperatura, hay que reconocer que en el interior de un relleno se pueden registrar temperaturas superiores a los 65° C, debido a las reacciones exotérmicas que se generan en su interior (esto, bajo ciertas condiciones climáticas, edad del vertedero y su cobertura). Otro factor de menor importancia, es el contenido en sales disueltas u otros compuestos químicos en el fluido, los cuales afectan su peso específico y viscosidad.

Las condiciones de almacenamiento y retención de humedad por parte de las capas del relleno, también son determinantes en el flujo de agua a través del interior del mismo. El agua retenida entre los poros no fluirá hasta haber alcanzado una determinada saturación, por debajo de la cual el terreno es capaz de retenerla frente a la acción de la gravedad. Este umbral de humedad, característico de cada tipo de terreno, se denomina “capacidad de campo”, el cual también se aplica a los residuos contenidos en el interior del relleno (Lobo, 2003).

La capacidad de campo depende de la textura y estructura del material. En una primera aproximación, puede relacionarse con la granulometría del mismo. Así, un terreno arcilloso es capaz de retener, en el punto de capacidad de campo, un 40% de su peso en agua; uno limoso, el 20%, mientras que las arenas conservan aproximadamente un 10% (Cosandey y Robinson, 2000; citado en Lobo, 2003). La capacidad de almacenamiento de humedad de los residuos dependerá de su composición, edad, estado de degradación y sobrecarga a la que están sometidos. La capacidad de campo decrece al aumentar la densidad del residuo o la sobrecarga que actúa sobre el mismo (Campbell, 1983; Holmes, 1980; Huitric et al., 1980). Koda y Zakowicz (1998), estudiaron la variación de la capacidad de campo en varias zonas de un vertedero, según la edad de los residuos y su profundidad, llegando a establecer una influencia conjunta de la compactación (cambios en la estructura del residuo) y la degradación (con el tiempo parece reducirse también la capacidad de campo).

Se ha observado, mediante experimentación en laboratorio, que la humedad de capacidad de campo de los residuos sólidos urbanos puede alcanzar el 40% (vol/vol) (Bengtsson, 1994, citado en Lobo, 2003); sin embargo, en muchos vertederos los lixiviados aparecen antes de alcanzar este valor, con humedades globales del 25 – 30%. De acuerdo con Lobo (2003), esta liberación “prematura” de líquido desde los residuos puede deberse a varios fenómenos:

1. La propia heterogeneidad del vertedero que hace que, mientras en algunas zonas todavía la humedad no ha alcanzado la capacidad de campo, en otras, ésta ya ha sido rebasada.
2. La presencia de vacíos más o menos continuos (“macroporos”) cuya conductividad hidráulica es mucho mayor que la de la matriz que los rodea. El fenómeno es similar a la

tubificación en presas o muros, formación de canales o fisuras por donde el agua discurre en flujo preferencial frente al resto de la masa sólida porosa.

3. La existencia de movimiento del agua o flujo hacia las zonas inferiores, aún cuando no se ha alcanzado la capacidad de campo. En este sentido, se debe considerar que, a pesar de que la simplificación puede ser válida, el transporte de humedad no es un fenómeno discontinuo que comience tras el umbral de la capacidad de campo, sino que, de forma más o menos despreciable, tiene lugar, siempre que exista agua en el terreno.

Teniendo en cuenta las condiciones climáticas y la conformación del relleno, incluyendo las capas de residuos, la Figura 4 representa en un volumen de control, el movimiento del flujo de agua a través del vertedero.

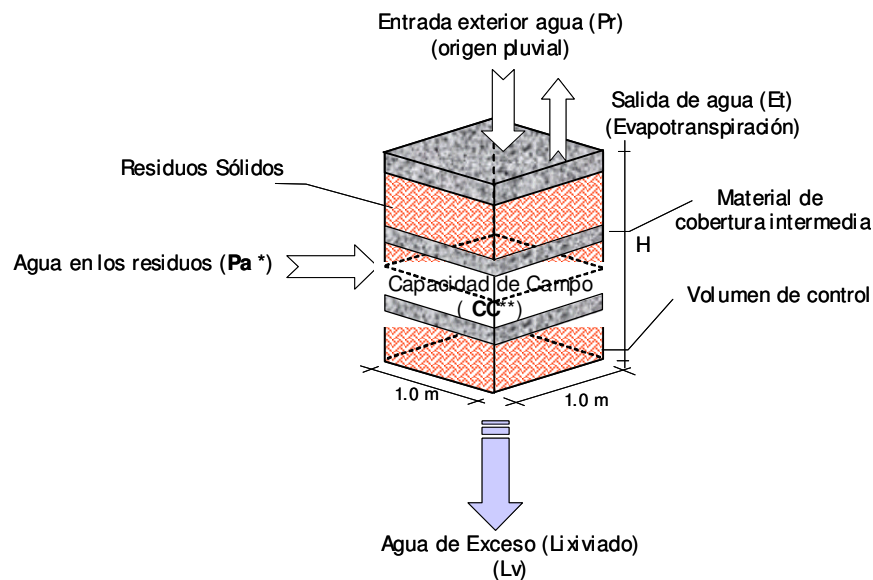


Figura 5. Flujo en el interior de un relleno sanitario

Fuente: Universidad Sergio Robledo, Postgrado de Recursos Naturales (2002) – Material de clase.

Con relación a la representación anterior, la ecuación de balance hídrico que tiene en cuenta las capacidades de campo y permite estimar la cantidad de agua en exceso, como lixiviado, es la siguiente:

$$Lv = (P - ET - R + Pa) - (CcMc + CcR) \quad (2.2)$$

Donde, Lv: lixiviados generados por exceso de agua en mm, P: precipitación en mm, ET: evapotranspiración en mm, R: escorrentía en mm, Pa: agua aportada por los residuos en mm, CcMc: agua necesaria por capacidad de campo del material de cobertura en mm y

CcR: agua necesaria por capacidad de campo de los residuos en mm. La sumatoria de P, ET y R determina la cantidad de agua que se infiltra, que sumada a la que agregan los residuos, forman el contenido de humedad en el volumen de control; si este contenido logra suplir y superar las necesidades de agua por capacidad de campo, entonces esta agua percola, formando así los lixiviados.

- **Modelo CREAMS (*Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems*) (USDA, 1980)**

El modelo CREAMS fue desarrollado en el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), por Knisel y Nicks (1980), para evaluar las fuentes de contaminación no puntual de las tierras agrícolas. El modelo se basa en el balance hídrico, y puede estimar la escorrentía, la erosión, el transporte de sedimentos, nutrientes vegetales y plaguicidas. La lógica general del modelo es que los procesos hidrológicos proporcionan el medio de transporte para sedimentos y productos químicos agrícolas. El CREAMS fue desarrollado para modelar los sistemas agrícolas, pero se ha utilizado en investigación para la gestión de los residuos, incluyendo estudios de erosión, investigación del balance hídrico y el diseño de coberturas para vertederos (por Nyhan, 1990) (Murphy y Garwell, 1998).

Nyhan (1990) estudió calibraciones del modelo para dos tipos de cobertura para un relleno, utilizando datos de campo para regiones áridas y semiáridas. Los resultados de la predicción del movimiento del agua en celdas experimentales fueron aceptables; sin embargo, el modelo presentó limitaciones para manejar eventos extremos. Devaurs y Spriner (1988) evaluaron varios diseños de coberturas en una región semiárida. El modelo logró predecir la humedad del suelo en los diferentes diseños controlados, pero falló cuando la vegetación era más activa (Murphy y Garwell, 1998).

Entre las limitaciones del modelo se incluye: la simulación del movimiento de la humedad como un flujo por gravedad, suponiendo una relación lineal para la conductividad hidráulica, y una simulación unidimensional vertical para el movimiento de la humedad. El CREAMS también ha sido probado para comprobar su exactitud en estudios de la escorrentía y la erosión, y se ha encontrado que el modelo puede predecir la escorrentía promedio, pero tiene una tendencia a subestimar la sedimentación para grandes tormentas (Binger et al., 1992 y Wu et al., 1993) citados en Murphy y Garwell (1998).

- **Model HSSWDS (*Hydrologic Simulation on Solid Waste Disposal Sites*) (EPA, 1980)**

Perrier y Gibson (1980) modificaron el modelo CREAMS y las curvas de escurrentía del USDA para desarrollar un modelo computarizado (HSSWDS) aplicado a la simulación hidrológica en sitios de disposición final de residuos sólidos. El modelo fue diseñado para simular las características del flujo hidrológico en vertederos de residuos sólidos comunes y peligrosos, utilizando un enfoque determinístico del balance hídrico, para predecir el flujo de humedad en el vertedero. El usuario debe proporcionar los parámetros, tales como la localización geográfica, área del sitio, características hidrológicas, y la cobertura final de suelo y la vegetación (Murphy y Garwell, 1998).

▪ **SOILINER (1986)**

Este modelo fue desarrollado por la *GCA Technology Division, Inc.*, para la *Office of Solid Waste* de la EPA. El programa predice la tasa de flujo de lixiviados a través de revestimientos de arcilla dada la conductividad hidráulica saturada de las capas, el gradiente hidráulico y la porosidad efectiva. El SOILINER es un método de aproximación de diferencias finitas unidimensional, que resuelve una ecuación de flujo no saturado en dirección vertical. Las características del modelo incluyen la posibilidad de simular múltiples sistemas, el contenido variable de humedad inicial y los cambios de las condiciones de frontera. La salida del modelo es el tiempo de viaje de un contaminante (TOT) a más de 100 pies de distancia horizontal (Murphy y Garwell, 1998).

Daniel et al., (1991), estudiaron solutos inorgánicos a través de columnas de capas de arcilla en el laboratorio, con el fin de validar el modelo, pero encontraron una sobrepredicción del tiempo de viaje (TOT), en algunos casos por un factor tan alto como 52. Ellos concluyeron que el error puede deberse a las suposiciones modeladas, como que las capas reales y las porosidades efectivas son iguales, mientras que en el hecho, la porosidad efectiva de una arcilla compactada puede variar con el gradiente hidráulico. Coates (1987) estudió los componentes hidrológicos de coberturas de multicapas experimentales para un vertedero, y encontró que las principales limitaciones del modelo son que no tiene en cuenta la dispersión y el tiempo de avance para la migración de contaminantes. Al-Jobeh (1994), en un estudio comparativo de varios modelos, también llegó a la conclusión de que el modelo no toma en consideración la fase gaseosa de flujo o presión, y el flujo sólo se considera en la dirección vertical (Murphy y Garwell, 1998).

▪ **FULLFILL (1991)**

El modelo FULLFILL es un programa computarizado unidimensional de diferencias – finitas, que utiliza la ecuación de Richards desarrollada por el *Center for Environmental Management at Tufts University*. La documentación del modelo se presenta en la investigación realizada por Arnold (1989). Noble y Arnold (1991) probaron la teoría del flujo no saturado a través de medios porosos en modelos de vertederos simulados a

escala de laboratorio, además de la infiltración vertical y los efectos de un aumento capilar; los resultados se compararon con los del modelo FULLFIL, y se comprobó que, para los vertederos a escala de laboratorio, el FULLFIL permitía predicciones razonables para el transporte de humedad con un aumento capilar (Murphy y Garwell, 1998).

- **FILL (*The Flow Investigation for Landfill Leachate*) (1992)**

El FILL es un modelo de dos dimensiones, para simular el flujo de humedad en estado transitorio. Esta herramienta es aplicable a la predicción de los caudales de lixiviados a través de los vertederos. El modelo utiliza una ecuación de onda cinemática para calcular la escorrentía, teniendo en cuenta la pendiente y la rugosidad de la superficie. El análisis de la infiltración se basa en los métodos de solución de Philip (1969). Varios documentos de Demtracopoulos y Korfiatis (Demtracopoulos et al., 1984; Korfiatis y Demtracopoulos, 1986; Demtracopoulos et al., 1986; Demtracopoulos, 1988) describen técnicas utilizadas para calcular la cabeza hidráulica del lixiviado en la zona saturada de un vertedero.

La ecuación principal del modelo FULLFIL se basa en el principio de conservación de masa de usos, y éste utiliza el movimiento de la cabeza hidráulica de lixiviados para calcular el caudal de estos líquidos (Murphy y Garwell, 1998).

- **Modelo HELP (*Hydrology Evaluation Leachate Performance*) (EPA, 1984, 1988, 1994)**

El HELP es un modelo versátil desarrollado para la EPA, por el *U.S. Army Corps of Engineers*, para la simulación de los procesos hidrológicos en rellenos sanitarios, la evaluación de los diseños para vertederos y la estimación de las tasas de recarga de las aguas subterráneas. Este modelo ha tenido tanta aceptación que se ha convertido en un requisito para la obtención de permisos para la operación de vertederos en los Estados Unidos (Schroeder, 1993).

De acuerdo con Bou-Zeid y El-Fadel (2004), este modelo considera el relleno sanitario como un sistema de capas y aporta facilidades para analizar diariamente el comportamiento de los contaminantes generados por los residuos sólidos. Además, realiza un análisis del balance de agua en el relleno, usando aproximaciones determinísticas en un sistema cuasi-bidimensional.

El modelo divide el relleno sanitario en capas, y aplica la técnica de balance de agua, para predecir la cantidad de lixiviados por generarse. Las velocidades de flujo se calculan para predecir el tiempo de aparición de los lixiviados. Los efectos de percolación son implícitamente tenidos en cuenta por la inclusión opcional de una capa de residuos con baja porosidad, baja capacidad de campo y bajo punto de marchitez. Las geomembranas

y barreras de arcillas también pueden ser simuladas, al igual que escorrentía a través de las capas del relleno.

El modelo simula procesos internos y externos que influyen en los volúmenes de lixiviados, incluyendo: infiltración, evapotranspiración, crecimiento vegetativo, retención de humedad del suelo, drenaje lateral subsuperficial, recirculación del lixiviado, infiltración del agua subterránea, drenaje vertical no saturado, y escorrentía a través del suelo. Este modelo no tiene en cuenta el agua producida durante la fase inicial de descomposición aeróbica de los residuos putrescibles, ya que esta fase es de corta duración y no se espera que la generación de lixiviados por este proceso sea significativa (Schroeder et al., 1994).

Modelo conceptual del programa HELP: este modelo esencialmente se basa en un modelo de balance hídrico, y su procedimiento se esquematiza a continuación.

En el HELP los procesos que se generan en todo el vertedero están ligados entre sí en un orden secuencial, iniciando con un balance hídrico en la superficie del relleno, en donde se simulan la evapotranspiración

del suelo, los drenajes superficiales y las rutas del agua. La simulación continúa con la infiltración y el procedimiento mediante el cual el agua pasa a través de las capas del vertedero, hasta ser recogida como lixiviado. De esta forma, la modelación se aplica repetitivamente para cada día del período de simulación establecido por el usuario.

El modelo HELP usa diversas descripciones de procesos que fueron previamente desarrollados, reportados en la literatura y usados en otros modelos hidrológicos. Este modelo posee una herramienta opcional para la generación sintética de datos de clima (*Weather Generator*), basada en el modelo WGEN (*Model for Generating Daily Weather Variables*) del *U.S. Department of Agricultura* (USDA) perteneciente al *Agricultural Research Service* (ARS) (Schroeder et al., 1994). El WGEN proporciona valores generados diariamente para precipitación, temperatura máxima y radiación solar para periodos de “n” años, en un lugar determinado, utilizando el modelo de la cadena de Markov de primer orden (Richardson y Wrigth, 1984).

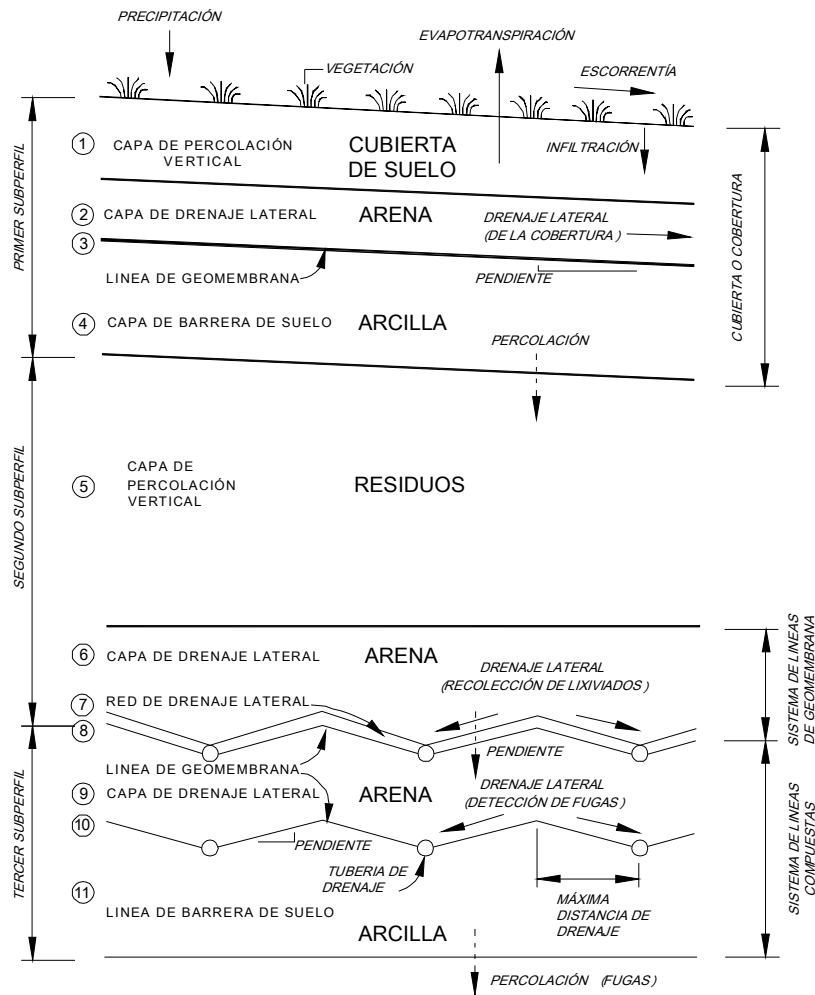


Figura 6. Esquema conceptual del modelo HELP

Para modelar la escorrentía, el modelo HELP se basa en el método del Número de Curva del *Soil Conservation Service* (SCS). La evapotranspiración potencial se modela con el método de Penman (1963). La evaporación de los suelos y la transpiración de las plantas se determina por la forma desarrollada por Ritchie (1972) y que ha sido utilizado en varios modelos del ARS y sistemas de gestión de agricultura. De igual forma, el modelo de crecimiento vegetativo, perteneciente al *Simulator for Water Resources in Rural Basins* (SWRRB) (desarrollado por Arnold et al., (1989)), fue incorporado al HELP para calcular diariamente índices de área foliar. La interceptación de la evaporación, la nieve y el agua superficial se modela como un balance de energía, mediante el método propuesto por Horton (1919). La modelación del derretimiento de la nieve se basa en la rutina SNOW – 17 del modelo *Snow Accumulation and Ablation* (por Anderson (1973)).

De otra parte, el drenaje vertical sigue el modelo de Darcy's (1856), usando la ecuación de Campbell (1974) para la conductividad hidráulica no saturada. El drenaje lateral

saturado se modela por una aproximación analítica para la solución en estado estable de la ecuación de Boussinesq, empleando las hipótesis de Dupuit-Forchheimer (Forchheimer, 1930). Las fugas a través de las geomembranas se modelan por medio de una serie de ecuaciones basadas en las compilaciones de Giroud et al. (1989,1992), citado en Schroeder et al. (1994).

Del modelo se han desarrollado varias versiones, las cuales han tenido como propósito el mejoramiento del HELP. La primera versión corresponde al modelo HELP 1.0 (Schroeder et al., 1984a y 1984b), el cual fue una versión mejorada del HSSWDS. Este simulaba solamente el sistema de cobertura, no modelaba el flujo lateral a través de las capas de drenaje, y al drenaje vertical sólo se le daba un manejo rudimentario. La versión 2.0, desarrollada en el año 1988 por Schroeder et al., representó un mayor avance en las capacidades del modelo al incorporar la herramienta WGEN (*Weather Generator*) y el modelo SWRRB (*Simulator for Water Resources in Rural Basins*). En una versión 3.0, el modelo mejoró notoriamente con relación a la versión anterior; por ejemplo, el número de capas que podían ser simuladas aumentó, al igual que la lista de tipos de suelo y coberturas para el relleno.

Información requerida por el modelo HELP: para la simulación hidrológica, este modelo requiere datos climatológicos diarios, las características del suelo y las especificaciones de diseño del relleno. Los datos de precipitación pueden ser suministrados por el usuario, o generados estocásticamente, a partir de un registro histórico perteneciente a la base de datos del programa.

El modelo contiene los parámetros para la generación de precipitaciones sintéticas para 139 ciudades de EE.UU. La base histórica de datos contiene cinco años de registros de precipitación diaria para 102 ciudades de EE.UU. La temperatura y radiación solar diaria son datos que también pueden generarse estocásticamente ó introducirse por el usuario.

En general, la información requerida es la siguiente:

- El estado del clima: datos de precipitación, radiación solar, temperatura y evapotranspiración.
- Suelo: porosidad, capacidad de campo, punto de marchitez, conductividad hidráulica, humedad inicial y número de curva del SCS. El modelo, por defecto, contiene características del suelo para 42 tipos de materiales, para ser usadas cuando las mediciones o estimaciones para sitios específicos no sean posibles.
- Diseño del vertedero: capas, pendiente de la superficie, sistemas de recolección de lixiviados y escorrentías. Con estos datos, el modelo puede construir la estructura del perfil del relleno sanitario, el cual puede ser de varias capas, que consisten en una

combinación de materiales naturales (suelo) y artificiales (residuos, geomembranas). Este modelo tiene la opción de instalar un drenaje horizontal y cambiar la pendiente de partes del perfil (por ejemplo, la cobertura del vertedero, sistemas de recogida y remoción/extracción de lixiviados).

Dentro del diseño del relleno, las elevaciones del relleno se pueden fijar y los espesores de las capas se pueden variar. El modelo permite disponer de varios tipos de capas, las cuales pueden organizarse por el usuario, de acuerdo a las funciones hidráulicas que éstas poseen. Los tipos de capa son: capas de percolación vertical, capas de drenaje lateral, revestimiento en barrera de suelo, revestimientos en geomembrana y capas de geotextiles y georedes. Las capas en tierra vegetal y residuos se representan dentro del perfil como capas de percolación vertical.

El modelo permite asignar las propiedades de las capas definidas dentro del perfil. Estas propiedades corresponden a: porosidad total, capacidad de campo, punto de marchitez, conductividad hidráulica, afluentes subsuperficiales y contenido inicial de humedad. Con relación a los revestimientos en geomembrana, el modelo permite establecer características para este tipo de materiales, con relación a la calidad del producto e instalación dentro del relleno.

Generación sintética de datos climáticos: El modelo HELP requiere tres tipos diferentes de datos meteorológicos que se deben suministrar como valores diarios: la precipitación (lluvia o nieve), radiación solar y la temperatura media del aire. Este modelo necesita de un conjunto de parámetros para simular la evapotranspiración, los cuales son constantes durante la duración de la simulación.

Con estos datos, el modelo puede: calcular el volumen de agua que fluye por el vertedero, simular la escorrentía superficial, la evaporación, el crecimiento vegetativo y la transpiración, y simular la infiltración durante los períodos cálidos, y la superficie de almacenamiento, el derretimiento de la nieve, la escorrentía e infiltración durante los períodos de frío.

De otra parte, el programa incorpora una rutina para generar valores diarios de precipitación, la temperatura media, y la radiación solar. Esta rutina fue desarrollada por el USDA *Agricultural Research Service* (Richardson y Wright, 1984) basándose en un procedimiento descrito por Richardson (1981). En el HELP el usuario tiene la opción de generar datos de precipitación diaria de forma sintética, en lugar de utilizar los datos históricos por defecto o por especificaciones del usuario.

Del mismo modo, el usuario del HELP tiene la opción de generar series sintéticas de temperatura media diaria, radiación solar, en lugar de utilizar datos históricos. La rutina de generación está diseñada para preservar la dependencia en el tiempo, la correlación

entre las variables y las características estacionales en el estado del clima de la localización del relleno.

Precipitación: en el HELP, la precipitación diaria se genera usando un modelo de distribución gamma, de dos parámetros, de la cadena de Markov. Un modelo de la cadena de Markov de primer orden se emplea para generar la ocurrencia de días secos o húmedos. En este modelo, la probabilidad de lluvia en un día está condicionada sobre el estado del clima del día anterior. Un día húmedo se define como un día con 0.01 pulgadas de lluvia o más. El modelo requiere dos probabilidades de transición: $P_i(W/W)$, la probabilidad de un día húmedo sobre un día i , dado un día húmedo, sobre un día $i - 1$; y $P_i(W/D)$, la probabilidad de un día húmedo sobre un día i , dado un día seco, sobre un día $i - 1$ (Schroeder et al., 1994).

Cuando ocurre un día húmedo, la función de distribución gamma, que describe la distribución de las cantidades de precipitación diaria, se utiliza para generar la cantidad de precipitación. La función de densidad para la distribución gamma de dos parámetros, viene dada por:

$$f(p) = \frac{p^{\alpha-1} e^{-p/\beta}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \quad (2.3)$$

Donde:

$f(p)$: función de densidad (adimensional)

p : la probabilidad (adimensional)

α y β : parámetros de distribución (adimensional)

Γ : la función gamma de α (adimensional)

e : la base del logaritmo natural (adimensional)

Los valores de $P(W/W)$, $P(W/D)$, α y β varían continuamente durante el año, para la mayoría de lugares. La rutina generadora de la precipitación usa valores mensuales, de los cuatro parámetros. El programa HELP contiene estos valores mensuales, para 139 localidades en los Estados Unidos, los cuales fueron calculados por el *Agricultural Research Service* (ARS), a partir de 20 años (1951 – 1970) de datos de precipitación diaria para cada localidad (Schroeder et al., 1994).

Los valores diarios de temperatura máxima, temperatura mínima y radiación solar se generan usando la ecuación:

$$t_i(j) = m_i(j)[X_i(j).c_i(j) + 1] \quad (2.4)$$

Donde:

$t_i(j)$: valor diario de la temperatura máxima (j=1), temperatura mínima (j=2), o radiación solar (j=3) (adimensional)

$m_i(j)$: valor medio en un día i (adimensional)

$c_i(j)$: coeficiente de variación en un día i (adimensional)

$X_i(j)$: elemento residual generado estocásticamente para un día i (adimensional)

El cambio estacional en las medias y coeficientes de variación se describe por la ecuación armónica:

$$u_i = \bar{u} + C \cos\left[\frac{2\pi}{365}(i - T)\right] \quad (2.5)$$

Donde.

u_i : valor de $m_i(j)$ o $c_i(j)$ en un día i (adimensional)

\bar{u} : valor medio de u_i (adimensional)

C : amplitud de la armónica (adimensional)

T : posición de la armónica en días (adimensional)

El *Agricultural Research Service* (ARS) calculó valores de estos parámetros para las tres variables en días húmedos y secos, a partir de 20 años de datos meteorológicos, en 31 localidades. El modelo contiene valores de estos parámetros para 184 ciudades. Estos fueron tomados de mapas preparados por Richardson y Wright (1984).

Los elementos residuales de la ecuación 2.4 se generan usando un procedimiento que preserve correlaciones seriales importantes y correlaciones – cruzadas. La ecuación generadora es:

$$X_i(j) = (A \cdot X_{i-1}(j)) + (B \cdot \epsilon_i(j)) \quad (2.6)$$

Donde:

$X_i(j)$: matriz de 3 x 1 para un día i , cuyos elementos son residuales de temperatura máxima ($j=1$), temperatura mínima ($j=2$), y la radiación solar ($j=3$).

$\epsilon_i(j)$: matriz de 3 x 1 de componentes aleatorios independientes para el índice j

A y B : matrices de 3 x 3, cuyos elementos están definidos de tal manera que las nuevas secuencias tienen la correlación serial deseada y coeficientes de correlaciones cruzadas.

Parámetros de retención de humedad: el almacenamiento o retención de humedad relativa usado en el modelo HELP, difiere de las expresiones de contenido de agua típicamente usados en la ingeniería. El almacenamiento de agua usado en el HELP es dado sobre un volumen base (θ), es decir, volumen del agua (V_w) por volumen total de suelo (masa de suelo, agua y aire) ($V_t = V_s + V_w + V_a$), esta expresión es común en las prácticas de agronomía y física de suelos. En ingeniería, la expresión más utilizada para conocer el contenido de humedad es dado mediante una expresión en masa (w), es decir, masa de agua (M_w) por masa de suelo (M_s). Las dos pueden estar relacionadas entre sí para conocer la densidad de masa seca (ρ_{db}) y densidad del agua (ρ_w), la gravedad específica de masa seca del suelo (g_{db}) (proporción de densidad de masa seca por densidad de agua).

Conductividad hidráulica y retención de humedad: los valores de estos parámetros pueden especificarse por el usuario o seleccionados de una lista de valores que proporciona por defecto el modelo HELP. Estos valores se utilizan para calcular el almacenamiento de humedad, el drenaje vertical no saturado, la cabeza en las capas y la evaporación del agua en el suelo. Para calcular los drenajes verticales y laterales, y la percolación de las capas de suelo en el vertedero, el programa HELP utiliza la conductividad hidráulica saturada y no saturada del suelo, y la de las capas de residuos.

La conductividad hidráulica saturada se utiliza para describir el flujo a través de medios porosos, donde los espacios vacíos se llenan con un fluido (por ejemplo, agua). El valor para cada capa es especificada por el usuario, como dato de entrada. La conductividad hidráulica no saturada se utiliza para describir el flujo a través de una capa cuando los espacios vacíos se llenan con fluidos líquidos y no – líquidos (por ejemplo, el agua y el aire). El programa calcula la conductividad hidráulica no saturada de cada capa de suelo y de residuos, mediante la siguiente ecuación, reportada por Campbell (1974), citado en Schroeder et al., (1994).

$$K_u = K_s \left[\frac{\theta - \theta_r}{\phi - \theta_r} \right]^{3 + \left(\frac{2}{\lambda} \right)} \quad (2.7)$$

Donde:

K_u : conductividad hidráulica no saturada (cm/s)

K_s : conductividad hidráulica saturada (cm/s)

θ : contenido volumétrico de agua existente (vol/vol)

θ_r : contenido volumétrico de agua residual (vol/vol)

ϕ : porosidad total (vol/vol)

λ : índice de distribución del tamaño de los poros (adimensional)

El contenido volumétrico de agua residual es la cantidad de agua remanente en una capa bajo succión capilar infinita.

Con relación a la conductividad hidráulica saturada para materiales con vegetación, el programa HELP ajusta las conductividades hidráulicas saturadas de capas de suelo y residuos en la mitad superior de la zona de evaporación, siempre y cuando las características del suelo hayan sido seleccionadas por defecto de la lista de texturas de suelo que proporciona el modelo. Si el usuario establece las características, el modelo no puede realizar estos ajustes. El HELP calcula la conductividad hidráulica saturada de la siguiente forma (Schroeder et al., 1994):

$$(K_s)_v = \begin{pmatrix} 1.0 + 0.5966LAI + 0.132659LAI^2 + 0.1123454LAI^3 \\ -0.04777627LAI^4 + 0.004325035LAI^5 \end{pmatrix} (K_s)_{uv} \quad (2.8)$$

Donde:

$(K_s)_v$: conductividad hidráulica saturada de materiales, con vegetación en la mitad superior de la zona de evaporación (cm/s)

LAI : índice de área foliar (adimensional)

$(K_s)_{uv}$: conductividad hidráulica saturada de materiales, sin vegetación en la mitad superior de la zona de evaporación (cm/s).

Índice de área foliar y profundidad de la zona de evaporación: el HELP posee una serie de valores para el índice de área foliar y la profundidad de evaporación, que son aplicados por defecto por este modelo de acuerdo a la localización geográfica del relleno. La profundidad de la zona de evaporación se basa en los datos de precipitación, temperatura y humedad de cada región climática. Las estimaciones para profundidad mínima, en términos generales, se basan en valores de la literatura (reportados por Saxton et al., 1971) y en los resultados obtenidos por Thompson y Talyer (1984), citado en Fleenor (1993) quienes aplicaron un modelo de flujo no saturado, para suelos limosos desnudos; mientras que las profundidades máximas fueron estimadas para suelos limosos con una buena cobertura de grama. Las zonas y los valores para el índice de área foliar se basan en las recomendaciones presentes en la documentación del modelo *Simulator for Water Resources in Rural Basins* (SWRRB) (desarrollado por Arnold et al., 1989), teniendo en cuenta la precipitación y temperatura (Schroeder et al., 1994).

Métodos de solución: el modelo HELP simula diariamente el movimiento del agua en el vertedero, de dos formas: superficial y subsuperficial. Los procesos hidrológicos modelados en la parte superior del vertedero corresponden al derretimiento de la nieve, la interceptación de la lluvia por la vegetación, la escorrentía superficial y la evaporación del agua. A través del vertedero se generan otros procesos que también se simulan con el programa, como: evaporación del agua del suelo, la transpiración de las plantas, el drenaje vertical no saturado, las fugas a través de las geomembranas, la percolación de las barreras de suelos y el drenaje lateral saturado; el crecimiento vegetativo y la congelación del suelo, también están incluidos en el programa.

Escorrentía: el fenómeno lluvia – escorrentía en el programa HELP se modela usando el método del número de curva del SCS (*Soil Conservation Service*), el cual fue incorporado al modelo por las múltiples ventajas que éste presenta (amplia aceptación, requiere datos de entrada que generalmente están disponibles, maneja una variedad de tipos y usos de suelo, etc.) (Schroeder et al., 1994). El caudal de escorrentía superficial producido por determinada altura de lluvia se calcula en función de un parámetro “de retención”, que representa la capacidad del terreno de recibir agua, sin producir escorrentía. Esta capacidad se establece en relación al contenido previo de humedad del suelo, las características hidrológicas del mismo (capacidad de campo, punto de marchitez y humedad de saturación) y a través del parámetro de “número de curva” (CN); las cualidades del vertedero, como cuenca hidrológica (vegetación, longitud de drenaje, pendiente y tipo de suelo), también intervienen en el cálculo de la escorrentía. Las expresiones y parámetros empleados han sido obtenidos a partir de numerosas experiencias, en Estados Unidos, relacionando valores de lluvia diaria con volúmenes de escorrentía producido en cuencas con distinto tiempo de concentración y distintas condiciones iniciales. La escorrentía estimada por el modelo, al final es el resultado de multiplicar la resultante de este método por un “porcentaje de escorrentía”, que representa

la parte de superficie en la que, por sus pendientes, el agua de lluvia puede escurrir. Todo el resto será agua infiltrada (Lobo, 2003).

El programa HELP calcula la escorrentía Q_i , en un día i , basándose en la precipitación P_i de ese día, a partir de la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad (2.9)$$

Donde:

Q : escorrentía actual (mm)

S : factor de retención o almacenamiento (adimensional)

P : precipitación neta (mm)

El parámetro de retención, S , se transforma dentro del número de curva de escorrentía, CN , cuya relación esta dada como:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (2.10)$$

El modelo permite la configuración del contenido inicial de humedad, ya sea especificada por el usuario o calculada por el modelo. El área de escorrentía y la clase de vegetación para simular la cantidad de agua superficial, también se pueden editar mediante el modelo.

En el modelo, la precipitación neta es igual a cero cuando la temperatura media es menor o igual a 32 °F; es igual a la precipitación cuando la temperatura media está por encima de 32 °F y la capa de nieve no está presente, o es igual al flujo de salida de la cubierta de nieve, cuando una capa de nieve está presente y la temperatura media está por encima de 32 °F (Schroeder et al., 1994):

$$P_i = \begin{cases} 0.0 \rightarrow T_i \leq 32^\circ F \\ R_i \rightarrow T_i > 32^\circ F, SNO_{i-1} = 0.0 \\ O_i - EMELT_i \rightarrow T_i > 32^\circ F, SNO_{i-1} > 0.0 \end{cases} \quad (2.11)$$

Donde:

P_i : precipitación neta y deshielo disponible para la escorrentía en un día i , (pulg.)

T_i : temperatura media

R_i : precipitación en un día i , (pulg.)

SNO_{i-1} : equivalencia de agua de la cobertura de nieve al final del día $i-1$, (pulg.)

O_i : flujo de salida de la cobertura de nieve sujeta a la escorrentía en un día i , (pulg.)

$EMELT_i$: evaporación del deshielo en el día i , (pulg.)

Evapotranspiración Potencial: El método utilizado en el programa HELP para calcular la evapotranspiración se basa en el enfoque dado por Ritchie (1972). Este método utiliza el concepto de la evapotranspiración potencial, como base para la predicción de la evaporación del agua superficial, del suelo y la producida por la transpiración de las plantas. El término "evapotranspiración potencial" se refiere a la cantidad máxima de tasa de evaporación, que la atmósfera puede extraer del terreno, en un día (Schroeder et al., 1994). Con relación a la energía disponible para la evapotranspiración, el modelo utiliza una modificación de la ecuación de Penman (1963).

$$LE_i = PENR_i + PENA_i \quad (2.12)$$

Donde:

LE_i : energía disponible en un día i , para la evapotranspiración potencial en ausencia de una cubierta de nieve, (langleys)

$PENR_i$: componente de radiación de la ecuación de Penman, en el día i , (langleys)

$PENA_i$: componente aerodinámico de la ecuación de Penman, en el día i , (langleys)

El primer término de la Ecuación 2.13 representa la porción de la energía evaporativa disponible, debido al cambio de radiación entre el sol y la tierra. El segundo término expresa la influencia de la humedad y el viento sobre LE. Estos dos componentes son evaluados como sigue (Schroeder et al., 1994):

$$PENR_i = \frac{\Delta_i}{(\Delta_i + \gamma)} R_{n_i} \quad (2.13)$$

$$PENA_i = \frac{15.36\gamma}{(\Delta_i + \gamma)} (1 + 0.148u)(e_{o_i} + e_{a_i})$$

Donde:

Δ_i : pendiente de la curva de presión de saturación de vapor a temperatura media del aire i en el día i , (milibares por °C)

γ : constante de la ecuación del psicrométrica, que se supone constante a 0,68 milibares por °C

R_{n_i} : radiación neta recibida por la superficie, en un día i , (langleys)

u : velocidad del viento a una altura de 2 metros, (km/h) (velocidad del viento media anual utilizada en el modelo).

e_{o_i} : presión de saturación de vapor a temperatura media del aire en un día i (milibares). (Calculada mediante la ecuación 2.14, donde RH es la humedad relativa, y es igual a 1; y T_{c_i} es igual a la temperatura media del aire, en un día i).

$$e_{a_i} = 33.8639RH \left[(0.00738T_{c_i} + 0.8072)^8 (0.000019) |1.8T_{c_i} + 48| + 0.001316 \right] \quad (2.14)$$

Donde:

e_{a_i} : presión media de vapor de la atmósfera, en un día i (milibares), donde RH es la humedad relativa promedio trimestral adimensional, en un día i , de los datos de entrada o de los días con precipitación, RH = 1).

El valor de Δ_i se calcula en el modelo usando la ecuación presentada por Jensen (1973):

$$\Delta_i = 1.9993 \left[(0.00738T_{c_i} + 0.8072)^8 - 0.0005793 \right] \quad (2.15)$$

Donde T_{c_i} es la temperatura media de un día i , (°C).

La radiación solar neta (R_{ni}) recibida por la superficie terrestre, es la diferencia entre la radiación total entrante y la saliente, y es calculada en el modelo mediante el método de Hillel (1982) y Jensen (1973), citado en Schroeder et al. (1994).

La evapotranspiración potencial se determina dividiendo la energía disponible, LE_i , por el calor latente de vaporización, L_v (o el calor latente de fusión, L_f , dependiendo del estado del agua evaporada). El calor latente de vaporización es una función de la temperatura del agua. En el modelo HELP, a menos que el agua evaporada sea la nieve o la del deshielo, se utiliza la temperatura media diaria para estimar la temperatura del agua (Schroeder et al., 1994). La evapotranspiración potencial se calcula como:

$$E_{o_i} = \frac{LE_i}{25.4L_v} \quad (2.16)$$

$$L_v = \begin{cases} 59.7 - 0.0564T_{c_i} \rightarrow \text{agua} \\ 67.67 - 0.0564T_s \rightarrow \text{nieve} \end{cases} \quad (2.17)$$

Donde:

E_{o_i} : evapotranspiración potencial de un día i , (pulg.)

L_v : calor latente de vaporización (para evaporación del agua), o calor latente de fusión (para la evaporación de la nieve), (langleys por milímetros)

T_s : temperatura de la nieve, (°C)

25.4: factor de conversión de milímetros a pulgadas

La evaporación del agua del suelo en el modelo se estima mediante las ecuaciones desarrolladas en los trabajos de Penman (1963). Los fundamentos matemáticos para la simulación de los procesos de transpiración de las plantas, evapotranspiración y crecimiento de las plantas, se explican en Schroeder et al. (1994).

El modelo trabaja con un coeficiente de evaporación, el cual indica la facilidad con que el agua puede ser extraída del suelo o de las capas de residuos. Utilizando datos de laboratorio para el suelo, Ritchie (1972) indicó que el coeficiente de evaporación (en mm/día 0.5) puede estar relacionado con la conductividad hidráulica no saturada, a 0.1 bar de presión capilar. El programa HELP utiliza la siguiente forma de la ecuación de Ritchie para calcular el coeficiente de evaporación (Schroeder et al., 1994):

$$CON = \begin{cases} 0.33 & (K_u)_{0.1bar} \leq 0.05 \text{ cm / día} \\ 2.24 + 17.19(K_u)_{0.1bar} & 0.05 \text{ cm / día} < (K_u)_{0.1bar} < 0.178 \text{ cm / día} \\ 5.50 & (K_u)_{0.1bar} \geq 0.178 \text{ cm / día} \end{cases} \quad (2.18)$$

Donde:

CON : coeficiente de evaporación (mm/día)

$(K_u)_{0.1bar}$: conductividad hidráulica insaturada a 0.1 bar de presión capilar (cm/s)

El programa HELP impone un límite superior e inferior para el coeficiente de evaporación. Si el valor calculado del coeficiente de evaporación es inferior a 3.30, se fija este valor, si el coeficiente de evaporación es mayor que 5.50, se igualará a 5.50. El usuario no tiene acceso para realizar ningún tipo de modificación en este coeficiente.

Infiltración: en ausencia de una cubierta de nieve (SNO_i), la infiltración es igual a la suma de la lluvia (precipitación a temperaturas $> 0^\circ\text{C}$) y derretimiento de la nieve, menos la suma de la evaporación de humedad superficial y la escorrentía (Schroeder et al., 1994).

$$INF_i = PRE + GM_i - (E_i + Q_i) \quad (2.19)$$

Donde INF_i es la infiltración en un día i , PRE es la precipitación diaria, GM corresponde al derretimiento del suelo (nieve); E es la evaporación en la superficie y Q es la escorrentía.

Drenajes: con relación al drenaje vertical, en el programa HELP, la tasa a que el agua se mueve a través de un medio poroso como un flujo saturado, es regida por las fuerzas de gravedad, es decir está dada por la ley de Darcy. El modelo esencialmente se basa en estas ecuaciones matemáticas para simular el drenaje vertical. Esta ecuación se aplica también a condiciones insaturadas, siempre que la conductividad hidráulica sea considerada una función de la humedad del suelo y que el nivel piezométrico incluya succión del mismo (Schroeder et al., 1994).

En relación a la percolación a través de las capas del vertedero, ésta depende directamente del espesor de la saturación del material. La profundidad de esta zona saturada se denomina la cabeza hidráulica (presión) en la capa de suelo. La cabeza hidráulica en la capa es una función de los espesores de todas las capas saturadas que están directamente encima de la capa y del contenido de humedad de la capa no saturada (Schroeder et al., 1994).

Los drenajes o fugas a través de las geomembranas en el programa HELP Versión 3, se estiman teniendo en cuenta que este tipo de materiales se suponen dentro del perfil del relleno, como capas individuales o en conjunto, pero con una permeabilidad muy baja. El programa permite que dentro del perfil, las geomembranas se localicen por encima, entre y por debajo de capas de suelo con alta, mediana y baja permeabilidad. En el HELP las fugas para este tipo de material se calculan para secciones intactas, o para los casos en que se tengan perforaciones y/o defectos de instalación en algunas zonas de la geomembrana.

Schroeder et al. (1994) retoma los trabajos de Giroud y Bonaparte (1989) para el cálculo de fugas a través de capas compuestas (capas conformadas por diferentes materiales). Los métodos matemáticos para el cálculo de estas fugas también hacen parte de un resumen de los trabajos de Brown et al. (1987). En estos métodos Giroud y Bonaparte (1989) suponen que la cabeza hidráulica que actúa en las capas del relleno y la profundidad del líquido en las mismas son equivalentes, siempre que los efectos de la cabeza de velocidad sean relativamente pequeños para las capas del relleno.

De otra parte, el drenaje lateral en un medio poroso es modelado en el HELP utilizando la ecuación de Boussinesq (la Ley de Darcy junto con la ecuación de continuidad) empleando las hipótesis de Dupuit-Forcheimer.

Suposiciones del modelo HELP: los procedimientos en que se basa el modelo para las estimaciones de las variables climáticas y los procesos en el vertedero, necesariamente están basados en muchas simplificaciones y suposiciones aplicadas a ecuaciones matemáticas. Estas suposiciones son consistentes desde el punto de vista de la aplicación del modelo (simulaciones para rellenos sanitarios). Entre lo que supone el modelo para realizar las diferentes simulaciones, se tiene:

Las precipitaciones en los días en que la temperatura media del aire es inferior a la de congelación, se supone que se producen en forma de nieve. El derretimiento se supone que es una función de energía, a partir de la temperatura del aire, la radiación solar y la precipitación. Los efectos de la radiación solar están incluidos en un factor empírico. Además, el deshielo se supone que ocurre a una tasa constante de 0.5 mm/día, siempre y cuando el terreno no esté congelado (Schroeder et al., 1994).

Para la escorrentía, el modelo utiliza el método del SCS basándose en las cantidades diarias de lluvia y derretimiento de la nieve. El HELP supone que las áreas adyacentes al relleno no drenan hacia este. El tiempo de distribución de la intensidad de lluvia no se considera. No se pueden tener expectativas con relación al modelo y estimaciones precisas de volúmenes de escorrentía, para eventos individuales de tormenta, en base a los datos diarios de precipitación; sin embargo, las estimaciones de escorrentía, a largo plazo, a partir del método SCS, pueden ser más razonables (Schroeder et al., 1994). El método SCS no considera explícitamente la longitud y pendiente de la superficie sobre la cual ocurre el flujo; sin embargo, el modelo incorpora una rutina basada en un modelo de onda cinemática, para tener en cuenta la pendiente y longitud de la superficie.

Para la evapotranspiración potencial, el modelo utiliza la humedad relativa media trimestral y la velocidad media anual del viento. Igualmente, supone que la humedad relativa es del 100% para los días en que se produce precipitación. El programa utiliza un albedo de 0.23 para el suelo y la vegetación, y de 0.60 para la nieve. Los datos de radiación solar y la temperatura se generan, a menudo, sintéticamente. Para el caso de

los datos de vegetación, éstos se generan por un modelo de crecimiento vegetativo que el HELP ha incorporado para sus simulaciones (Schroeder et al., 1994).

Simulación del modelo: el tiempo de simulación está limitado por la cantidad de datos meteorológicos disponibles, es decir, el modelo correrá para una longitud de tiempo igual a la de los datos meteorológicos. El programa toma los archivos de entrada y corre el modelo, presentando los resultados para diferentes categorías: balances diarios, mensuales, total anual, balance acumulado y almacenamiento final de agua en capas. Además, permite mostrar los volúmenes totales de agua que se derivan o drenan durante un período de tiempo, examinar el volumen total de los lixiviados a percolar a través de la parte inferior del vertedero, durante un período de tiempo, y evaluar el volumen total de otros componentes del balance hídrico.

Limitaciones de aplicación: de acuerdo con Schroeder et al (1994), el modelo puede simular la ruta del agua o el almacenamiento en un máximo de veinte capas, incluyendo suelo, residuos, geosintéticos u otros materiales para un período de 1 a 100 años. Como mucho, pueden ser usadas, cinco sistemas de capa, ya sean barreras de suelo, geomembranas o capas compuestas. El modelo tiene limitaciones con relación a la forma en que se desea ordenar las capas. Éste no permite que una capa de drenaje vertical sea ubicada directamente debajo de una capa de drenaje lateral. No pueden ser ubicadas dos capas de barrera de suelo consecutivamente, al igual que las capas de geomembranas. La cobertura final de relleno no puede ser una capa de barrera de suelo o de geomembrana.

De otra parte, varias relaciones deben existir entre las propiedades de retención de humedad de un material. La porosidad, capacidad de campo y punto de marchitamiento, teóricamente, pueden variar desde 0 hasta 1, en unidades de volumen por unidad de volumen, pero la porosidad debe ser superior a la capacidad de campo, y ésta capacidad de campo debe ser mayor que el punto de marchitamiento. El contenido inicial de humedad del suelo no puede ser superior a la porosidad o inferior al punto de marchitamiento. Si el contenido inicial de humedad es dado por el programa, los contenidos de humedad se establecen cerca del estado de equilibrio; sin embargo, los contenidos de humedad de las capas por debajo de la parte superior del sistema de capa o del sistema de cubierta se especifican demasiado altos para lugares y zonas áridas y semiáridas, y demasiado bajos para lugares muy húmedos, sobre todo cuando los perfiles de espesor se están modelando.

El programa realiza análisis de balance de agua durante un período mínimo de un año. Todas las simulaciones inician el 1 de enero y finalizan el 31 de diciembre. El estado del vertedero, las propiedades del suelo, espesores, densidad del agujero de la geomembrana, nivel máximo de la vegetación, etc., se supone que son constantes a lo

largo del período de simulación. El programa no puede simular la operación de llenado de un relleno activo. Los rellenos activos se modelan para un año a la vez, añadiendo un incremento anual de materiales y la actualización de la humedad inicial de cada capa, para cada año de simulación.

▪ **Método BASE (Balance de Agua en Serie) (UNAM, 2000)**

El método BASE se desarrolló bajo la coordinación del Departamento de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), y se aplicó en el relleno sanitario de Nuevo Laredo, Tamaulipas (el cual, es uno de los rellenos sanitarios mejor operados en México, por la firma de ingeniería más grande del país, ICA SETASA) (Cruz et al., 2000).

El método propuesto por la UNAM es una herramienta de cálculo sencilla y práctica, que permite predecir, con una precisión aceptable, el lixiviado a generarse en un relleno sanitario (Cruz et al., 1999); sin embargo, esta precisión depende de la conformación del relleno sanitario, es decir, que el mismo sea ordenado mediante celdas uniformes, las cuales deben tener un seguimiento de las fechas constructivas de las mismas. Ésta puede ser una de las principales limitaciones para el uso de este método, ya que este se ajusta a rellenos bien operados y con un seguimiento diario de su operación.

El BASE tiene en cuenta el control de las celdas de confinamiento del relleno sanitario, con ello es posible obtener el tiempo de exposición a la intemperie de cada una de las celdas; considera la capacidad de campo y su variación, al aumentar la profundidad o la altura de la macrocelda; éste es otro parámetro que adquiere gran importancia; además incluye entre sus parámetros de cálculo aquellos que intervienen en el balance de agua, tales como la altura de precipitación, evapotranspiración, infiltración, capacidad de campo y percolación de agua (Cruz et al., 2000).

El método requiere de ser alimentado con lo siguiente: niveles de precipitación y evapotranspiración, peso volumétrico de los residuos sólidos municipales (RSM), cantidad diaria de residuos sólidos dispuestos, área de las celdas de confinamiento, fecha de confinamiento de las celdas, humedad relativa y capacidad de campo de los RSM, a diferentes profundidades (Cruz et al., 2000).

El procesamiento de la información y cálculos de generación de lixiviados se lleva a cabo a través de una simple hoja de cálculo del programa de Excel. Para estos cálculos, el método considera una macrocelda como unidad básica para medir la generación de lixiviados, la cual está, a su vez, conformada por celdas de confinamiento independientes, ubicadas en forma contigua y horizontal (Cruz et al., 2000).

Método de solución: La primera fase de la hoja de cálculo consta de 7 columnas, y son: 1) Contiene el orden de todas las celdas de confinamiento que constituyen una macrocelda. El orden se da de acuerdo al tiempo en el que se formaron, desde la primera hasta la última celda; 2) Contiene el tiempo que ocupó la formación de cada celda de confinamiento; 3) Es el tiempo de exposición de la celda a la intemperie, es decir, el tiempo que abarca desde el comienzo de su formación hasta que otra celda la cubre por completo. Cabe mencionar que esta última columna es de vital importancia para el método, pues de este valor es posible saber la cantidad de agua infiltrada al interior de la celda. 4) Presenta el área de cada celda de confinamiento que, por lo regular, es constante. 5) Ésta ocupa la cantidad de residuos que tiene cada celda, cuyo valor se define por la ecuación (2.20)

$$B_i = T_i \times Dd \quad (2.20)$$

Donde, B_i es el contenido de basura en la celda i , en toneladas; T_i es el tiempo que dura la construcción de la celda i , en días; y Dd es la disposición diaria de residuos en el relleno, en toneladas/día.

En la columna 6, se encuentra la capacidad de campo de los residuos sólidos, para diferentes profundidades. La capacidad de campo se da en m^3 por tonelada de residuos secos. La columna 7 está ocupada por el contenido de basura seca en toneladas, cuyo valor se obtiene mediante la ecuación (2.21) :

$$S_i = B_i \times (1 - Hr) \quad (2.21)$$

Donde, S_i es la cantidad de residuos secos en toneladas. B_i es la cantidad de residuos que contiene una celda i , y Hr es la humedad relativa de los residuos en %, medida en campo.

En una segunda fase, el modelo BASE incorpora las variables climatológicas involucradas en el balance hídrico. En este paso se utilizan tres columnas, de la 8 a la 10. la columna 8 contiene la altura de precipitación que la celda captó en el tiempo en el que estuvo expuesta a la intemperie y los meses en los que cada celda estuvo expuesta; la altura de precipitación, en mm, se obtiene con la ecuación (2.22):

$$hp_i = \sum_{i,j}^n D_{i,j} \times (P_j / N_j) \quad (2.22)$$

Donde, h_{p_i} es la altura de precipitación en la celda i en mm. $D_{i,j}$ los días expuestos de la celda i , en el mes j . P_j es la altura de precipitación, en mm, del mes j y N_j el número de días del mes j .

En la columna 9 se encuentra la altura de evapotranspiración en mm, la cual se obtiene a partir de la ecuación de evapotranspiración potencial de Thornthwaite.

$$ET = 1.6 \left(\frac{10T}{I} \right)^a \quad (2.23)$$

Donde ET es la evapotranspiración potencial sin corregir, en mm; T es la temperatura media mensual, en °C, I es la sumatoria de los índices de calor (i) de cada mes j , tomando meses de 30 días, con 12 horas diarias de sol, adimensional.

$$I = \sum_{j=1}^{12} i \quad (2.24)$$

$$i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1.514} \quad (2.25)$$

a , se define como:

$$a = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.79 \times 10^{-2} I + 0.49 \quad (2.26)$$

Al final se hace una corrección tomando en cuenta la duración real del mes y el número máximo de horas de sol, según la latitud del lugar con la ecuación 2.27.

$$ET_p = Kc \times ET \quad (2.27)$$

Donde: Kc es el coeficiente que tiene en cuenta la duración real del mes y el número máximo de horas de sol, según la latitud del lugar; ET la evapotranspiración potencial mensual sin ajuste, en mm; y ET_p , la evapotranspiración potencial mensual ajustada, en mm.

Los resultados de la ecuación 2.27 se dan en alturas mensuales de evapotranspiración; este dato se necesita en alturas de evapotranspiración totales para cada celda, lo cual es

posible por la información del tiempo y época del año en que estuvieron expuestas a la intemperie, y mediante la ecuación 2.28.

$$ETp_i = \sum_{ij=1}^n D_{ij} \times \left(\frac{ET_{p_i}}{N_j} \right) \quad (2.28)$$

Donde, ETp_i es la altura de evapotranspiración en la celda i , en mm; $D_{i,j}$ los días expuestos de la celda i , en el mes j ; ETp_j la altura de evapotranspiración del mes j , en mm, y N_j es el número de días del mes j .

Por último, en la columna 10 se encuentra el porcentaje de agua de lluvia que se pierde por escurrimiento superficial. En la aplicación del modelo en el relleno sanitario de Nuevo Laredo, los valores del coeficiente de escurrimiento (K_e), se obtuvieron a partir de tablas de valores, para diferentes tipos de suelo y pendientes.

En una tercera fase el modelo realiza el balance de agua. Este procedimiento se realiza de las columnas 11 a 16. La 11) corresponde a los datos del agua que se infiltra por la capa de cubierta y que llega a los residuos dentro de las celdas. Esta columna es la suma algebraica de las variables hidrológicas estimadas. Para esta columna, la ecuación que se utiliza es la siguiente:

$$I_i = (hp_i - hp_i K_e) - ET_{p_i} \quad (2.29)$$

Donde: I_i es la altura de infiltración de la celda i , en mm. ET_{p_i} es la altura de evapotranspiración de la celda i , en mm; hp_i es la altura de precipitación correspondiente a la celda i , y K_e es el coeficiente de escurrimiento superficial en la cobertura final o de las celdas

La columna 12 indica la altura de humedad aportada por los residuos (Hh_r), dentro de cada celda de confinamiento (HB_i), y se calcula con la ecuación 2.30:

$$HB_i = \frac{B \times Hh_r \times 1000}{A} \quad (2.30)$$

La columna 13 contiene la altura de agua necesaria por capacidad de campo de los residuos sólidos municipales (HC_{ci}) y se calcula con la ecuación (2.31):

$$HC_{ci} = \frac{C_c \times S_i \times 1000}{A} \quad (2.31)$$

Donde C_c es la capacidad de campo de los RSM y S_i es la cantidad de residuos secos en Kg y A es el área de la celda i en m^2 .

Por último, la columna 14 contiene la cantidad de agua requerida por capacidad de campo, del material de cubierta ($HC_c M_c$), estos valores se obtienen a partir de datos suministrados en tablas para diferentes tipos de suelo.

En las columnas 15 y 16 se encuentra el resultado de la suma algebraica entre las columnas 11 – 14, y que da como resultado la altura de agua que percola al interior de la celda i de confinamiento, en milímetros; lo anterior se calcula con la ecuación 2.32:

$$P_i = (I_i + HB_i) - (HC_{ci} + HC_c M_c) \quad (2.32)$$

Donde, P_i es la altura de agua en mm que percola al interior de la celda i , I_i es la altura de infiltración superficial en mm, HB_i es la altura de agua que aportan los residuos. HC_{ci} es la altura de agua requerida por capacidad de campo y $HC_c M_c$ es la altura de agua en mm, requerida por capacidad de campo de la cubierta.

Si el resultado de la ecuación (2.32) es positivo, significa que el agua percola (columna 15); en caso contrario, se trata de una altura de agua requerida (columna 16). Hasta aquí el balance se realiza en forma tradicional e individual para cada celda i .

En la cuarta fase llamada “efecto de la influencia entre celdas”, se incluye la influencia que existe entre las celdas de diferentes niveles. El método considera que cada celda de confinamiento, dentro de la macrocelda, cubre de manera total o parcial sus demandas de humedad, por lo que algunas producen lixiviados y otras no. Lo anterior se debe al tiempo en que las celdas duran expuestas a la intemperie, y a la época del año en que se forman. Por ello es que en los rellenos sanitarios, el lixiviado puede aparecer poco tiempo después de haber empezado el confinamiento en una nueva macrocelda o antes de lo que marcan otros métodos o modelos que utilizan el balance de agua. Esto último se debe a que no toman en cuenta la relación entre celdas (Cruz et al., 2000).

El principal efecto que tiene esta relación es que, al lixiviar alguna celda de la capa superior, aporta humedad a la inferior inmediata, y si la última, con esta aportación además de su propia humedad, satisface sus demandas de humedad se produce lixiviado. Lo anterior influye de la misma forma en las celdas de capas inferiores, y así sucesivamente, hasta llegar al fondo y escurrir en el sistema de captación de lixiviados.

El método del balance de agua en serie se basa en el balance de agua tradicional (WBM) y se distingue de los demás métodos por realizar el balance de agua celda por celda, por incluir el tiempo en que estuvieron expuestas a la intemperie, por tomar en cuenta la variación del valor de la capacidad de campo de los RSM al encontrarse a mayor profundidad, y por tomar en cuenta la influencia que ejerce el líquido que percola de una celda de una capa superior a las de la capa inferior inmediata.

Cruz et al. (2000) expone que el método tiene las ventajas de ser sencillo, práctico y con una precisión aceptable, ya que el grado de aproximación fue de 77% para el relleno sanitario de Nuevo Laredo, Tamaulipas.

El método puede aplicarse a macroceldas cuyas capas se formen de varias franjas, requiriendo para ello al seguimiento de la formación de las celdas. Para el caso de aplicación del método, la macrocelda ya estaba terminada; en el caso en el que se aplique esta metodología a una macrocelda por construirse, se apoyará del proceso de formación de la misma.

Es importante señalar que, aunque la zona en la que se encuentra este relleno sanitario es árida y se presenta poca precipitación, el método también puede ajustarse a zonas en las que la precipitación es moderada o alta. Se recomienda aplicar el método en otros rellenos sanitarios, en las mismas condiciones climáticas que las de Nuevo Laredo y en otras diferentes, como lo pueden ser las del sureste del país, con la finalidad de calibrar el método y obtener mejores resultados (Cruz et al., 2000).

2.3.2 Modelos de biodegradación de los residuos sólidos

Uno de los principales retos en la investigación de los residuos sólidos municipales es predecir la tasa y producción total de metano en los vertederos, a partir de la degradación y estabilidad de los residuos a largo plazo. Inmediatamente después del vertimiento de los residuos en un relleno sanitario, los residuos sufren una degradación, a través de la acción bacteriana. Inicialmente, esto se lleva a cabo en condiciones aerobias, pero como más residuos son vertidos como capas superpuestas, esto impide el flujo de aire, y las reacciones bioquímicas dominantes se convierten en anaeróbicas. El metano (CH_4) y el dióxido de Carbono (CO_2) son los principales componentes del biogas que se producen durante la descomposición anaeróbica de los RSM (Meima et al., 2007).

Los procesos de degradación de los residuos que dan origen a los lixiviados y emisiones de biogas son los fenómenos que algunos modelos y expresiones pretenden simular, con el fin de hacer más completa la modelación de un vertedero, durante sus diferentes etapas. En el numeral 2.2.3 del capítulo 2, se explicaron los procesos evolutivos de un relleno sanitario mediante fases. En éstas se puede observar la generación de gases y sustancias, como producto de la biodegradación de los residuos.

Entre las expresiones que cuantifican la degradación del residuo en el vertedero se pueden diferenciar dos tipos: “globales” y “biocinéticas”. Las denominadas “globales” agrupan todos los fenómenos de degradación, en expresiones sencillas, generalmente de tipo exponencial, que calculan la cantidad de biogás generado en función del tiempo y algún parámetro de calibración experimental, generalmente la tasa de generación y la producción total de gas. El problema que presentan es que, muchas veces, el modelo surge del intento de ajuste de los datos de recuperación de gas en una instalación específica, y por tanto, no es generalizable a otras circunstancias. En todo caso los parámetros han de ser calibrados en cada caso particular, a partir de datos de campo, de manera que no pueden emplearse para estimaciones “a priori”. Frente a éstos, los “biocinéticos” estudian el vertedero como biorreactor, y establecen formulaciones más complejas, basadas en la modelización de la digestión anaerobia, en las que intervienen sustratos y biomasas, además de los productos finales. Al simular el propio fenómeno de degradación, si bien de manera más o menos simplificada, es de esperar que su validez sea extensiva a otras instalaciones. Por otro lado, el número de parámetros a validar será mucho mayor, al tratarse de expresiones más complejas (Lobo, 2003). Últimamente se han planteado también análisis matemáticos que van más allá del concepto de reactor biológico, y entran a describir cómo se desarrolla la degradación del residuo, desde la zona superficial hacia el interior, asimilando cada partícula de residuo a un “microrreactor” (Martin y Potts, 2001).

Los principales enfoques de los trabajos desarrollados para el estudio de la biodegradación de los residuos, están dados hacia: las estimaciones de producción de biogás, durante la operación y después de la clausura de un vertedero; el análisis, desde el punto de vista ambiental, sobre la degradación de los residuos y sus efectos nocivos; el potencial de aprovechamiento de las emisiones de gas generadas por los residuos en el vertedero; las estimaciones de los efectos de la degradación de los residuos para su control; entre otros; sin embargo, no han sido muchos los modelos o expresiones matemáticas que se han desarrollado en este campo, y que hayan tenido un uso como herramientas fundamentales en la evaluación ambiental de los diseños y operaciones de los vertederos, caso contrario, a los modelos hidrológicos, tales como el HELP. *“Las razones para este “retraso”, respecto a la modelización hidrológica, son, por un lado, la complejidad de los fenómenos que se intentan representar, y por otro, la escasa disponibilidad de datos de campo históricos e incluso actuales, que permitan calibrar, validar y mejorar los modelos que se van proponiendo”* (Lobo, 2003).

El parámetro más extendido, al caracterizar el comportamiento del residuo ante los fenómenos de biodegradación, es el Potencial Bioquímico de Metano (PBM), que cuantifica la cantidad de metano a que puede dar lugar la unidad de masa del material, por descomposición anaerobia. Existen y se van creando distintas técnicas para determinarlo (Adani et al. (2001); Cossu et al. (2001); Harries et al. (2001a y 2001b) citado

en Heerenklage et al. (2001); Laquidara et al. (1986); Owens y Chynoweth (1993)), pero todavía no se ha normalizado ningún ensayo. Los datos de biodegradabilidad publicados surgen de distintas condiciones experimentales (diferente humedad, trituración, incluso naturaleza del residuo.). Esto hace imposible, en muchos casos, la comparación entre unos y otros, y muy comprometida resulta también su extrapolación a las condiciones del residuo en el vertedero, difícilmente reproducibles en laboratorio (Lobo, 2003).

Un gran número de procesos influye en la producción de gas, como resultado de la degradación de los RSM en los vertederos. Para simular los efectos de la interacción entre estos procesos, se requiere de un modelo mecánico. Varios modelos de este tipo han sido desarrollados recientemente, por ejemplo, El-Fadel et al. (1996); Haarstrick et al. (2001); Batstone et al. (2002); Lobo et al. (2002); White et al. (2003) citados en Meima et al. (2007).

Los modelos mecánicos requieren datos de entrada en términos de tasas constantes y efectos de las condiciones ambientales. Muchos investigadores han utilizado la cinética de Monod para describir las reacciones de biodegradación; sin embargo, no hay uniformidad en los parámetros del modelo cinético correspondiente. Los datos de salida de estos modelos dependen, en gran medida, de la magnitud de algunos de los parámetros utilizados en el modelo; además, la cinética de Monod puede parecer demasiado compleja y está sobre - parametrizada.

De otra parte, algunos investigadores han desarrollado tipos de leyes semi-empíricas, con un menor número de parámetros, por ejemplo, Zacharof y Butler (2004); sin embargo, una desventaja de este tipo de modelo es que los valores de los parámetros de entrada del modelo no pueden compararse con otros estudios. Con el fin de lograr un enfoque adecuado para la modelación en vertederos, es necesario un análisis detallado de sensibilidad de todos los parámetros medibles del modelo y del vertedero que podría ayudar a perfeccionar y mejorar la precisión del modelo y la aplicación de modelos mecánicos basados en la cinética de Monod (Meima et al., 2007).

White et al. (2003) describieron el planteamiento de un modelo numérico genérico espacialmente distribuido, dirigido a contener y unir distintos submodelos para simular la degradación del residuo sólido y la generación de gas en el vertedero. El modelo se estructura en elementos discretos de volumen constante vinculados, entre sí y agrupados en “pilas” verticales, e “incluye la simulación del transporte del lixiviado y los gases, así como la consolidación del sólido”.

De acuerdo con White et al. (2003), este modelo numérico de degradación del vertedero y procesos de transporte fue desarrollado para apoyar los ensayos de campo y laboratorio llevados a cabo por el *Southampton University Waste Management Research Group*. Inicialmente el modelo fue configurado para soportar las investigaciones relacionadas a la

comprensión y consolidación de las características de la biodegradación de los residuos sólidos, y la aceleración y estabilización de la degradación de los residuos sólidos, utilizando la recirculación, tratamiento y depuración de los lixiviados; sin embargo, el modelo está diseñado para tener un papel más amplio, y está visto como un moderador para la gama de modelos de simulación de procesos en un vertedero que están siendo desarrollados por otros investigadores.

Con este modelo, se intentó proporcionar un marco en el que varios modelos con el mismo propósito pudieran ser incorporados y unidos entre sí, para examinar su desempeño en una simulación espacialmente distribuida de un vertedero. Por supuesto, teniendo en cuenta que un modelo nunca sería suficientemente exacto, como para simular precisamente el proceso de degradación en residuos sólidos no homogéneos; sin embargo, serviría para proporcionar una base útil para el diseño de procedimientos de prueba física en residuos sólidos, y de un método normalizado, en el que los datos derivados de estas pruebas puedan ser interpretados y extrapolados (White et al., 2003).

2.3.3 Modelos integrados

Un modelo de simulación para vertederos sería ideal si incorpora, además de los aportes de humedad por infiltración, la humedad proporcionada por la descomposición de los residuos orgánicos que son depositados en el relleno.

Son varios los trabajos que tratan de integrar distintos efectos y manifestaciones en el residuo, pero muchos de ellos surgen del análisis de experiencias de laboratorio o campo, y no llegan a generalizarse para su aplicación en vertederos. Entre los modelos de simulación de instalaciones completas, algunos se centran en la biodegradación (Findikakis et al., 1979; El Fadel et al., 1996) acoplando las descripciones de generación y transporte de gas y calor, sin tener en cuenta el flujo de agua que provoca y el transporte de sustancias. El resto tiene su fundamento en las ecuaciones de conservación de la masa con transporte en el agua, añadiendo cada uno distintos términos de transformación del residuo como fuente de contaminación. En estos últimos, se distinguen los que simulan liberación química de sustancias que dan lugar a sales disueltas (recopilados por El-Fadel et al., 1997a; Demirekler et al., 1999; Barina et al., 2001) y los que incluyen la biodegradación con generación de contaminantes orgánicos y biogás (Lobo, 2003). Cruz et al. (2000), aunque propone un modelo simple de balance de agua para un vertedero para estimar la producción de lixiviados (modelo BASE), incluye el aporte de humedad por parte de los residuos sólidos, mediante la incorporación de valores de humedad relativa de residuos, los cuales son obtenidos mediante pruebas de laboratorio; sin embargo, este modelo no considera la evolución de los aporte de humedad en relación a los procesos evolutivos de un vertedero.

Lobo (2003) cita a Zacharof y Butler (1999), los cuales proponen un método que asocia un modelo simplificado de degradación del residuo con uno hidrológico y de transporte de contaminantes de tipo estocástico. Con él, realizan simulaciones teóricas y de celdas experimentales, en las que logran aproximaciones esperanzadoras. Pero, esta clase de herramientas son difícilmente aplicables en fase de predicción, pues por su propia naturaleza, no es posible la calibración, sin observaciones de campo previas.

Hanel et al. (2001) describen las bases de un modelo para predecir las emisiones globales de lixiviado y gas, así como las variaciones temporales de temperatura y sustancias disueltas y gaseosas, en distintos puntos de la matriz del vertedero. Emplean el método de elementos finitos para describir un modelo tridimensional, de flujo multifásico y de transporte de sustancias y calor. En él “considerarán los transportes difusivos, dispersivos y advectivos, y la degradación aeróbica y anaeróbica de las sustancias orgánicas”, cuya modelización inicial publican Haarstric et al. (2001).

Lobo (2003) en su trabajo doctoral, realizó una revisión de varios modelos que cumplen el objetivo de modelar la biodegradación de los residuos, y desarrolló el programa MODUELO 2 del Grupo de Ingeniería Ambiental, de la Universidad de Cantabria, el cual incluye la generación de sustancias contaminantes orgánicas, la producción de biogas e incorporan los aportes de agua por precipitación. A continuación, se presenta un resumen de la revisión presentada por Lobo (2003), sobre modelos integrados de simulación de vertederos que incluyen biodegradación de residuos (Tabla 4 y Tabla 5)

Como es visto, se han realizado múltiples trabajos que pretenden realizar una simulación aproximadamente completa de los procesos que se originan en el vertedero, en especial la producción del biogas y lixiviados; sin embargo, para efectos de este trabajo se considerarán los modelos más recientes que estiman la producción de lixiviados integrando la biodegradación de los residuos y los aportes de humedad por infiltración.

Tabla 4. Resumen de las referencias encontradas sobre otros modelos “integrales” de simulación del vertedero que incluyen biodegradación (I)

REFERENCIAS	OBJETIVO	CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES	APLICACIÓN
Vincent et al. (1991)	Modelo conceptual para describir el comportamiento hidráulico, químico y biológico de los residuos.	Flujo y transporte de contaminantes en medio poroso no saturado Disolución y consumo del contaminante en el lixiviado Unidimensional	En columnas experimentales

REFERENCIAS	OBJETIVO	CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES	APLICACIÓN
Lee et al. (1993)	Predecir la producción de metano y dióxido de carbono.	Flujo y transporte de contaminantes en medio poroso no saturado Hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis biológicas Unidimensional	Lisímetro
Al-Yousfi y Pohland (1998) Pohland y Al-Yousfi (1995)	Simular la cantidad y contaminación del lixiviado y biogás, con y sin recirculación durante la estabilización del vertedero, como base para el diseño de estrategias de operación.	Flujo y transporte de contaminantes en medio poroso no saturado Hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis biológicas. Predicción del pH y su influencia en la metanogénesis. Unidimensional	En celdas experimentales
Butler et al. (1999) Zacharof y Butler (1999) Zacharof y Butler (2001)	Representar la heterogeneidad espacial del vertedero y sus efectos sobre la generación de gas y lixiviados.	Modelo hidrológico y de transporte de contaminantes de tipo estocástico Hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis biológicas simplificadas. Unidimensional	Teórica y en celdas experimentales

Fuente: Lobo (2003)

Tabla 5. Resumen de las referencias encontradas sobre otros modelos “integrales” de simulación del vertedero que incluyen biodegradación (II)

REFERENCIAS	OBJETIVO	CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES	APLICACIÓN
Hanel et al. (2001) Haarstrick et al. (2001)	Predecir la vida útil del vertedero para su “seguimiento y predicción de la seguridad funcional a largo plazo”.	Flujo multifase y transporte advectivo, difusivo y dispersivo, de sustancias y calor. Degradación aerobia y anaerobia Predicción de pH y temperatura y su efecto en la degradación Tridimensional	Teórica

REFERENCIAS	OBJETIVO	CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES	APLICACIÓN
Lee et al. (2001)	Predecir la contribución de la biodegradación a la atenuación de la contaminación y su concentración en el lixiviado a lo largo del tiempo.	Flujo y transporte de contaminantes en medio poroso no saturado Hidrólisis y degradación aerobia y anaerobia. Simulación del oxígeno disuelto Unidimensional	Teórica Análisis de sensibilidad
White et al. (2001)	Base para investigaciones sobre la compresión, consolidación y estabilización de los residuos mediante recirculación y tratamiento de lixiviados.	Estructurado en elementos de volumen constante agrupados en pilas. Base para la acogida de distintos submodelos. Tridimensional	Teórica

Fuente: Lobo (2003).

▪ **MODUELO 2 (Lobo, 2003)**

MODUELO 2 se desarrolla como una herramienta para la “evaluación ambiental” del vertedero. Pretende predecir el caudal de lixiviado, su contaminación orgánica y el biogás generado en vertederos de residuos urbanos, como consecuencia de la penetración de agua y los procesos de biodegradación. Es un programa desarrollado en C++ que representa el vertedero como una malla en tres dimensiones de celdas paralelepípedicas, cuyos puntos centrales constituyen los nodos de un esquema de diferencias finitas. En él, se plantea el flujo de agua, transporte advectivo de sustancias orgánicas y los procesos de degradación biológica que dan lugar a la contaminación del lixiviado y al biogás. La versión inicial fue presentada por Lobo et al. (2002).

A partir de datos climatológicos, producción de residuos, configuración del vaso de vertido y explotación del vertedero, el modelo estima tanto los lixiviados producidos a lo largo del tiempo, como su contaminación orgánica y el gas generado en la degradación biológica de los residuos. El programa reproduce la historia de vertido, e incorpora además, un módulo independiente de simulación de escenarios de gestión de residuos. La simulación con el modelo convenientemente calibrado, permite predecir el caudal de líquido lixiviado extraído por la red de drenaje, y la contaminación orgánica y el biogás generados diariamente.

Este modelo es una versión mejorada de una primera llamada MODUELO I, el cual surge de la consulta de trabajos de modelización de distintos fenómenos propios del vertedero, publicados por otros autores (Chynoweth et al., 1979; Demetracopoulos et al., 1986; Guyonnet et al., 1997; Khanbilvardi et al., 1995; Korfiatis y Demetracopoulos, 1984; Pohland y Al-Yousfi, 1995; Raveh y Avnimelech, 1979; Schroeder et al., 1994). El objetivo no era la elaboración de modelos de procesos específicos, sino, a partir de la bibliografía existente, haciendo las simplificaciones necesarias, crear uno global destinado al uso directo en diseño y explotación del vertedero (orden de llenado) (Lobo ,2003).

El vertedero, dentro del modelo, se basa en una discretización tridimensional. Éste se divide en capas formadas por celdas de planta cuadrada, donde se definen las celdas de tipo terreno, vertedero, vertedero sellado, relleno permeable (celdas dren) y relleno impermeable.

El algoritmo general del programa es el propuesto por la versión de MODUELO 1, donde son necesarios tres tipos de datos: de producción de residuos; definición geométrica y explotación del vertedero (orden de llenado); y datos meteorológicos. Cada tipo es gestionado por tres bloques de “gestión de datos” (“de clima”, “configuración actual del vertedero” y de “producción de residuos”) y dos módulos principales de cálculo (hidrológico y de biodegradación) que conservan una estructura independiente (Ver Figura 7.).

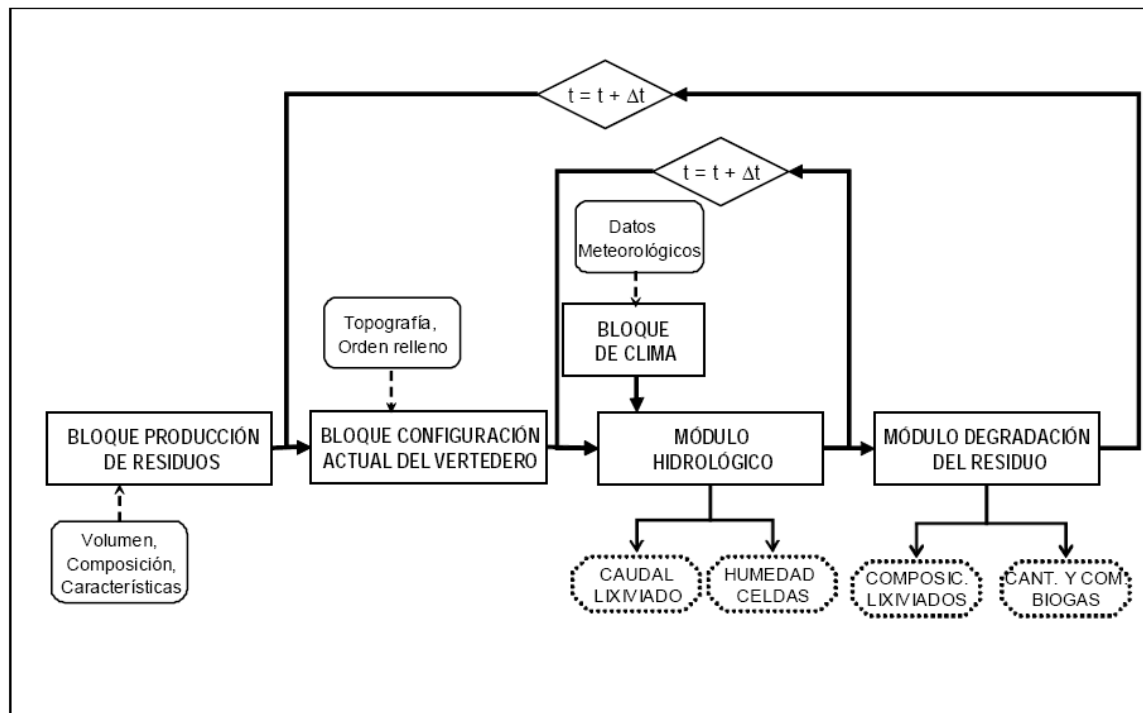


Figura 7. Algoritmo general del programa MODUELO 1
Fuente: Lobo et al. (2002).

En MODUELO 2, el motivo de las modificaciones, es en unos casos, adecuar el modelo a la disponibilidad real de datos caracterizadores de las instalaciones, en otros, corregir errores en la formulación inicialmente planteada, y en otros, replantear la idealización de los procesos a representar. Los cambios más significativos afectan a los modelos empleados en la simulación de los balances hidrológicos y la biodegradación. Los bloques de producción de residuos y configuración actual del vertedero sólo han ido adaptándose a las necesidades planteadas por estos mismos cambios, Lobo (2003).

Bloque de producción de residuos: de acuerdo con Lobo (2003), este componente del modelo conserva el planteamiento dado en la versión inicial MODUELO 1. El bloque contiene los datos cualitativos y cuantitativos de los residuos que son depositados en el vertedero de forma diaria o acumulativa, de forma anual. Calcula la evolución interanual de las cantidades de residuo producidas, su composición y características, a partir de los datos que el usuario le proporciona sobre: población servida por el vertedero y su tasa de evolución interanual, tasa y crecimiento de la producción de residuos, composición de los residuos en determinado año, propiedades del residuo (humedad, densidad en vertedero y poder calorífico), proporciones de reciclado, biodegradabilidad y composición química. Con relación a la composición de los residuos, en este bloque se pueden clasificar los residuos en categorías de orgánicos e inorgánicos y estas a su vez contener cantidades de tipos de residuos específicos. Esto es aplicable para los casos en que la operación del relleno incluye una clasificación y/o caracterización de los residuos, previo a su disposición.

En MODUELO 2, este bloque sólo se modificó con relación a la introducción de nuevas variables y nuevos parámetros a definir por el usuario, entre otros. Es decir, se redefinieron las características de biodegradabilidad del residuo para una descripción “real”.

Bloque de configuración del vertedero: MODUELO 2 mantiene la configuración original del modelo de vertedero: división en malla tridimensional sobre la cual se definen las celdas tipo terreno, celda vacía, celda vertedero, celda vertedero sellado, celda relleno, celda dren. Este bloque basado en los datos topográficos y de explotación, y los datos aportados por el bloque de residuos, establece qué celdas están colocadas durante el ciclo correspondiente y actualiza sus propiedades (humedad, capacidad de campo, sustancias disueltas en el agua contenida, etc.).

El modelo supone el vertedero como una malla tridimensional en la cual las dimensiones horizontales son constantes y las verticales varían de una capa a otras. El programa distingue entre dos tipos de mallas: la empleada para la definición del terreno y la malla de cálculo. La primera se utiliza en el algoritmo de transformación de los planos del vaso de vertido en formato digital (*.dxf) al formato del programa (*.mrf), y será más detallada

cuanto mayor sea la información de que se disponga. La malla de cálculo es la que define el tamaño de las “celdas” con que se representa el vertedero.

Lobo et al. (2002), definen los seis tipos de celdas que se plantean para la configuración del vertedero de acuerdo a la funcionalidad que estas cumplen en la operación del mismo. Cuando en el vertedero se manejan coberturas inactivas o impermeables que no interactúen con otras celdas, la clase de celda que simula esta función es la “tipo terreno”. Sí se utilizan capas que permitan el flujo de forma libre hacia celdas inferiores y que no posean ningún tipo de relleno, en MODUELO 1 éstas son representadas mediante las “celdas vacías”.

De otra parte, las cobertura final o tapa del vertedero, es representada como una “celda vertedero sellado”, que debe ser definida con los parámetros necesarios para comportarse como una cubierta de sellado, es decir, una capa con cobertura vegetal donde se produce evapotranspiración. Si se utilizan coberturas con permeabilidad nula formadas por un solo material, el modelo representa este material como “celdas relleno”. Para el caso contrario, en el cual se utilizan tipos de rellenos como gravas drenantes utilizadas para los drenajes verticales, se debe usar en la configuración del vertedero las “celdas tipo dren”. A estas celdas se les introduce el valor de sus permeabilidades vertical y horizontal, sus humedades de saturación y capacidad de campo y la densidad. Pueden definirse, en una misma simulación, dos tipos de “celda dren” con características diferentes.

El tipo de celda de uso más común en la operación de un relleno sanitario y que se representa en MODUELO 1 como la basura que va llegando y su cobertura correspondiente, es la “celda vertedero”. Para definir sus características hidrológicas se introducen los parámetros de Horton, la capacidad de campo inicial del residuo, la humedad de saturación, las permeabilidades vertical y horizontal del residuo y la permeabilidad vertical y la densidad de la cobertura. Estas propiedades son comunes para todas las celdas vertedero del modelo. Inicialmente se define como celda vacía y no es rellena hasta que ha llegado suficiente cantidad de residuos al vertedero. Las “celdas vertedero” se ubican sucesivamente a medida que van llegando residuos al vertedero, a diferencia de las celdas dren y celdas relleno.

El algoritmo de MODUELO 1 plantea dentro del bloque de configuración del vertedero la red de evacuación de lixiviados. Para este caso, el sistema de drenajes puede ser representado con las “celdas tipo vertedero” a las cuales se les deben establecer los siguientes parámetros: “Ad”, “K_{vdren}”, “β” y “n”. “Ad” es el “área de drenaje por celda”, que limitará el volumen de agua transportado a través del sistema de drenaje. Se calcula dividiendo la sección de tubería principal de conducción de lixiviados entre el número de celdas que componen la capa. “K_{vdren}” es la “permeabilidad equivalente del dren”, un

parámetro que permite sustituir la permeabilidad vertical del material principal de la celda (normalmente basura) por otro valor “que tenga en cuenta la curvatura de las líneas de flujo” hacia la tubería de drenaje. “ β ” es la pendiente de las conducciones de drenaje y “n” es el parámetro de rugosidad de Manning de las mismas.

Bloque de clima: como el programa pretende evaluar los flujos diarios de lixiviado, los datos meteorológicos necesarios (precipitación, temperatura, insolación, velocidad media del viento y humedad relativa del aire) son valores medios diarios, salvo los de precipitación. Para definir con la aproximación necesaria las proporciones de lluvia infiltrada y escurrida es imprescindible disponer de datos horarios de precipitación, que se procesan en cada paso de tiempo del modelo hidrológico. La simplificación del balance de infiltración a la media diaria conduciría a resultados muy alejados de la realidad (Lobo, 2003).

Tal como se plantea en MODUELO 1 por Lobo et al. (2002), el programa permite cargar los datos directamente desde los ficheros generados por la estación meteorológica correspondiente. Para el estudio predictivo (diseño) proyecta a futuro los datos a partir de la serie introducida, mediante copia de años elegidos aleatoriamente.

Es frecuente que las series horarias de precipitaciones registradas por la estación meteorológica de interés no estén completas. MODUELO 1 permite rellenar los vacíos de la serie añadiendo ceros a la misma (períodos secos), o crear lluvias sintéticas generadas a partir de la serie de lluvias medias diarias, haciéndolos proporcionales a la distribución de las precipitaciones en una estación meteorológica cercana de la que sí se posean datos. Para MODUELO 2 se tiene la posibilidad de introducir series meteorológicas “simplificadas”, según los datos disponibles en el vertedero.

Modulo hidrológico: El módulo hidrológico de MODUELO 1, toma en cada paso de tiempo (cada hora) los datos de configuración del vertedero, contenido de humedad de las celdas resultante del paso anterior y precipitación. Con ellos calcula, para cada celda, el agua que es transportada vertical y horizontalmente a las celdas contiguas o al sistema de recolección de lixiviados según los distintos “submodelos de flujo”, actualizando su humedad. Previamente, mediante el “balance hidrológico superficial” y tomando el resto de valores de la serie meteorológica, establece la proporción de lluvia infiltrada y evaporada o evapotranspirada, renovando la humedad de las celdas superficiales. El proceso se repite para cada intervalo de tiempo, dando como resultado final los valores acumulados diarios de volumen precipitado sobre el vertedero, volumen infiltrado, evaporado o evapotranspirado, escurrido y el lixiviado total por dren (Lobo et al., 2002).

MODUELO 2, presenta las siguientes modificaciones para este modulo: Realiza un perfeccionamiento de los modelos de balance superficial existentes en MODUELO 1; hace una inclusión del recuento de la escorrentía superficial conectada a la red de

recogida de lixiviados; reformula el modelo de flujo horizontal; realiza una incorporación correcta del modelo de flujo vertical; plantea un replanteamiento del modelo de flujo al dren y hace una consideración de la variación en el vertedero de otros parámetros hidrológicos.

Balance hidrológico superficial: MODUELO 2, al plantear unos modelos mejorados para el cálculo del balance hidrológico, tiene en cuenta una estrecha relación entre los modelos aplicados para estimar las variables del balance hídrico y la disponibilidad de datos, lo que permite una aproximación a la realidad para los valores estimados. Además de los datos disponibles, el programa tiene otros condicionantes como la caracterización de las capas superficiales y el intervalo de cálculo o paso de tiempo.

De otra parte, Lobo (2003), para el programa MODUELO 2, resalta la importancia de realizar un análisis de los fenómenos hidrológicos que condicionan la degradación del vertedero, en un periodo de tiempo menor (diario/horario) a las que se utilizan en la mayoría de las expresiones aplicadas para el balance hídrico, que generalmente son las desarrolladas para estudios agronómicos (éstas suministran valores decenales, mensuales, y pocas veces diarios).

En MODUELO 1, para la estimación de la evapotranspiración (EVT), se plantearon tres escenarios distintos, en los cuales se puede presentar este proceso. Cuando se puede presentar en un suelo desnudo, con presencia de la capa freática cercana a la superficie, caso para el cual se utiliza la expresión analítica de Penman. Cuando la evaporación (EVP) se da sobre un suelo desnudo, en condiciones por las cuales el transporte de agua desde zonas inferiores es limitante, se aplica la fórmula empírica obtenida por Turc, para el cálculo de la evaporación producida en un período de 10 días, en función de la precipitación; un último caso es la evapotranspiración sobre el vertedero sellado, donde la pérdida de agua se obtiene por el método de Thornthwaite: los valores mensuales de la evapotranspiración potencial (EVTP) se calculan a partir de la temperatura media mensual y la insolación recibida.

Para MODUELO 2, Lobo (2003) plantea un algoritmo, donde la evaporación (EVP) y evapotranspiración (EVTP), para cada tiempo (t), es estimada principalmente sobre el agua de la precipitación que cae sobre el vertedero (P) y el agua que queda almacenada superficialmente (ALMSUP), obteniendo, de esta forma, la evaporación superficial (EVS). El algoritmo planteado en este programa para el balance hidrológico superficial se presenta en la Figura 8.

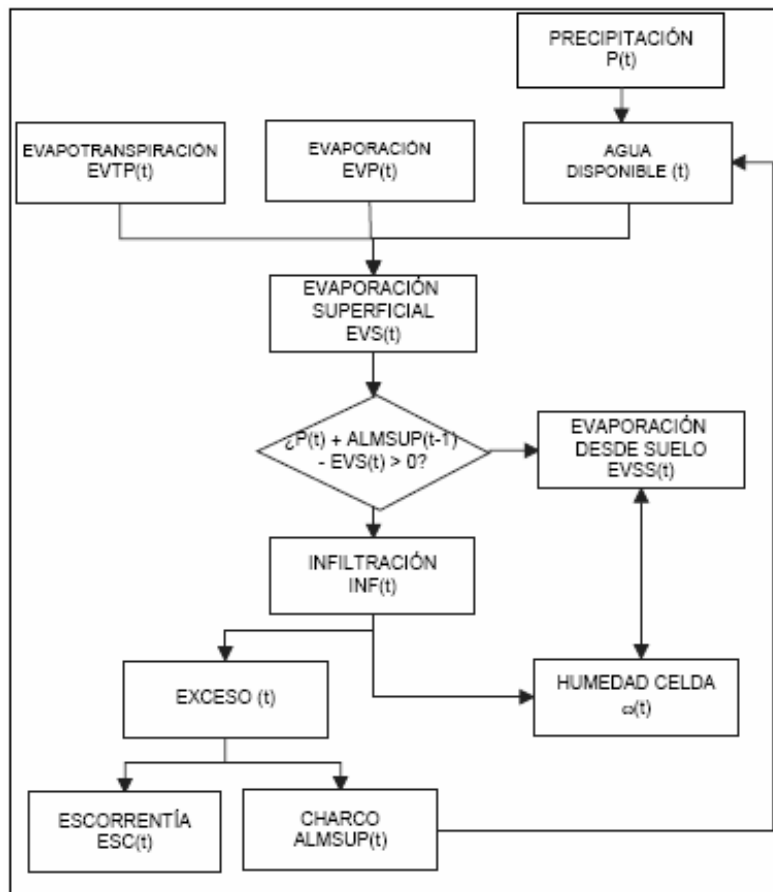


Figura 8. Algoritmo para el balance hidrológico en MODUELO 2
Fuente: Lobo (2003).

La infiltración (INF) es estimada a partir del agua disponible menos la EVS: $(P + ALMSUP - EVS)$. Para el algoritmo propuesto, se infiltrará una parte INF si la sumatoria es mayor que cero. Este volumen INF está dado por la Ley de Horton y aumenta el contenido de humedad de la celda, ω . El resto formará charcos (ALMSUP) hasta que supere una “altura máxima de charco”, a partir de la cual se produce escorrentía superficial (ESC), que es agua que no intervendrá en cálculos posteriores. El volumen acumulado en la superficie (ALMSUP) permanece disponible para la infiltración o evapotranspiración en el paso de tiempo siguiente. Si por el contrario las demandas EVP o EVTP son mayores que $P + ALMSUP$, entonces, desaparecerá en forma de evaporación subsuperficial (EVSS) parte de la humedad presente en la “profundidad de evaporación” interior a la celda superficial [EVP ó EVTP menos $(P + ALMSUP)$]. Si con el volumen contenido en la profundidad de evaporación no fuera suficiente, parte de la demanda de evaporación quedaría insatisfecha (Lobo, 2003).

Evaporación – Evapotranspiración: para estas variables el intervalo de tiempo de cálculo adoptado por el modelo es el horario, siendo este intervalo el resultado de una

discretización uniforme de los valores estimados por las expresiones empleadas en el programa, las cuales cuantifican estas variables en períodos mayores, por lo que prevalecen las expresiones que realizan estimaciones diarias y que están basadas en los trabajos de Penman (1963).

Lobo (2003) establece tres situaciones, mediante las cuales se definen qué expresiones se pueden utilizar con relación a la disponibilidad de datos, para estimar la EVP y EVPT: 1. Cuando exista un registro diario de evaporación en lisímetro situado en el lugar del vertedero. 2. Cuando no exista tal registro, en cuyo caso se recurrirá a datos meteorológicos indirectos, bien obtenidos in situ en estaciones cercanas. 3. Cuando sólo se dispone de los datos de temperatura máxima y mínima diarias in situ.

En MODUELO 2 se calcula una evaporación potencial (EVP) o evapotranspiración potencial (EVTP) para el caso de celda sellada mediante el siguiente esquema:

$$Si\ EVP(\acute{o}\ EVPT) < (P + ALMSUP) \left\{ \begin{array}{l} ent.\ DISPINF = (P + ALMSUP) - EVP \\ si\ no,\ si\ EVP - (P + ALMSUP) > V_{\omega_{eva}} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} ent.\ V_{\omega} = V_{\omega} - V_{\omega_{eva}} \\ EV = P + ALMS + V\omega_{eva} \\ si\ no\ V_{\omega} = V_{\omega} - [EVP - (P + ALMSUP)]; \\ EV = EVP \end{array} \right.;$$

Donde:

$P + ALMSUP$: agua disponible en mm

$DISPINF$: parte disponible para infiltración en mm

$V_{\omega_{eva}}$: humedad disponible en la profundidad de evaporación en mm

V_{ω} : almacenamiento de la celda en mm

La evaporación se va produciendo sucesivamente a partir del agua precipitada en ese paso de tiempo, o almacenada en superficie, en intervalos anteriores, y del agua almacenada por el suelo, hasta completar el volumen potencial. Si el agua disponible para estos procesos no es suficiente, una parte de la EVP (ó EVTP) no será ejercida. Si la suma del volumen precipitado más el almacenado en superficie es mayor que la demanda de evapotranspiración, quedará una parte disponible para infiltración ($DISPINF$). En caso de que la EVP (ó EVTP) supere ($P + ALMSUP$), pero no la humedad disponible en la profundidad de evaporación, $V_{\omega_{eva}}$, el almacenamiento de la celda, V_{ω} , se verá reducido en una cantidad igual a la demandada (Lobo, 2003).

Las ecuaciones para estimar la EVP ó EVPT se seleccionan con relación a la información disponible:

Evaporación Potencial: se utiliza la ecuación de Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1982) para estimar energía disponible para evaporación (E_0) si se tienen registros diarios de temperatura mínima y máxima (ecuación 2.33). En caso de tener registros diarios meteorológicos “completos”, se utiliza la ecuación de Penman que incluye el método aerodinámico y de balance de energía (ecuación 2.35).

Hargreaves:

$$E_0 = \frac{0.0023 (T_{\max} - T_{\min})^{0.5} \left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} + 17.8 \right) Ra}{\lambda} \quad (2.33)$$

Donde:

T_{\max} : temperatura máxima del día

T_{\min} : temperatura mínima del día

Ra: radiación solar media, fija por latitud y estación (cal/cm²/d)

λ : calor latente de vaporización del agua (cal/cm²/mm)

$$\lambda = 59.732 - 0.0564 \left(\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \right) \quad (2.34)$$

Penman:

$$EVP = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} E_r + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_a \quad (2.35)$$

Donde:

EVP: evaporación potencial (mm de agua)

E_r : energía neta de radiación (mm de agua)

E_a : energía aerodinámica para la evaporación (mm de agua)

Δ : pendiente de la curva de tensión de saturación-temperatura (mmHg/°C)

γ : constante psicrométrica = 0.485 mm Hg/°C

$$E_r = \frac{R_i (1 - r) - R_o}{\lambda} \quad (2.36)$$

Donde:

R_i : radiación incidente (cal/cm²/d)

R_o : radiación reflejada (cal/cm²/d)

r : albedo, relación entre la radiación reflejada de onda corta y la radiación global incidente, 0.14 para suelo sin vegetación

$$\lambda = 59.732 - 0.0564 T \quad (2.37)$$

T = temperatura media diaria del aire (°C).

$$R_i = R_a \left(0.18 + 0.55 \frac{n}{N} \right) \quad (2.38)$$

Donde:

R_a : radiación solar, fija por latitud y época del año (cal/cm²/d)

n/N : relación horas reales de sol / máximo periodo de insolación

$$R_o = \sigma (T + 273)^4 (0.56 - 0.09 \sqrt{e}) \left(0.1 + 0.9 \frac{n}{N} \right) \quad (2.39)$$

Donde:

σ : constante de Stefan-Boltzmann = 1.18944×10^{-7} (cal/cm²/d/°K)

e : tensión de vapor del aire (mmHg)

$$e = \varepsilon \frac{e_a}{100} \quad (2.40)$$

Donde:

ε : humedad relativa

e_a : tensión de vapor de saturación a la temperatura T, (mmHg)

$$e_a = 7.501 \exp\left(\frac{16.78T - 116.9}{237.3 + T}\right) \quad (2.41)$$

$$E_a = 0.35(0.5 + 0.54v)(e_a - e) \quad (2.42)$$

$$v = \frac{R \times 1000}{3600 \times 24} \quad (2.43)$$

v : velocidad del viento a 2 m sobre la superficie (m/s)

R: recorrido del viento en 24 h (km)

$$\Delta = \frac{4098}{(T + 237.3)^2} 7.5 \exp\left(\frac{16.78T - 116.9}{237.3 + T}\right) \quad (2.44)$$

Evapotranspiración Potencial: si se tienen registros diarios de temperatura mínima y máxima, en Lobo (2003), a partir de los trabajos de Penman (Shaw, 1994) se adopta una fracción variable en cada mes de la evaporación estimada según la Ecuación 2.34: 60% en enero, febrero, noviembre y diciembre, 70% en marzo, abril, septiembre y octubre y 80% el resto.

Si se tienen registros diarios completos, la evapotranspiración para una superficie con vegetación, como sería el caso del vertedero sellado, se estima de la misma forma que se estima en superficies de agua libre (ecuación 2.35), solo que presenta ciertas modificaciones. Por ejemplo el valor del albedo r es 0.25 por las propiedades de la vegetación con relación al suelo desnudo, además de:

$$E_a = 0.35(1 + 0.54v)(e_a - e) \quad (2.45)$$

El factor 0.5 de la Ecuación 2.42 es sustituido por 1 para tener en cuenta el efecto de rugosidad introducido por la vegetación. Además, en MODUELO 2 se introduce un coeficiente reductor = 0.95 de la radiación reflejada, que tiene en cuenta que la vegetación no radia como un cuerpo negro perfecto (Lobo, 2003); en este caso la radiación reflejada se estima como:

$$R_0 = 0.95 \sigma (T + 273)^4 (0.56 - 0.09\sqrt{e}) (0.1 + 0.9 \frac{n}{N}) \quad (2.46)$$

De otra parte, la variable evaporación del suelo depende del tipo de suelo, la vegetación implantada y de la humedad previa a la evaporación. En esta variable se tiene en cuenta el concepto de “profundidad de evaporación”, para la cual Lobo (2003), tiene en cuenta la relación establecida experimentalmente por Schroeder et al. (1994) entre la conductividad hidráulica saturada de un suelo y la profundidad máxima de evaporación (ecuación 2.46).

$$H_{eva} = 4.6068 \times 1.5952^{-\log_{10} K} \quad (2.47)$$

Donde:

H_{eva} : máxima profundidad de evaporación (pulgadas)

K : conductividad saturada de la superficie (cm/s)

Como la profundidad de evaporación en el caso de un vertedero se estima para un material no homogéneo (presencia de residuos y diferentes capas de cobertura), el cual tiene conductividades hidráulicas diferentes, en Lobo (2003), se presenta un cambio en K, la cual se expresa para una permeabilidad equivalente a un estrato formado por dos materiales de conductividades hidráulicas K1 y K2 y espesores en la dirección del flujo L1 y L2, respectivamente, para el caso de flujo transversal es K_{eq} :

$$K_{eq} = \frac{(L1 + L2) \times K1 \times K2}{K2 \times L1 + K1 \times L2} \quad (2.48)$$

Puesto que en el vertedero cabe esperar que la evaporación actúe sucesivamente sobre capas de menos (cobertura intermedia o final) a más permeables y que la diferencia entre los valores de permeabilidad suele ser de varios órdenes de magnitud, se simplifica en la Ecuación 2.48, despreciando el término $K1.L2$. Considerando además que la suma de L1 y L2 suele ser cercana al metro, se llega a la ecuación 2.48, que es la expresión adoptada (Lobo, 2003).

$$H_{eva} = 4.6068 \times 1.5952^{-\log_{10} \left(\frac{K1}{L1} \right)} \quad (2.49)$$

Donde:

K_1 = conductividad hidráulica de la capa superior (m/s)

L_1 = espesor de la capa superior (m)

Para la profundidad de evaporación (H_{eva}), en Lobo (2003), se considera una “humedad disponible para evapotranspiración” (V_{eva}), relacionada entre la humedad de la celda (ω) y un porcentaje de la capacidad de campo de la misma (H_{lim}):

$$V_{eva} = H_{eva} (\omega - H_{lim} \times \omega_{CC}) \quad (2.50)$$

Donde:

H_{eva} (L): máxima profundidad de evaporación

ω : humedad de la celda

$H_{lim} \times \omega_{CC}$: humedad mínima en la celda

Infiltración: para cuantificar esta variable MODUELO 2 utiliza el modelo de Horton, el cual estima la infiltración de una manera simple, y permite elegir los valores de los parámetros en cada caso particular. Por otro lado, se ajusta especialmente al paso de tiempo base del modelo (horario), que permite recalcular la capacidad de infiltración a medida que transcurre la lluvia (Lobo, 2003).

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c) e^{-kt} \quad (2.51)$$

Donde:

f_0 ($L \cdot T^{-1}$): velocidad de infiltración inicial, máxima

f_c ($L \cdot T^{-1}$): valor asintótico de la tasa de infiltración del suelo, empírico

k (T^{-1}): constante de disminución de f , función del terreno;

t : tiempo

Lobo (2003) presenta los resultados de Huber y Dickinson (1988), los cuales recogen los valores de las constantes del modelo de infiltración propuestos por varios autores. Para f_c , ellos presentan los valores orientativos de Musgrave (1955); para k , a falta de ensayos in situ proponen un valor de 4.14 h^{-1} ; y para f_0 , que depende del tipo de suelo, su estado de humedad y vegetación, los valores son propuestos por ellos mismos.

El algoritmo planteado en MODUELO 2, para estimar la infiltración, considera que el volumen de agua infiltrado (INF) en un tiempo t se obtiene con la ecuación 2.50 bajo ciertas condiciones. Este algoritmo se presenta a continuación:

$$Si \text{ DISPINF} > f(t)\Delta t \begin{cases} \text{ent.} \begin{cases} INF = f(t)\Delta t \\ ALMSUP = DISPINF - INF \end{cases} \\ \text{si no} \begin{cases} INF = DISPINF \\ ALMSUP = 0 \end{cases} \end{cases}$$

Escurrentía superficial: para definir el algoritmo de esta variable, en MODUELO 2 se considera inicialmente que el agua que cae sobre el vertedero, antes de ser evacuada como escurrentía por un sistema de drenaje, puede aumentar la infiltración y, por consiguiente, los volúmenes de lixiviados. Para analizar el efecto de la escurrentía, se analizó en Lobo (2003), un caso específico de una celda vertedero con cobertura, sometida a características hidrológicas propias de la zona de estudio (altura de precipitación) y con un sistema de drenaje superficial.

Para los efectos de la escurrentía, se considera que éstos pueden simularse teniendo en cuenta una altura de acumulación de agua máxima sobre la superficie en forma de “charco”, la cual es introducida en el modelo como un parámetro denominado “dp”, que también es llamado “altura de encharcamiento” y considerado tal como se maneja en el modelo de Huber y Dickinson (1988), donde la lluvia puede acumularse hasta que el volumen de agua supera el disponible, provocando la escurrentía.

Para este caso, el agua sobrante (ESC) “desaparece” del balance de la celda, pasando a formar parte del registro de caudales de escurrentía globales (agua recogida por los sistemas de evacuación o salida del vertedero) (Lobo, 2003). A continuación, se presenta el algoritmo planteado en MODUELO 2, para la escurrentía superficial.

$$Si \text{ dp} < ALMSUP / Ah \begin{cases} \text{ent.} \begin{cases} ESC = ALMSUP / Ah - dp; \\ ALMSUP = dp \end{cases} \\ \text{si no} \text{ ESC} = 0 \end{cases}$$

Ah : superficie horizontal de la celda.

Flujo en el interior del vertedero: en MODUELO 1 se trabajó la modelización del flujo en condiciones saturadas, y se hizo un tratamiento independiente de los movimientos del flujo en el vertedero: horizontales y verticales. En MODUELO 2, una vez que se estima la infiltración, mediante el balance superficial, se establece la altura de humedad libre inicial

para cada celda en todo tiempo “t”. Lobo (2003) propone que, a partir de esta altura, se calculen los flujos sucesivamente: que primero se determinen los flujos verticales y hacia el dren, y finalmente, el horizontal entre celdas. En cada paso las condiciones iniciales de humedad en una celda son las resultantes del cálculo de la celda anterior.

Los planteamientos para la estimación del flujo vertical que se presentaron en MODUELO 1, no sufren ningunas variaciones en MODUELO 2, distinto al caso del flujo horizontal y hacia los drenes, siendo en este último donde Lobo (2003) considera un modelo de transporte horizontal, basándose en las publicaciones de Wong (1977), McBean et al. (1982), Schroeder et al. (1994), Bagchi y Ganguli (1990). El modelo se completa con las expresiones de variación del almacenamiento y transmisividad del agua en los residuos, a lo largo del tiempo, para simular más ajustadamente la historia del vertedero. A continuación, se presenta el algoritmo planteado en MODUELO 2 para los flujos en el vertedero.

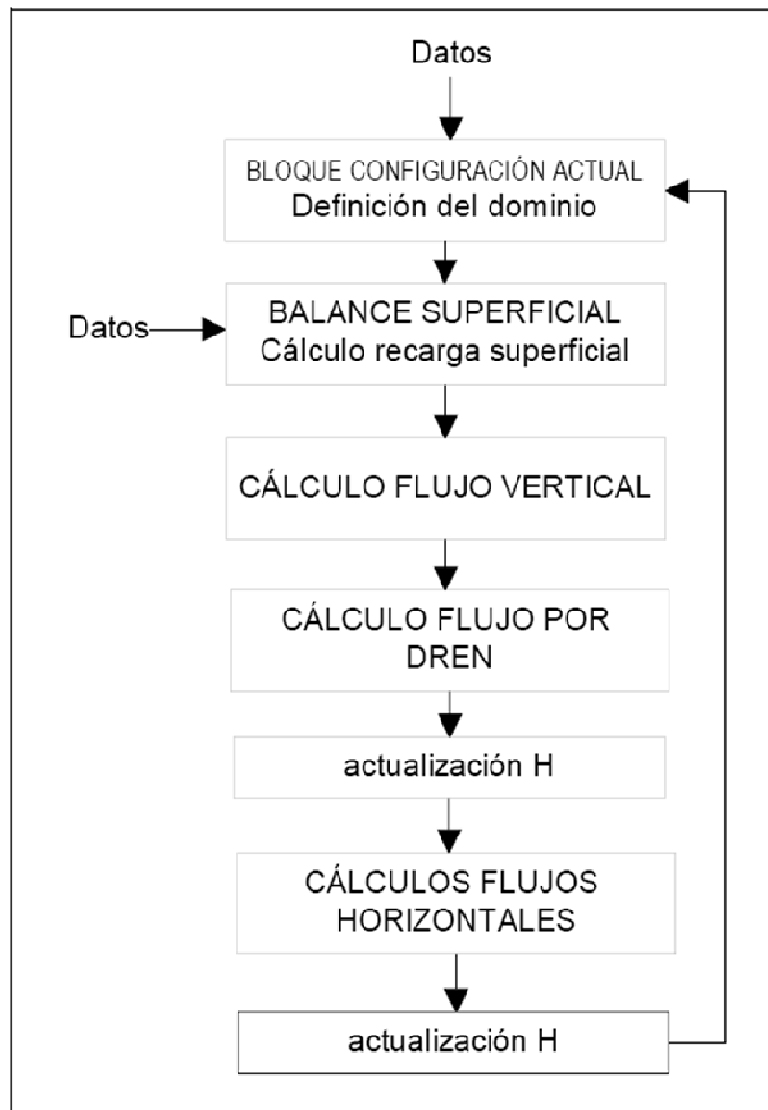


Figura 9. Algoritmo del flujo en el interior del vertedero para MODUELO 2
Fuente: Lobo (2003).

Modelo de flujo vertical: en Lobo (2003), para la estimación del flujo vertical, se parte de la hipótesis de que este flujo se presenta siempre en condiciones saturadas. Que durante su recorrido, el flujo se va encontrar con capas con bajas permeabilidades; sin embargo, en el interior del vertedero se presentan canales preferenciales en el residuo que aumentan la velocidad de paso del agua a través de él.

Para este flujo se plantean dos casos: flujo hacia celda con cobertura, y flujo hacia celda sin cobertura. Si la celda no tiene cobertura, la permeabilidad condicionante será la de la celda superior. Si tiene cobertura, será la permeabilidad de la misma, varios órdenes de magnitud menor que la del residuo.

En el caso de Flujo hacia celda con cobertura, se introduce la ecuación de Darcy en la ley de conservación de la masa de agua en la celda ijk (Lobo, 2003):

$$n_e \frac{d \bar{H}_{ijk}}{dt} A_h = - K_v^c \frac{\bar{H}_{ijk} + e_c}{e_c} A_h \quad (2.52)$$

El término de la izquierda representa la variación del contenido de humedad, a lo largo del tiempo, que es igual a la velocidad con que se transmite hacia abajo (término a la derecha de la igualdad).

Donde:

n_e : “porosidad drenable” del material de la capa, volumen de huecos disponibles para el movimiento del agua por unidad de volumen.

$$n_e = \omega_{SAT} - \omega_{CC}$$

\bar{H}_{ijk} : “espesor saturado” o “altura de humedad libre” (espesor de material cuyos poros están llenos de agua) sobre el plano inferior de la celda ijk .

ω : humedad de la celda.

$$\bar{H}_{ijk} = \frac{\omega - \omega_{CC}}{\omega_{SAT} - \omega_{CC}} H_{CELDA}$$

H_{CELDA} : altura de la celda considerada [L]

A_h : área en planta de la celda [L²]

K_v^c : permeabilidad de la cobertura de la celda inferior a la celda ijk [L.T⁻¹]

e_c : espesor de la cobertura de la celda inferior [L]

Al integrar en Lobo (2003), la ecuación (2.52), en cada paso de tiempo Δt , se obtiene la ecuación (2.53). Se presenta la expresión para estimar el volumen transportado V_{vijk} y las limitaciones por las condiciones de humedad mínima de la celda, igual a su capacidad de campo y humedad máxima, igual a su humedad de saturación.

$$\bar{H}_{ijk}(t + \Delta t) = \left(\bar{H}_{ijk}(t) + e_c \right) \exp \left[- \frac{K_v^c \Delta t}{e_c n_e} \right] - e_c \quad (2.53)$$

$$V_{vijk} = \frac{\overline{H}_{ijk}(t) - \overline{H}_{ijk}(t + \Delta t)}{\Delta t} A_n n_e \quad (2.54)$$

$$\overline{H}_{ijk}(t + \Delta t) \geq 0 \quad (2.55)$$

$$\overline{H}_{ijk}(t + \Delta t) - \overline{H}_{ijk}(t) \leq H_{CELD Aijk-1} - \overline{H}_{ijk-1}(t) \quad (2.56)$$

En el caso de Flujo hacia celda sin cobertura, la ecuación 2.52 sufre transformaciones; sin embargo, las condiciones limitantes de alturas de humedad del caso anterior se conservan (Lobo, 2003):

$$n_e \frac{d \overline{H}_{ijk}}{dt} = -K_v \quad (2.57)$$

$$\overline{H}_{ijk}(t + \Delta t) = \overline{H}_{ijk}(t) - \frac{K_v}{n_e} \Delta t \quad (2.58)$$

$$V_{vijk} = \frac{K_v}{n_e} \Delta t \quad (2.59)$$

K_v : permeabilidad vertical del material de la celda ijk [$L \cdot T^{-1}$]

Estas ecuaciones se aplican en todas las celdas interiores del vertedero. En cada paso de tiempo, los cálculos se realizan de manera consecutiva, desde las capas inferiores hasta las superiores, actualizando sucesivamente las alturas de humedad transmisible (o “espesores saturados”) y obteniendo los V_{vijk} (Lobo, 2003).

Modelo de flujo hacia el dren: para definir el modelo de este tipo de flujo, en Lobo (2003), primero se estable la condición de que el dren está localizado sobre una superficie impermeable o de permeabilidad mucho menor que la capa considerada. Para esto, se definió un esquema para representar el flujo hacia el dren.

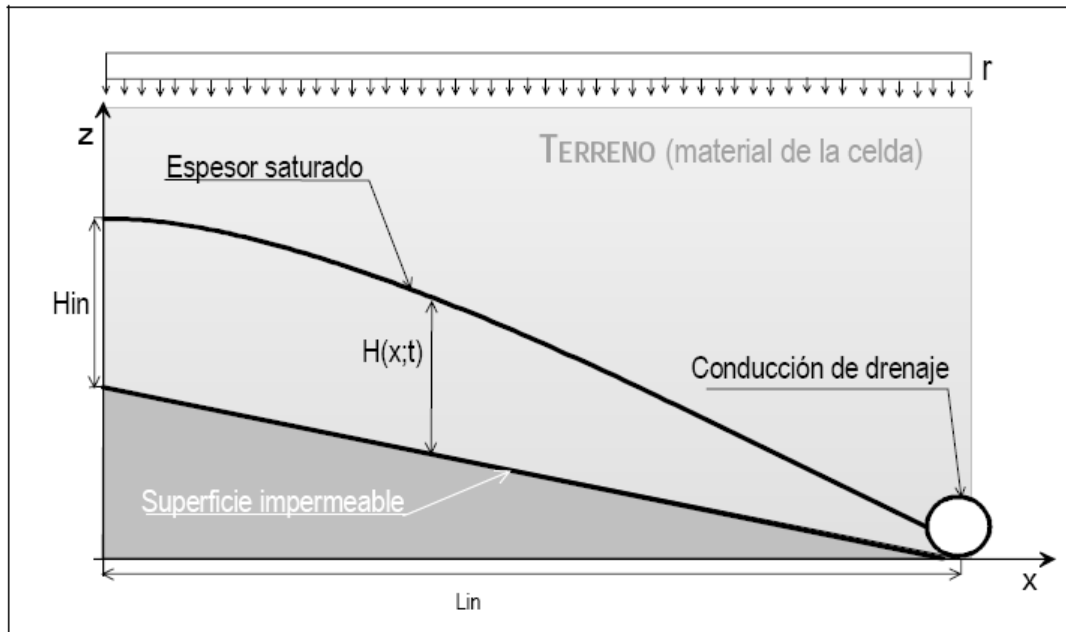


Figura 10. Esquema de definición del modelo de flujo al dren
Fuente: Lobo (2003).

En la Figura 2.10 se esquematiza la distribución de la altura de material saturado a lo largo del eje x, horizontal y normal a la dirección del dren, bajo una recarga de agua $r [L \cdot T^{-1}]$. En MODUELO 2, para estimar el caudal del flujo que es evacuado por el dren, se considera que existe una igualdad entre este caudal y el caudal de la recarga, y se aplica en un espesor dx la ley de continuidad y de Darcy bajo la hipótesis de Dupuit (las superficies equipotenciales son verticales, $h = h(x)$ y no $h(x,z)$), obteniendo así:

$$r dx = \cos \alpha K \frac{\partial}{\partial x} \left(H(x;t) \left(-\frac{\partial H(x;t)}{\partial x} + \tan \alpha \right) \right) dx \quad (2.60)$$

Esta ecuación se integra para obtener la Ecuación 2.61:

$$q_D [L^2 T^{-1}] = r L_{in} = \cos \alpha K \left(H(x;t) \left(-\frac{\partial H(x;t)}{\partial x} + \tan \alpha \right) \right) \Big|_0^{Lin} \quad (2.61)$$

Donde:

q_D : caudal evacuado por unidad de longitud del dren, $[L^3 \cdot T^{-1}]$

r: velocidad de recarga, [L·T⁻¹].

α: ángulo del plano de drenaje con el horizontal, hacia el dren

K: permeabilidad del material saturado, [L·T⁻¹]

H: altura saturada, [L]

L_{in}: longitud de influencia (distancia a los puntos más alejados que drenan hacia el conducto considerado, medida en un plano transversal al mismo).

Aceptando flujo libre en el dren (x=L_{in}) se tiene que el término a la derecha de la igualdad es nulo en ese punto. En el otro extremo de la longitud de influencia (x=0) la altura libre es \bar{H}_{in} y el gradiente puede aproximarse como $\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{\bar{H}_{in}}{L_{in}}$ (variación lineal entre el punto más alejado y el dren) (Lobo, 2003). Obteniendo:

$$q_D = \bar{H}_{in} K \left[\cos \alpha \frac{\bar{H}_{in}}{L_{in}} + \text{sen} \alpha \right] \quad (2.62)$$

El modelo tiene en cuenta la forma en que se encuentra el sistema de drenaje en el vertedero: tipo de conducción (tubo o zanja), área equivalente de conducción, inclinación de la misma, ángulo de drenaje o del terreno hacia el dren, dirección del dren, respecto al eje x y longitud de influencia.

Modelo de flujo horizontal: el modelo de flujo horizontal pretende obtener, en cada paso de tiempo, el volumen de agua transmitido de unas celdas a otras dentro de una misma capa (Lobo, 2003).

Para plantear este modelo, Lobo (2003) analiza en primer lugar el transporte en una dimensión. En la Figura 11 se representa la curva de espesor de saturación o de altura de agua libre H(l), en el terreno, a lo largo de l, dirección del flujo sobre la superficie inferior.

Según el esquema, puede aplicarse el principio de conservación de la masa de agua, en un volumen de control del terreno, de anchura unidad y espesor dx. En este elemento se cumplirá que la variación del volumen de agua almacenada, correspondiente todo a agua libre, es debida al balance entre el caudal entrante Q_{l-dl/2} y el saliente Q_{l+dl/2}.

Tomando una anchura de unidad perpendicular al plano del dibujo, el volumen de agua en el elemento de control es ne.H(l).dl. Si se supone que es aplicable la ley de Darcy, los

caudales son proporcionales al producto entre el gradiente de la carga hidráulica $h(l)$ y la sección transversal al flujo (en este caso $H(l).1$).

Planteando la continuidad en términos de H y h , se llega a las siguientes ecuaciones:

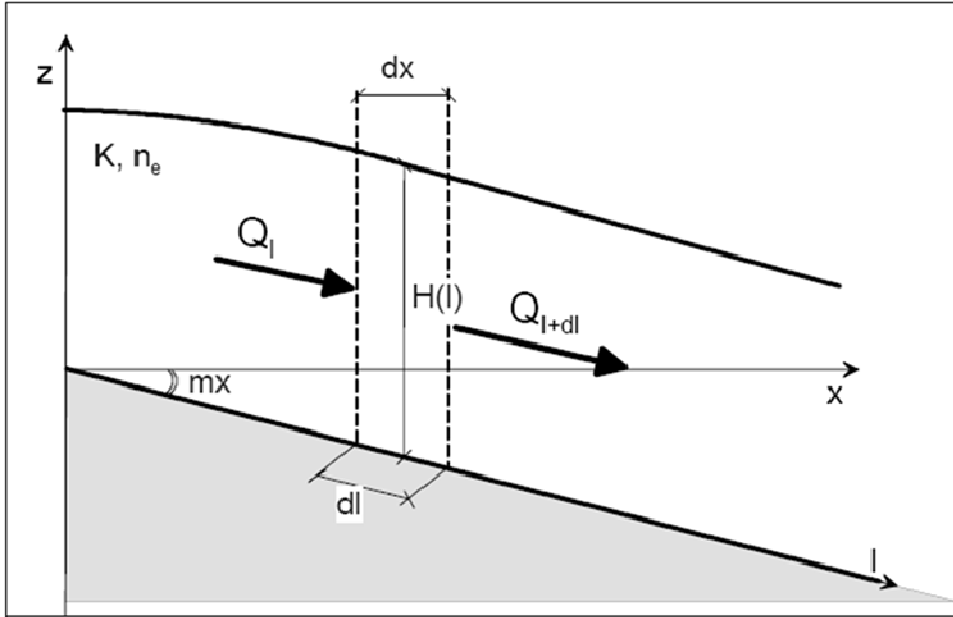


Figura 11. Esquema del flujo de humedad en una dirección
Fuente: Lobo (2003).

$$Q_{l-dl/2} = -K.H(l) \frac{\partial h(l)}{\partial l} - \frac{\partial}{\partial l} \left(KH(l) \frac{\partial h(l)}{\partial l} \right) \left(-\frac{dl}{2} \right) \quad (2.63)$$

$$Q_{l+dl/2} = -K.H(l) \frac{\partial h(l)}{\partial l} - \frac{\partial}{\partial l} \left(KH(l) \frac{\partial h(l)}{\partial l} \right) \left(\frac{dl}{2} \right) \quad (2.64)$$

$$n_e = \frac{\partial H(l)}{\partial t} dl = Q_{l-dl/2} - Q_{l+dl/2} = \frac{\partial}{\partial l} \left(K.H(l) \frac{\partial h(l)}{\partial l} \right) dl \quad (2.65)$$

K : permeabilidad del material saturado [$L.T^{-1}$]

$H(l)$: espesor saturado en l [L]

$h(l)$: altura piezométrica en l [L]

l: dirección del flujo, supuesto paralelo al plano inferior que define la superficie impermeable.

Por definición la altura piezométrica es:

$$h(l) = H(l) + z(l) = H(l) - l \operatorname{sen}(mx) \quad (2.66)$$

mx : proyección del ángulo que forma el plano inferior con el horizontal en el plano xz

Módulo de biodegradación de residuos: en MODUELO 2 este módulo conserva el concepto original planteado en MODUELO 1, el cual calcula a partir de la humedad en cada celda, la materia orgánica que permanece como parte del residuo, el volumen de biogás generado, desglosado en CH_4 y CO_2 , y la materia orgánica disuelta en el lixiviado, expresada como contenido en C, H, N, O y S, en forma de materia biodegradable y no biodegradable, y NH_3 procedente de la degradación del nitrógeno orgánico, y los parámetros DBO y DQO (Lobo, 2002).

Para el caso de MODUELO 2, el módulo de biodegradación se concentra en los procesos que afectan los compuestos orgánicos de los residuos, de los cuales una parte es hidrolizable y otra lentamente hidrolizable (MS_{rhb} y MS_{lhb}), ambas se caracterizan por su “fórmula química” ($\text{C}_{\text{rhb}}\text{H}_{\text{rhb}}\text{O}_{\text{rhb}}\text{N}_{\text{rhb}}\text{S}_{\text{rhb}}$ y $\text{C}_{\text{lhb}}\text{H}_{\text{lhb}}\text{O}_{\text{lhb}}\text{N}_{\text{lhb}}\text{S}_{\text{lhb}}$).

Para el caso de la producción de metano, si se conoce la masa de cada componente de los residuos que llegan al vertedero, a partir de estudios de laboratorio se puede determinar el Potencial Bioquímico de Metano (PBM), en los que se obtiene la cantidad de metano a que puede dar lugar el residuo; sin embargo, MODUELO 2 dispone también de las constituciones químicas representativas de cada componente, ya recogidas en MODUELO 1 (presentados en la Tabla 1) (Lobo, 2002).

En Lobo (2003), este modulo incorpora un parámetro denominado “ f_{bio} ”, el cual obedece a la relación entre el PBM observado (experimental) y PBM teórico, de cada componente ($\text{PBM}_o/\text{PBM}_t$). Éste factor define la cantidad de masa biodegradable o gasificable de los residuos que llegan al vertedero. Al estimar “ f_{bio} ” para la materia biodegradable, se puede conocer el factor complementario para la no biodegradable como: $1-f_{\text{bio}}$. El modelo, además, incluye una fracción que no es biodegradable por los microorganismos y es arrastrada por el agua en su percolación, denominándola como “compuestos húmicos” o DQO “refractaria” o “ f_{ar} ” “fracción de arrastre”; de esta forma, la materia orgánica inerte que irá pasando al lixiviado, acompañando a la sustancia rápidamente hidrolizada y a la hidrolizada lentamente, serán, respectivamente: $f_{\text{ar}}.\text{MS}_{\text{rhb}}$ y $f_{\text{ar}}.\text{MS}_{\text{lhb}}$. Otro factor que se

incluye es el “ f_{ac} ”, “fracción degradable accesible”, aplicado a la masa degradable en condiciones ideales, y expresa la parte de la misma que será realmente hidrolizada en las condiciones específicas del vertedero. La Figura 12 muestra la estructura de un compuesto, con relación a su masa biodegradable y no biodegradable, teniendo en cuenta los parámetros mencionados anteriormente.

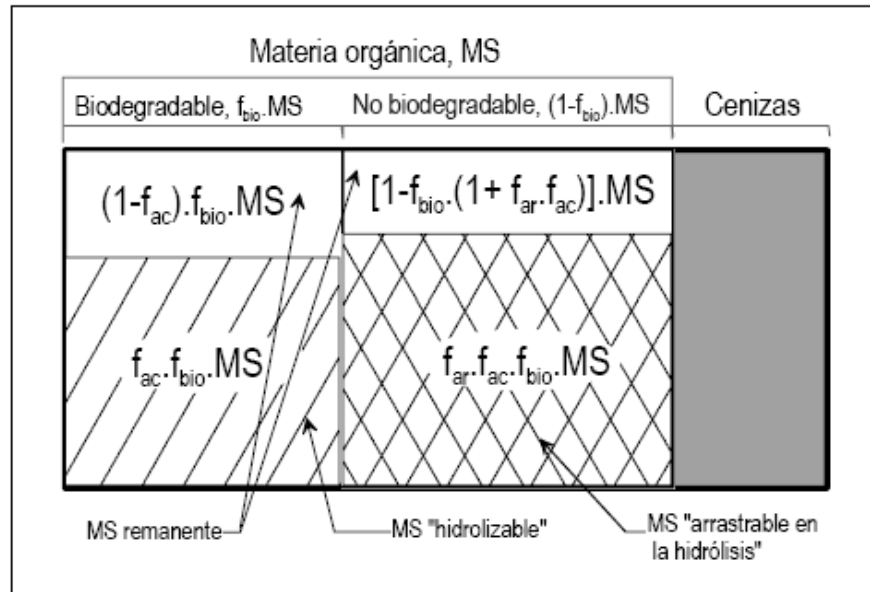


Figura 12. Descomposición de un componente del residuo
Fuente: Lobo (2003)

En el módulo de biodegradación, se profundiza sobre los procesos de degradación de los residuos, mediante el análisis de los componentes bioquímico, cinético y numérico de su descomposición, de forma tal que sean modelados por el programa MODUELO 2.

Bioquímica: MODUELO 2 considera dos etapas principales para la parte bioquímica, “hidrólisis” y “gasificación”, incorporando, una etapa intermedia que podría equivaler a la “acetogénesis” y un modelo de producción de gases CO_2 y H_2 , adicionales a la generación de CH_4 .

La “hidrólisis” representa el paso de la materia sólida al lixiviado por degradación biológica de los compuestos orgánicos o por acciones de “arrastre” químico o físico. Se distinguen dos reacciones, según el tipo de materia que sufra el proceso: biodegradable o no biodegradable. Este proceso da lugar a compuestos como el ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno, amonio y ácido sulfhídrico, consecuencia de la degradación de la materia nitrogenada y el azufre (Lobo 2003).

En esta etapa, para dotar de mayor generalidad al programa, y considerando que las vías de degradación varían entre unos vertederos y otros, las proporciones estequiométricas

en que van apareciendo los distintos productos de descomposición son parámetros a confirmar en cada caso, en función del tipo de compuestos en degradación y las condiciones ambientales (Lobo 2003). Además, se incluye el parámetro “ f_{AC} ”, el cual se refiere a la fracción de carbono que se convierte en acetato en las etapas de hidrólisis y fermentación, el “ f_{CHO} ”, que es la fracción de carbono convertido en compuestos intermedios, y “ $1 - f_{AC} - f_{CHO}$ ”, correspondiente a la proporción de materia orgánica que genera CO_2 en esta etapa. Los porcentajes de producción de estos compuestos fueron presentados anteriormente en el numeral 2.2.4. En la etapa de acetogénesis, se considera la transformación de los “productos intermedios” en acetato, dióxido de carbono e hidrógeno, denominados denominados “ f_{AC} ”. La etapa final denominada gasificación considera la materia orgánica transformada en biogás, mediante la utilización del acetato y la reducción de CO_2 con H_2 .

Cinética: todas las reacciones que se consideran en MODUELO 2 para cada una de las fases de biodegradación del residuo, se desarrollan según cinéticas de primer orden respecto a la masa de sustancia a degradar.

En la hidrólisis de la materia orgánica rápida y lentamente biodegradable (hidrolizable) se consideran las siguientes expresiones para la cinética de las reacciones:

$$\frac{dMS_{rnb}}{dt} = -k_h MS_{rnb} \quad (2.67)$$

$$\frac{dMS_{lnb}}{dt} = -k_{h1} MS_{lnb} \quad (2.68)$$

$$\frac{dMS_{rnb}}{dt} = -f_{ar} \frac{dMS_{rnb}}{dt} = -f_{ar} K_h MS_{rnb} \quad (2.69)$$

$$\frac{dMS_{lnb}}{dt} = -f_{ar} \frac{dMS_{lnb}}{dt} = -f_{ar} K_{h1} MS_{lnb} \quad (2.70)$$

Donde:

MS_{rnb} y MS_{lnb} : materia sólida biodegradable, rápidamente hidrolizable y lentamente hidrolizable respectivamente.

k_h y k_{h1} : respectivas tasas de hidrólisis (d^{-1})

MS_{rhnb} : materia sólida orgánica no biodegradable de los componentes rápidamente hidrolizables

MS_{lhnb} : materia sólida orgánica no biodegradable de los componentes lentamente hidrolizables

f_{ar} : coeficiente de arrastre de materia inerte en la hidrólisis

Numérica: para la resolución numérica en MODUELO 2, se adopta directamente el esquema general de MODUELO 1, en las ecuaciones que se plantean para la hidrólisis, acetógenesis y gasificación. Se toma un paso de tiempo diario en los cálculos de biodegradación, frente al horario del módulo hidrológico.

En esta parte se toman las condiciones iniciales de humedad como representativas del paso de tiempo correspondiente, pero ya no se puede aceptar la misma hipótesis para las sustancias disueltas, porque aparecen especies gaseosas cuyo equilibrio interfacial se da muy rápidamente. Esta dinámica interfacial se ha resuelto suponiendo que el equilibrio entre concentraciones de cada sustancia en las distintas fases (descrito por la ley de Henry) se establece inmediatamente al final de cada paso de tiempo del modelo de biodegradación (Lobo, 2003).

Resultados del modelo: Como resultado, el modelo obtiene la carga de cada contaminante (toneladas/día) presente en el lixiviado recogido (todos los elementos de la materia no biodegradable arrastrada, el carbono, hidrógeno y oxígeno que forman compuestos orgánicos distintos del acetato, es decir, C_{CHO} , H_{CHO} y O_{CHO} , acetato ó “AC”, amonio, NH_4^+ , ácido sulfhídrico, SH_2 , y gases disueltos), su concentración diaria de DBO y DQO y los volúmenes de cada gas emitido (Lobo, 2003). MODUELO 2 profundiza sobre el equilibrio y producción de gases y equilibrio carbónico; sin embargo, por los alcances de este trabajo, es de mayor importancia el módulo hidrológico y la unidad de composición de lixiviados que hace parte del módulo de degradación del residuo.

2.3.4 Análisis de los modelos HELP, BASE y MODUELO 2

De acuerdo con los alcances de este trabajo, en especial la revisión de modelos desarrollados para estimar la producción de lixiviados en un relleno sanitario, en los numerales anteriores se presentó una descripción general de los modelos hidrológicos, de biodegradación e integrados (hidrológicos y biodegradación) que se han desarrollado para ser aplicados en el diseño, operación, clausura y monitoreo de los vertederos. Como fue visto anteriormente, numerosos trabajos con aportes muy importantes en este campo de la ingeniería se han desarrollado hasta la fecha, todos con un fin en común, desarrollar

herramientas y obtener datos cercanos a la realidad que permitan seleccionar e implementar alternativas viables para controlar los efectos adversos sobre el medio ambiente generados por la puesta en marcha de los rellenos sanitarios; sin embargo, por su gran aplicación, facilidad de uso y alcances de su modelamiento, los modelos que fueron de interés para este trabajo son: el HELP y MODUELO 2; sin embargo, para este último modelo, aunque se profundizó en sus planteamientos y métodos de simulación, se tuvieron limitaciones con relación a la cantidad y disponibilidad de información requerida por el mismo, lo cual impidió la aplicación de este modelo en éste trabajo de investigación.

Entre los modelos hidrológicos explicados anteriormente, el de mayor aplicación y reconocimiento a nivel mundial es el HELP (EPA, 1984), el cual, por su gran acogida en la evaluación ambiental de los vertederos, ha presentado varias modificaciones o mejoras en sus diferentes versiones. Este modelo, en la normatividad ambiental de algunos países, en cuanto a los vertederos, se ha convertido en un requisito para la evaluación de este tipo de obras sanitarias.

De otra parte, el método BASE desarrollado en la UNAM (2000), aunque no presenta un uso tan universal como el HELP, es una propuesta relativamente nueva, con una aplicabilidad muy sencilla, lo que atrae su uso, pero, presenta requerimientos muy puntuales como el seguimiento de la operación del vertedero en tiempo diario, información que puede resultar poco precisa en el caso de algunos rellenos sanitarios a nivel de Colombia, que manejan la información de operación del relleno en forma global, por ejemplo, cantidades promedios diarias de residuos vertidos en el relleno, ó áreas promedio de celda, sin dejar pasar por alto, los casos en que muchos rellenos no son operados mediante conformaciones de celdas unitarias, si no mediante capas o conformaciones de taludes con los residuos que llegan diariamente al relleno.

Una propuesta que de forma integral incluye la estimación de caudales de lixiviados mediante un balance hídrico y la producción de gases por la biodegradación de los residuos, es el modelo desarrollado en la Universidad de Cantabria, MODUELO (Lobo, 2002, 2003), el cual presenta 2 versiones. Por su completo enfoque sobre los procesos físicos, químicos y biológicos que se generan en las diferentes etapas del vertedero, este modelo representa un gran aporte a la investigación de los rellenos sanitarios y sus efectos ambientales. Cabe resaltar que para el desarrollo de este modelo, Lobo (2003), realizó una exhaustiva revisión del estado del arte sobre los distintos modelos y estudios que se han realizado sobre este tema, obteniendo de estas forma, los mejores métodos técnicamente demostrados y empleados por diversos autores para obtener los parámetros necesarios en la estimación de la cantidad y contenido de los lixiviados, al igual que para la producción de gases en las distintas etapas del vertedero.

Después de realizar las corridas de los modelos HELP, fue posible comparar las bondades y limitaciones de este modelo. Los resultados que permiten analizar estos modelos se presentan en el capítulo 4 de éste trabajo.

3. DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO

El lugar de estudio, para el caso de aplicación del presente trabajo de investigación, corresponde al Centro Industrial del Sur (CIS), en el cual se encuentra localizado el relleno sanitario denominado El Guacal, de donde se obtuvo, la información concerniente a las condiciones climáticas y aspectos relacionados con la operación del mismo.

Los aspectos generales de este sitio fueron extraídos de los informes presentados como estudios preliminares para los diseños, construcción y puesta en marcha del relleno sanitario El Guacal. Estos estudios fueron realizados en el año 2004, a través de una consultoría contratada por la Empresa EVAS Enviambientales S.A., la cual es la encargada del funcionamiento del proyecto Centro Industrial del Sur (CIS) – El Guacal.

3.1 LOCALIZACIÓN DEL RELLENO SANITARIO EL GUACAL

El relleno sanitario del CIS El Guacal se localiza en la vereda La Chorrera del municipio de Heliconia - Antioquia, sobre las cuencas altas de las quebradas Los Morros y Quebraditas, por el costado occidental, y los Vallados y quebrada Grande, por el costado oriental; en las coordenadas 1178014.528 N, 819975.054 E del IGAC, y a una elevación media de 2670 msnm. En general el terreno de localización de este relleno hace parte de la vertiente occidental del río Aburrá y la vertiente oriental del río Cauca (Cortés, 2004).

Las aguas de escorrentía de los drenajes de la zona de localización del CIS El Guacal, corren hacia la Quebrada Los Morros, la cual drena hacia el río Cauca Aburrá (Cortés, 2004).

Este relleno es de propiedad de EVAS ENVIAMBIENTALES S.A E.S.P., y hace parte de un área de 1,600 ha, de las cuales 72 ha fueron destinadas para el relleno sanitario y su ampliación. Se accede al sitio mediante la utilización de la vía Medellín – Itagüí – San Antonio de Prado – Vereda Yarumalito, y de allí por vías secundarias, desarrolladas principalmente para la explotación de madera, con un recorrido de aproximadamente 22 km del municipio de Itagüí al Sur del Valle de Aburrá (Cortés, 2004).

En la Figura 13, se presenta la localización general del relleno sanitario El Guacal en el municipio de Heliconia (Antioquia).

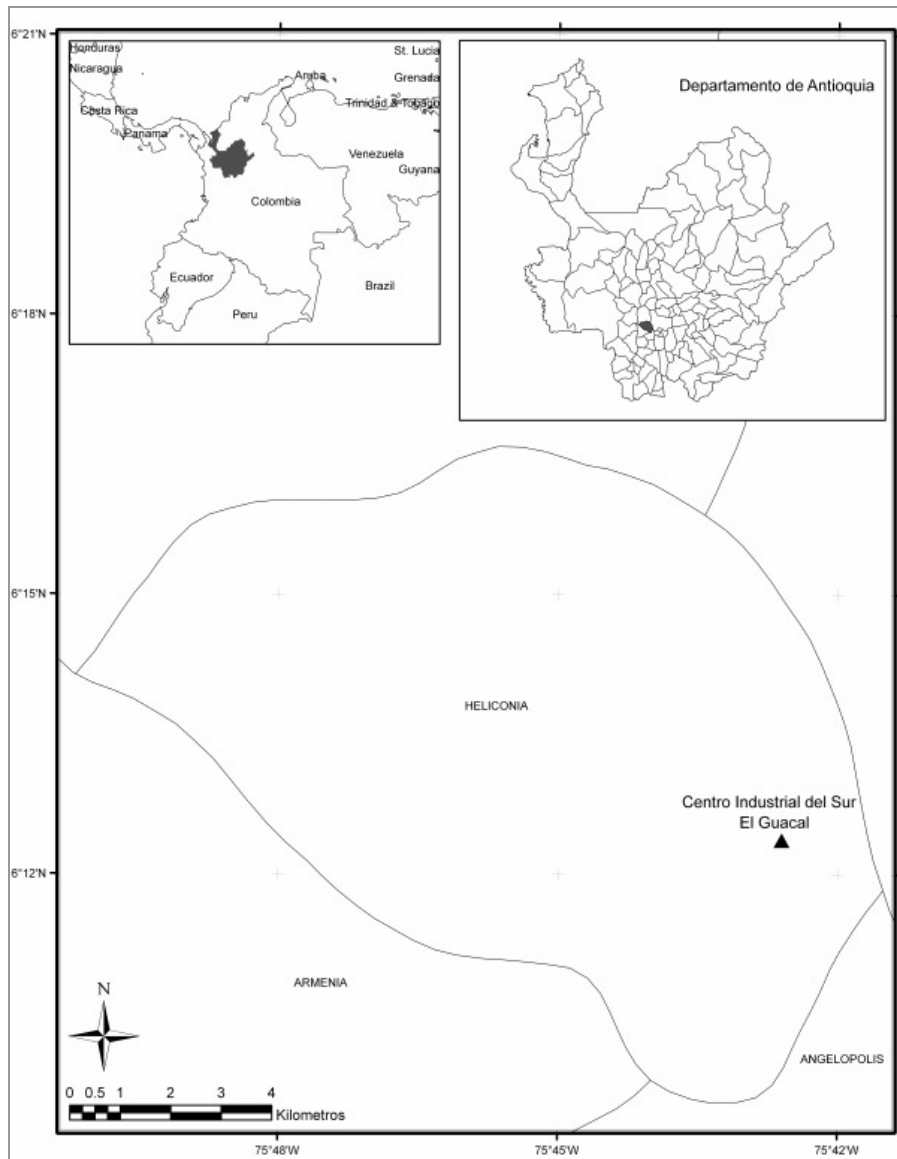


Figura 13. Localización del Centro Industrial del Sur CIS – El Guacal

El proyecto del CIS El Guacal, desde sus estudios está planteado como un relleno sanitario, en el cual operarán tres vasos para la disposición final de los residuos sólidos, vaso norte (en actual operación), vaso centro y vaso sur.

Para efectos del análisis hidrológico de la zona de localización del CIS El Guacal, en los estudios de Cortés (2004) se delimitaron, tres subcuencas correspondientes a cada uno de los vasos proyectados. En la Figura 14, se presenta la demarcación de las zonas de cada vaso del relleno sanitario El Guacal. Las subcuencas fueron denominadas D1, D2 y D3, respectivamente (Cortés, 2004).

3.2 ASPECTOS CLIMÁTICOS DEL SITIO DE ESTUDIO

Vale aclarar que para mayor precisión, en cuanto a una caracterización de este tipo, es mejor utilizar datos de la estación meteorológica que se encuentra instalada exactamente en el sitio del relleno sanitario; sin embargo, para el caso de este relleno sanitario, la estación meteorológica instalada no presentaba un registro continuo de datos que permitan caracterizar las condiciones climáticas del sitio de ubicación del relleno sanitario. De otra parte, en el relleno sanitario se toman datos de lluvia con un pluviómetro instalado cerca al vaso donde se realiza la disposición de los residuos; sin embargo solo se tienen registros para los años de operación del relleno (2006, 2007 y 2008), por lo cual, para efectos de caracterización de las variables climáticas, es mejor utilizar series de registros mas largas de estaciones cercanas al relleno sanitario.

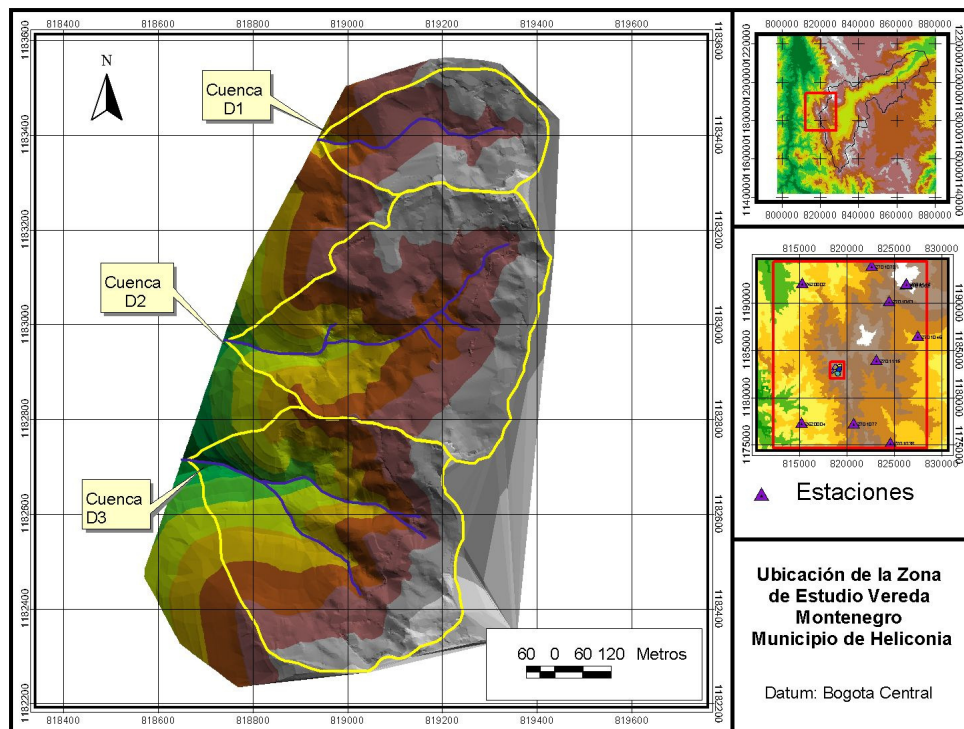


Figura 14. Delimitación de las subcuencas de los vasos del relleno sanitario El Guacal
Fuente: Cortés (2004).

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, los aspectos climáticos del sitio de localización del relleno sanitario que se presentan a continuación, son extraídos de los estudios previos para la construcción y operación del relleno sanitario El Guacal ejecutados por Cortés (2004), y de los estudios realizados por la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín (UNAL, 2006) para la cuenca Doña María, en la cual se encuentran localizadas tres estaciones cercanas al relleno sanitario El Guacal.

3.2.1 Precipitación

Para la información climática, no se contaba con una serie de datos completa de la estación localizada en el sitio del relleno sanitario. De acuerdo con lo anterior, se decidió seleccionar aquellas estaciones que permitieran a través de su información disponible, observar la variabilidad temporal de la precipitación en la zona de estudio. Dicha información, está compuesta de estaciones de precipitación de propiedad de las Empresas Públicas de Medellín - EPM y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia – IDEAM.

En la Tabla 6 se presentan las estaciones cercanas al relleno sanitario El Guacal con relación a las coordenadas y cota del mismo.

Tabla 6. Estaciones de precipitación cercanas al relleno sanitario El Guacal

CÓDIGO	TIPO	NOMBRE	MUNICIPIO	NORTE	ESTE	COTA	PERIODO	AÑOS
2701038	PG	San Antonio de Prado	Medellín	1175253	824640	2000	1950-2004	55
2701077	PG	El Chuscal	Heliconia	1177708	820518	2100	1971-2004	34
2701111	PG	Astilleros	Medellín	1183957	823092	2450	1991-2004	14
2701115	PG	Astillero	Medellín	1183957	823092	2450	1991-2004	14
Centro Industrial del Sur - El Guacal				1182880	819045	2670		

De acuerdo con la localización de las estaciones y la del relleno sanitario El Guacal, las estaciones más cercanas son la de Astillero y Astilleros, las cuales se encuentran localizadas en el mismo lugar y son operadas una por la Empresas Públicas de Medellín - EPM y otra por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia – IDEAM respectivamente.

Teniendo en cuenta el número de años de registro de las estaciones cercanas al relleno sanitario El Guacal, se presenta en la Tabla 7 los valores de la precipitación media anual en estas estaciones; y en la Figura 15, se representa la distribución temporal de la precipitación para la zona de localización de este relleno.

Con relación al número de años de registro, el estudio de UNAL (2006) facilitó una base de datos desde el año en que iniciaron a funcionar las estaciones hasta el año 2004, año en el cual se comenzaron a elaborar estos estudios; sin embargo para efectos de este trabajo se requería de registros hasta el año 2008, pero teniendo en cuenta que el trabajo de investigación no contaba con apoyo económico para la compra de datos, se utilizó la información de la UNAL para efectos de caracterización de la precipitación en la zona de estudio.

Tabla 7. Precipitación media anual en las estaciones cercanas al relleno sanitario El Guacal

CODIGO	NOMBRE	PRECIPITACIÓN MEDIA (mm/año)
2701038	San Antonio de Prado	2031
2701077	El Chuscal	2731
2701115	Astilleros	2145
2701111	Astillerero	2064

Fuente: UNAL (2006).

La Tabla 7 permite observar, que las estaciones Astilleros (2701111) y Astillerero (2701115) las cuales se encuentran localizadas en el mismo lugar, presentan una diferencia de 81 mm/año de precipitación media anual entre estas, sin embargo considerando lo establecido en el estudio realizado por UNAL (2006), se toma esta diferencia como aceptable dada la precisión de los equipos y los métodos de medición implementados.

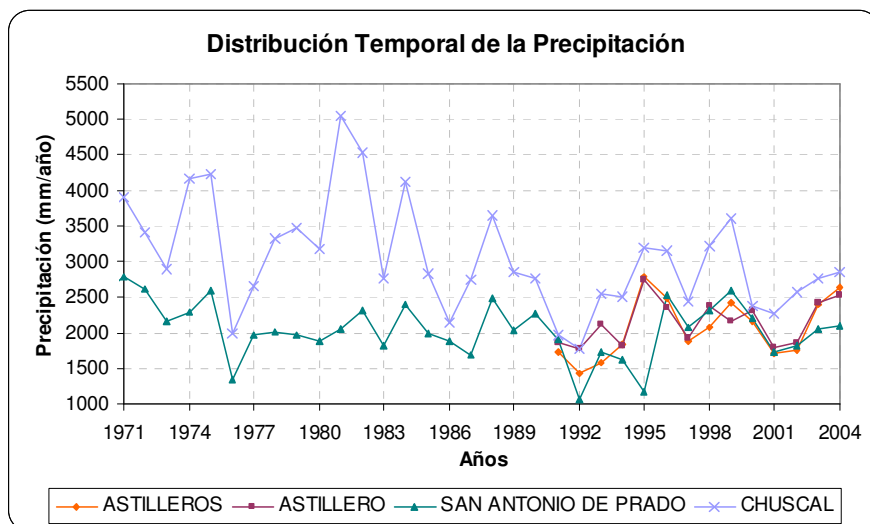


Figura 15. Distribución temporal de la precipitación: estaciones cercanas al CIS – EL Guacal Fuente: UNAL (2006).

De acuerdo con el mapa de la Figura 15, la precipitación promedio multianual para el sitio de localización del relleno sanitario El Guacal corresponde a 2030 mm/año.

En la Figura 16 se presenta el ciclo anual de la precipitación en las diferentes estaciones localizadas de forma cercana a la zona de localización del relleno sanitario objeto del estudio. En esta figura se observa que el ciclo anual de la precipitación es bimodal, es decir, se caracteriza por tener dos épocas de sequía y dos de lluvias altas. Las sequías se presentan: la primera y más intensa, en los meses de diciembre hasta febrero, y la

segunda y menos intensa, en los meses de julio y agosto. La temporada de lluvias altas posee sus dos puntos más altos en los meses de mayo y octubre.

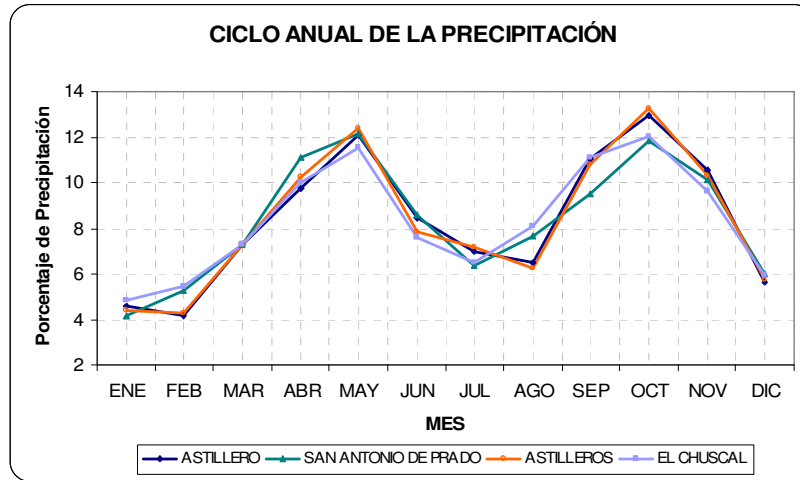


Figura 16. Ciclo anual de la precipitación: estaciones cercanas al CIS – EL Guacal
Fuente: UNAL (2006).

3.2.2 Temperatura

Debido a la información escasa sobre registros de temperatura para el relleno sanitario El Guacal y para la zona de localización del mismo, se tomó como referencia el mapa de variación espacial de la temperatura realizado para los estudios previos del CIS El Guacal.

El mapa de temperatura fue construido por Cortés (2004), mediante la estimación indirecta de esta variable, utilizando la ecuación propuesta por Cenicafé. En esta metodología se regionalizó esta variable con base en la elevación del terreno sobre el nivel del mar.

De acuerdo con la Figura 17, la temperatura promedio anual para el sitio de localización del relleno sanitario en estudio corresponde entre 13°C y 14°C; sin embargo, los pocos registros de temperatura reportados por la estación meteorológica localizada en el vaso norte del relleno sanitario El Guacal, reportan una temperatura media de 12.7°C.

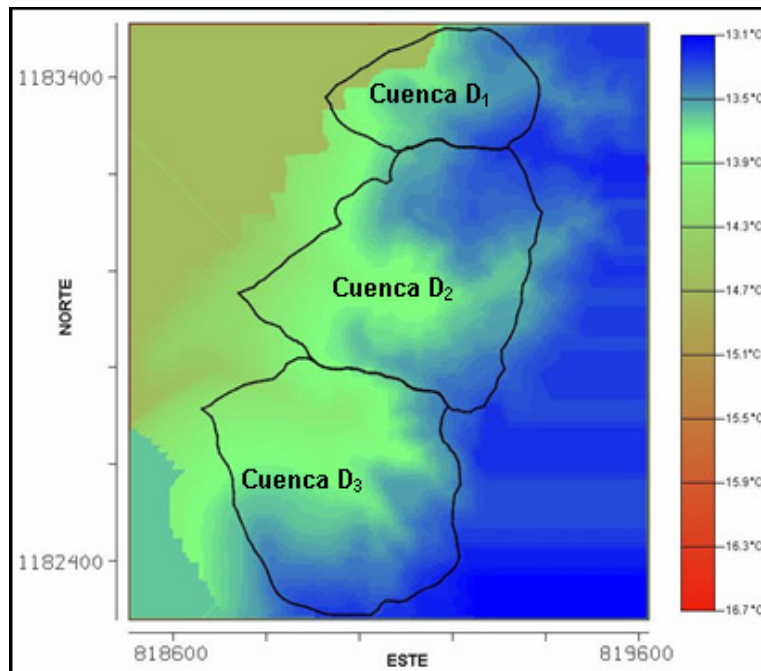


Figura 17. Mapa de la variación espacial de la temperatura para la zona de localización del relleno sanitario El Guacal
Fuente: Cortés (2004)

3.2.3 Evapotranspiración

La evapotranspiración es una de las variables más importantes en el balance hídrico sobre el relleno sanitario. Para el caso en el cual el relleno se encuentra clausurado y con una cobertura vegetal como capa final, la evapotranspiración juega un papel importante en la determinación de las salidas de agua sobre esta capa, ya que representa la cantidad de agua saliente del sistema hacia la atmósfera en forma de vapor de agua, por medio de una combinación de la evaporación física y de la transpiración de la vegetación.

Durante la operación del relleno sanitario, cuando no hay presencia de coberturas vegetales, esta variable, como salida de agua, queda representada como la evaporación del suelo y es calculada diariamente por el modelo de balance hídrico empleado.

Aunque es necesaria la estimación diaria de esta variable teniendo en cuenta cada etapa evolutiva del relleno sanitario (desde la construcción hasta la clausura), es importante tener una caracterización de la zona de localización del relleno sanitario, con relación a la evapotranspiración potencial y real que ocurre en la misma.

De igual forma que para la caracterización de la temperatura, fue necesario utilizar la información presentada en el estudio de Cortés (2004). Para este estudio el mapa de evaporación fue realizado mediante la ecuación de Cenicafé. En la Figura 18, se

presenta el mapa de evaporación media para la zona de localización del relleno sanitario El Guacal.

De acuerdo con la Figura 18, la evaporación media anual para el sitio de localización del relleno sanitario en estudio está entre 872 - 894 mm/año.

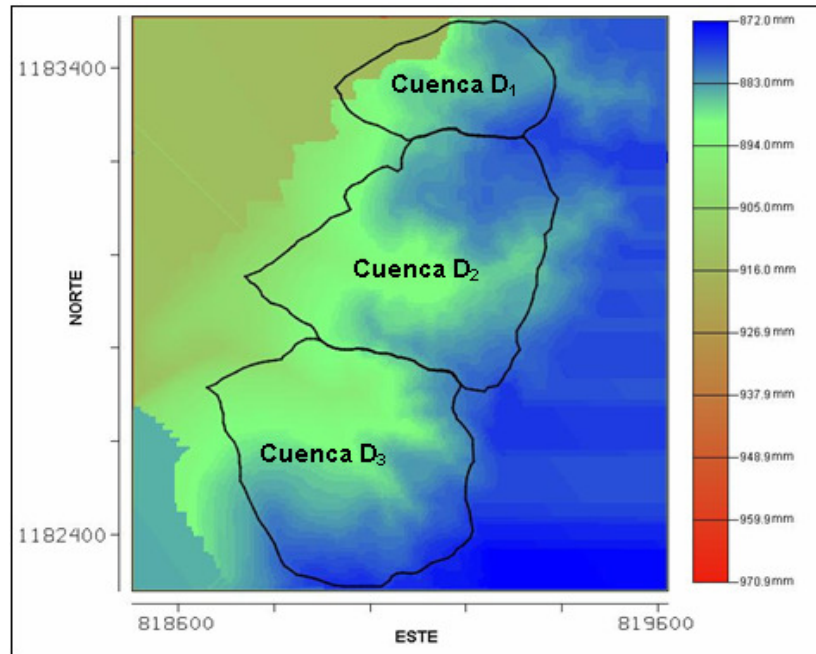


Figura 18. Mapa de evapotranspiración real media para la zona de localización del relleno sanitario El Guacal
Fuente: Cortés (2004)

3.3 ASPECTOS CONSTRUCTIVOS Y DE OPERACIÓN DEL RELLENO SANITARIO EL GUACAL

A continuación, se presentan de forma general los aspectos referentes al diseño, construcción y operación del relleno sanitario El Guacal, los cuales se consideran importantes en la modelación del balance hídrico para la estimación de caudales de lixiviados en este relleno.

3.3.1 Fase constructiva del relleno sanitario El Guacal

La construcción del relleno sanitario El Guacal inicia en el mes de abril del año 2006, con la puesta en marcha de una primera fase del relleno denominada Vaso Norte, cuya construcción y operación estuvo a cargo de la firma asesora ARES AGUA & RESIDUOS Ltda., la cual estaba encargada de la correcta operación y construcción del relleno sanitario, tanto en la parte operativa, técnica, administrativa, ambiental, topográfica, etc.

La adecuación del relleno sanitario inicia con la adecuación de la primera zona para la conformación de celdas de residuos sólidos. Esta actividad consistió en la conformación de 1,320 m² de fondo, donde se realizó la impermeabilización y construcción del sistema de drenaje y recolección de lixiviados (filtros). Este sistema fue conformado por una capa de arena lavada, grava y tuberías perforadas ubicadas en el centro y lados del fondo del relleno. En la Figura 19 se presentan unas fotografías de la parte constructiva del fondo del relleno sanitario.

En orden de distribución, inicialmente se encuentra en el relleno sanitario una línea de geomembrana que se extiende en todo el interior del vaso (fondo y taludes), instalada con el fin de lograr una impermeabilización y protección ambiental con relación a la fuga de lixiviados. Esta línea de geomembrana también hace parte de la impermeabilización del fondo de los filtros recolectores. Las especificaciones técnicas de esta geomembrana corresponden a sus características de elaboración, tal como: geomembrana en HDPE (*High Density Polyethylene*) con un espesor (e) de 1.5 mm y otras especificaciones que se presentan en la Tabla 8

Es importante tener en cuenta que la geomembrana instalada en el fondo del relleno sanitario durante su operación, ha sufrido rupturas aunque estas han sido reparadas; sin embargo, se considera necesario tener en cuenta, para la estimación de caudales de lixiviados, las posibles fugas que se han podido presentar por la ruptura de esta capa.

Simultáneo a la instalación de la línea de geomembrana, se realizaron las excavaciones necesarias para la construcción del sistema de filtros, los cuales se distribuyeron en filtros de fondo para los drenajes verticales (filtros centrales) y filtros perimetrales y de talud para el drenaje lateral; los filtros están construidos en tubería perforada corrugada en diámetros de 20" (filtros de talud) y de 12" (filtros perimetrales y centrales).

Tabla 8. Características técnicas de la capa de geomembrana

PROPIEDADES	UNIDADES DE MEDIDA	VALORES ESPECÍFICOS e = 1.5 mm
Tensión en punto de estiramiento	KN/m	22
Elongación a la ruptura	%	700
Resistencia a la tracción	KN/m	39
Resistencia al rasgado	N	170
Resistencia a la perforación	N	450
Densidad resina	gr/cm ³	0.94
Densidad	g/cc	> 0.94
Fluidez a 190°C con carga de 2.16 Kg	g	< 0.5
Estabilidad dimensional	%	-0.2

Fuente: ARES (2006).



Figura 19. Forma constructiva del fondo del relleno sanitario El Guacal
Fuente: ARES (2006).

Luego de tener el fondo impermeabilizado con geomembrana de HDPE, se construyó una capa de arena con un promedio de espesor de 0.08 m, la cual cumple la función de proteger la geomembrana de cualquier punzamiento ejercido sobre ésta, bien sea con la grava de canto rodado o con el triturado, o con la misma operación técnica. Para terminar con la adecuación del fondo, se coloca una capa de grava de canto rodado de diámetro de 3" a 6", con un espesor entre 0.15 m a 0.18 m, la cual tiene como función servir de filtro total de fondo para la conducción y evacuación de los lixiviados (ARES, 2006). Este proceso constructivo se aprecia en la Figura 19.

3.3.2 Fase operativa: disposición de residuos sólidos

En este sitio, con una capacidad para albergar hasta 800 ton/día de residuos sólidos urbanos, se depositan actualmente los residuos generados en los municipios de

Envigado, Heliconia, Armenia Mantequilla, Ebejico, Salgar, Jericó, Hispania, Santa Barbara, entre otros.

La disposición de residuos sólidos en el relleno sanitario El Guacal inicia con una cantidad igual a 495.73 ton/mes, correspondientes al mes de abril de 2006, fecha en la que inicia la operación del relleno sanitario. A Diciembre de 2008, fecha de corte para este trabajo de investigación, se registra una cantidad de residuos sólidos de 17,087.59 Ton/mes. De acuerdo con los datos anteriores se presenta en la Tabla 9 y Figura 20 la cantidad y el crecimiento de los residuos sólidos dispuestos en el vaso norte del relleno sanitario durante el período establecido para este trabajo de investigación: entre Abril de 2006 y Diciembre de 2008.

Tabla 9. Cantidades de residuos sólidos dispuestas durante la operación del relleno sanitario abril de 2006 – enero de 2008

Residuos sólidos dispuestos en el relleno (ton/mes)			
Mes/Año	2006	2007	2008
Enero		5251,92	12541,37
Febrero		6269,31	13221,38
Marzo		6630	12438,92
Abril	495,73	5792,97	12277,93
Mayo	2728,068	7258,83	13176,90
Junio	3004,6	10037,1	12659,66
Julio	3967,54	11775,64	15673,84
Agosto	4241,71	12296,54	13857,03
Septiembre	4291,86	10143,24	13953,47
Octubre	5015,44	11228,93	13421,69
Noviembre	5047,31	11424,81	18452,00
Diciembre	4640,97	11954,05	17087,59

Fuente de datos: ARES (2006 - 2008).

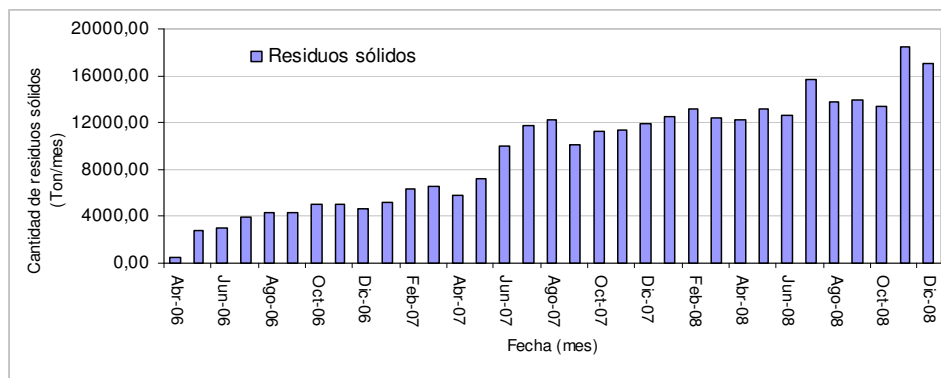


Figura 20. Cantidades de residuos sólidos dispuestas durante la operación del relleno sanitario: abril de 2006 – diciembre de 2008

Fuente de datos: ARES (2006 - 2008).

Los residuos sólidos que llegan al relleno sanitario El Guacal son de origen urbano mezclados, es decir, sin una previa separación en la fuente generadora; sin embargo, cuando se encuentra en funcionamiento la planta recuperadora de residuos sólidos reciclables del CIS El Guacal, gran parte de los residuos sólidos son aprovechados y los que no presentan ningún potencial de reutilización son conformados en fardos para su posterior disposición final. En los casos en que la planta separadora y enfardadora deja de funcionar, los residuos sólidos se vierten directamente por los carros recolectores en el vaso norte de este relleno sanitario. De otra parte, los residuos orgánicos son aprovechados para su transformación y obtención de compostaje.

La composición de los residuos sólidos que llegan al CIS corresponde a la composición típica de los residuos sólidos de origen urbano. Para tener una idea esta composición, en la Tabla 10 se presenta la caracterización de los residuos sólidos del municipio de Envigado. No solo los residuos sólidos de este municipio llegan a este relleno sanitario, sin embargo, se toma esta caracterización como base para este trabajo de investigación.

Tabla 10. Caracterización de los residuos sólidos del municipio de Envigado

Composición	Porcentaje %
Materia orgánica	55.90
Papel	8.20
Cartón	3.50
Plástico	11.30
Vidrio	4.20
Metales	1.50
Tetrapack	0.30
Textiles	3.40
Caucho	0.10
Cuero	0.10
Ordinario	9.10
Peligrosos	0.80
Otros	1.70
	100.00

Caracterización tomada para los residuos sólidos del relleno sanitario El Guacal
Fuente de datos: Área Metropolitana (2006).

En la Tabla 10 se incluyen los residuos peligrosos como parte de la composición de los residuos sólidos del municipio de Envigado, sin embargo, en el vaso norte de este relleno sanitario este tipo de residuos no son recibidos, por el contrario se reciben otro tipo de residuos que no están incluidos en dicha caracterización, tales como: barrido de vías, material vegetal, lodos, arenilla, entre otros.

Con relación a los porcentajes de los tipos de residuos que son depositados en el vaso norte del relleno sanitario El Guacal, en la Figura 21 se representa la proporción de cada residuo de acuerdo a su procedencia. Los porcentajes que se presentan a continuación, se obtienen de promediar las cantidades de residuos sólidos dispuestos según el tipo en cada mes del período analizado para este trabajo.

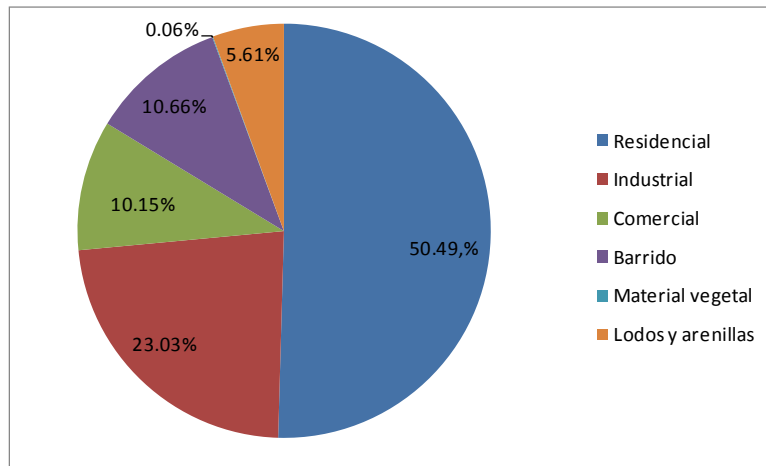


Figura 21. Porcentajes de las cantidades de residuos sólidos dispuestos según el tipo
Fuente de datos: ARES (2006 - 2008).

▪ **Conformación de capas de residuos sólidos**

La operación del relleno sanitario inicia con la conformación de una primera zona de celdas diarias de residuos sólidos urbanos, con dimensiones en general de 12 m x 16 m. La disposición de los residuos sólidos para la conformación de las celdas, es realizada mediante maquinaria especializada para esparcir, nivelar y compactar los residuos dentro del área delimitada para cada celda.

Además de la conformación de las celdas con residuos sólidos esparcidos en el fondo del relleno sanitario, también se inicia la disposición de residuos sólidos en forma de fardos, los cuales son formados previamente en un sistema mecánico de enfardado. Ésta operación se realiza en una planta que tiene la finalidad de separar los residuos recuperables y conformar posteriormente en forma de bloques, los residuos que por su composición deben ser dispuestos finalmente en un relleno sanitario.

La cantidad y medida de los fardos que son dispuestos en el relleno sanitario de acuerdo a las dimensiones y capacidad de cada celda diaria, es de 65 fardos de dimensión de 1.1 m x 2.1 m, y 91 fardos con dimensión de 1.1 m x 1.5 m (ARES, 2006).

Con relación a la cobertura de los residuos sólidos, las celdas durante el inicio de la operación del relleno sanitario eran cubiertas con material de suelo natural extraído del

talud del vaso del relleno. La cobertura corresponde a una capa 0.40 m de limo arcilloso. En otras áreas de las celdas se utilizaba material de cobertura sintético (polietileno).

En la Figura 22 se muestran fotografías de la conformación de las celdas mediante la dispersión de los residuos y mediante la disposición de fardos; además, se presentan las técnicas de cobertura de los residuos sólidos.



Figura 22. Conformación de celdas, disposición de fardos y cobertura de los residuos sólidos
Fuente: ARES (2006).

- **Evolución de la parte operativa y adecuación del relleno sanitario**

Desde que se inicia la operación del relleno sanitario hasta la fecha establecida para este trabajo de investigación (Diciembre de 2008), la firma encargada del relleno sanitario venía adecuando el vaso norte de forma simultánea a la disposición de los residuos sólidos. Por ejemplo, los taludes y fondo del vaso se iban impermeabilizando a medida

que crecían en volumen y área las respectivas celdas del relleno sanitario, de igual forma se ampliaban el sistema de filtros de lixiviados y el sistema de evacuación de gases.

A continuación, se pretende describir de forma muy general pero puntual la evolución del relleno sanitario y la forma operativa y constructiva de este, lo cual es de gran importancia para poder construir el esquema conceptual de la conformación de capas dentro del relleno sanitario y modelar un balance hídrico en este relleno:

La adecuación del relleno sanitario inicia con la conformación del fondo, impermeabilización del vaso, construcción de filtros y finalmente la construcción de las capas de drenaje. Con relación al fondo del vaso norte, como se mencionó anteriormente, se inicia con la adecuación de 1,320 m² de terreno y la impermeabilización de una parte del talud conformado inicialmente. En la Figura 23 se presentan las fotografías de la adecuación inicial del vaso norte.



Figura 23. Adecuación inicial del vaso norte del relleno sanitario simultánea a la disposición de los residuos sólidos y conformación de las capas de residuos sólidos
Fuente: ARES (2006).

De acuerdo con la Figura 23, se observa como la disposición de los residuos sólidos se inicia cuando aún se encuentran en proceso la adecuación y conformación del vaso norte. Esto permite establecer que al ocurrir eventos de precipitación en este sitio, se presentaron aportes de agua por escorrentía superficial con gran cantidad de arrastre de materiales de suelo provenientes de los taludes desprotegidos; estos aportes llegaban hasta el fondo del vaso donde se encontraban las primeras celdas de confinamientos de residuos sólidos, lo cual pudo ocasionar aumento de sedimentos en la red de drenaje natural, colmatación en las capas de drenajes y obstrucción en el sistema de filtros, y otros efectos asociados a la impermeabilización parcial de este vaso. Igualmente, se aprecia como periódicamente el área de conformación del fondo del vaso crecía a medida que era necesario expandir las celdas de residuos sólidos.

De acuerdo con las fotografías inferiores de la Figura 23, se aprecia como los residuos sólidos son conformados en trincheras y con un talud para su estabilidad; sin embargo, es apreciable la exposición directa de estos residuos con el medio ambiente debido a la ausencia de coberturas diarias, lo cual puede ocasionar contaminación del suelo, debido al arrastre de contaminantes por la lluvia que entra en contacto con los residuos y escurre por los mismos, llegando finalmente hasta las áreas del fondo que no están impermeabilizadas.

El crecimiento de las capas de residuos sólidos en el vaso norte del relleno sanitario ha sido en volumen sobre el área de fondo que se encuentra adecuada. La conformación de las capas se ha hecho mediante la compactación en fardos y la disposición tradicional combinada (área y trinchera), la cual consiste en la descarga de los residuos sólidos de los vehículos (recolectores y volquetas) en el relleno sanitario y su posterior segregación y compactación con el buldózer de oruga.

Durante la operación del relleno sanitario se plantearon zonas de trabajo, en las cuales, se disponían los residuos conformando plataformas de estos materiales hasta alcanzar alturas promedios de cinco metros. Al alcanzar estas alturas en una zona determinada, se realizaba la disposición de los residuos en otra zona adyacente. Esta operación se realizaba con el fin de manejar la estabilidad física de los residuos sólidos y de trabajar mejor en áreas pequeñas que permitieran una menor exposición de los residuos a la precipitación.

De acuerdo con el proceso constructivo del relleno sanitario, en la Figura 24 se presenta esquemáticamente la conformación de las capas de este relleno. Este esquema constructivo es una aproximación al proceso operativo que se plantea para la conformación de las plataformas de residuos sólidos. Este esquema se idealizó para el modelamiento de un balance hídrico durante la fase operativa de este u otro relleno sanitario.

Aunque la conformación del relleno difiere de la realidad respecto al esquema planteado en la Figura 24, lo que se desea es presentar una aproximación de la técnica de conformación de las celdas de residuos sólidos dentro del vaso norte del CIS – El Guacal. Este esquema, es también planteado de forma tal que permita una representación más simple dentro del modelo.

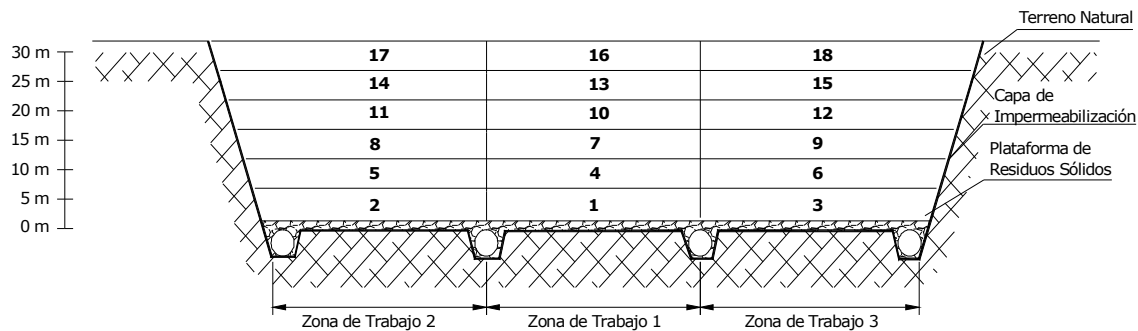


Figura 24. Esquema idealizado para la operación del relleno sanitario El Guacal

▪ Caracterización de las capas de residuos sólidos

Durante la operación del vaso norte del relleno sanitario El Guacal, se realizaron actividades relacionadas con el monitoreo y caracterización de las condiciones físicas y geotécnicas de las capas de residuos sólidos. Estos ensayos corresponden a lectura de piezómetros, estimación de densidad de compactación y ensayos de permeabilidad para los residuos sólidos y el material de cobertura, además de los monitoreos topográficos mediante la lectura de puntos de control.

Densidad de compactación: desde que se inició la conformación de las celdas de residuos sólidos, la firma encargada de la operación del vaso norte de este relleno, realizó a partir del tercer mes de operación ensayos mensuales de densidad, los cuales se efectuaron según el método de reemplazo con agua en un apique de 0.30 m x 0.30 m de área y 0.30 m de profundidad. En la Tabla 11 y la Figura 25 se presentan los distintos valores obtenidos en cada uno de los 19 ensayos que se realizaron durante el período analizado: de Abril de 2006 – Enero de 2008. De acuerdo con los datos obtenidos por estos muestreos, la densidad de compactación promedio de los residuos sólidos presentes en el vaso norte del relleno sanitario corresponde a 1,066.76 kgf/m³.

Permeabilidad: para determinar la permeabilidad en la capa de residuos sólidos se realizaron ensayos mensuales por parte de la firma encargada de la operación del relleno sanitario, los cuales consistían en hacer un apique de 0.29 m x 0.29 m x 0.30 m en una celda diaria de disposición, este apique se llenaba de agua dos veces antes de tomar lecturas con el objeto de saturar el terreno circundante, posteriormente se medían los

diferentes niveles de agua en función del tiempo. En la Tabla 12 y en la Figura 26, se presentan los valores y variabilidad de las permeabilidades que se midieron en los residuos sólidos del vaso norte, mediante 19 ensayos que se realizaron durante el período analizado en este trabajo.

Tabla 11. Valores de los ensayos de densidad de compactación de los residuos sólidos

Ensayo	Fecha	Densidad (kgf/m ³)
Año 2006:		
1	Junio	1,161
2	Julio	981.48
3	Agosto	1,116.85
4	Septiembre	1,003.355
5	Octubre	1,078.5
6	Noviembre	1,028.7
7	Diciembre	1,078.5
Año 2007:		
8	Enero	1,094.7
9	Febrero	1,145.8
10	Marzo	1,056.98
11	Abril	1,143.4
12	Mayo	1,264.35
13	Junio	1,205.56
14	Julio	981.48
15	Agosto	1,056.98
16	Septiembre	962.61
17	Octubre	924.86
18	Noviembre	1,038.89
19	Diciembre	944.44

Fuente de datos: ARES (2006 – 2007).

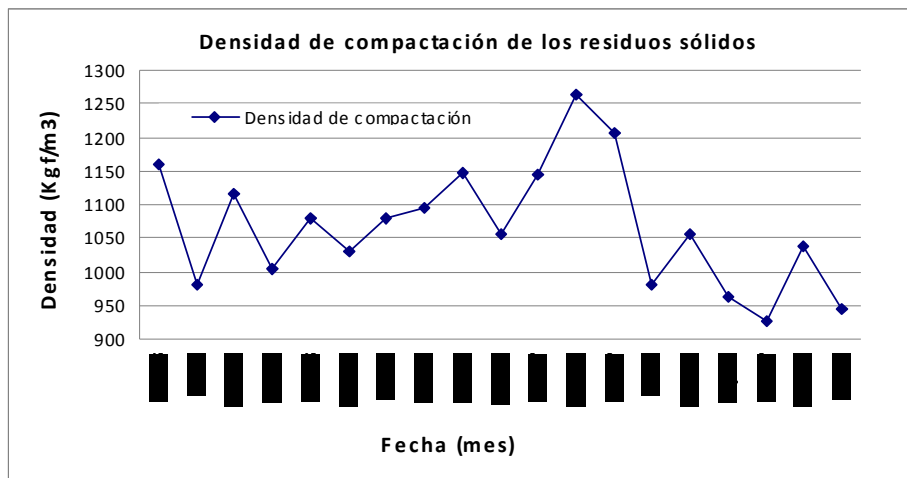


Figura 25. Variación de los valores de densidad de compactación de los residuos sólidos
Fuente de datos: ARES (2006 – 2007).

Tabla 12. Valores de los ensayos de permeabilidad de los residuos sólidos

Ensayo	Fecha	Permeabilidad (cm/s)
Año 2006:		
1	Junio	0.93E-2
2	Julio	1.1E-2
3	Agosto	1.0 E-2
4	Septiembre	0.11E-2
5	Octubre	1.1E-2
6	Noviembre	1.1E-2
7	Diciembre	1.3E-2
Año 2007:		
8	Enero	3.03E-2
9	Febrero	3.09E-2
10	Marzo	5.56E-2
11	Abril	3.8E-2
12	Mayo	0.66E-2
13	Junio	4.76E-2
14	Julio	8.2E-2
15	Agosto	6.9E-2
16	Septiembre	7.4E-2
17	Octubre	3.7E-2
18	Noviembre	4.0E-2
19	Diciembre	3.9E-2

Fuente de datos: ARES (2006 – 2007)

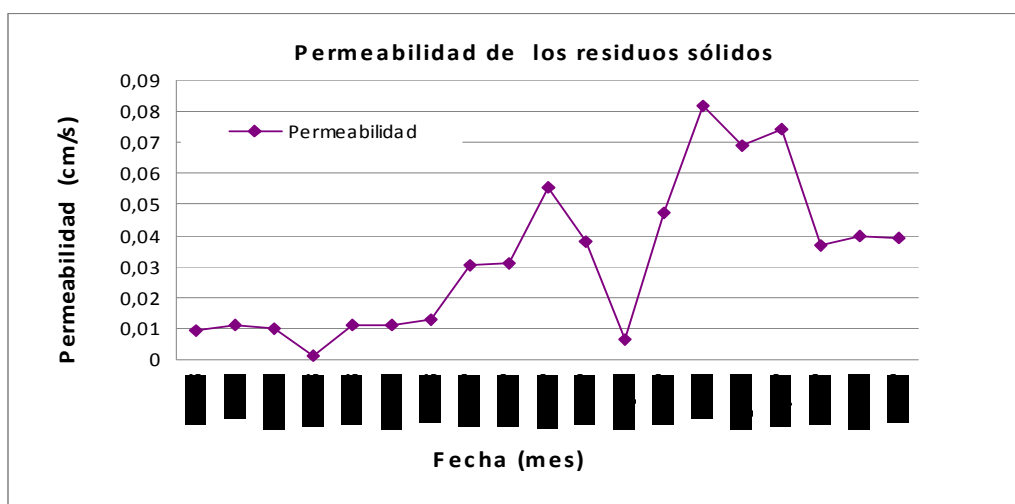


Figura 26. Variación de los valores de permeabilidad de los residuos sólidos
Fuente de datos: ARES (2006 – 2007).

▪ Caracterización del material de cobertura

Cuando se inicia la conformación de las primeras capas de residuos sólidos, se utiliza por parte de la firma encargada de la operación del relleno sanitario, la técnica de cobertura de los residuos sólidos con material de suelo (limo). Tal como se mencionó anteriormente, el espesor promedio de las capas de limo correspondían a 0.40 m; sin embargo, no toda la cobertura era realizada con material de suelo, también se utilizaba material plástico para algunas áreas donde no se contaba con material de suelo disponible para su cobertura. En la Figura 22 se presenta la técnica inicialmente utilizada para la cobertura de los residuos sólidos.

La cobertura de los residuos sólidos no era manejada de forma diaria, para los casos en que se lograba la conformación de una celda de residuos sólidos con un área determinada se disponía el material necesario para su cobertura; sin embargo, estas coberturas no eran permanentes, la firma encargada de la operación del relleno sanitario manejaba coberturas temporales alternas especificando que utilizando coberturas permanentes, en las capas intermedias y superiores el lixiviado se retiene dentro de la masa, ya que la cobertura, genera un sello que imposibilita su drenaje vertical, por lo cual ocurren brotes de lixiviado en los taludes y aumento en la presión de poros interna por la acumulación de gases; con las coberturas temporales, los fluidos se desplazan con facilidad, aumentando la estabilidad en la masa de los residuos y minimizando los brotes de lixiviado (ARES, 2006).

Durante la utilización del material de cobertura la firma encargada de la operación del relleno sanitario, realizó algunos ensayos de densidad de compactación y permeabilidad de este material, aunque los ensayos no se llevaron a cabo con la misma continuidad con que se realizaron los ensayos de las capas de residuos sólidos (mensualmente), se utilizaron los resultados obtenidos para tener una caracterización general de este material.

Los ensayos de densidad de compactación del material de cobertura se realizaron con el mismo método en que se llevaron a cabo los ensayos en las capas de residuos sólidos. En la Tabla 13 y la Figura 27 se presentan los valores y variaciones de la densidad de compactación del material de cobertura.

De acuerdo con los valores obtenidos en los 11 ensayos que se realizaron durante el período analizado en este trabajo de investigación (abril de 2006 – enero de 2008), el valor promedio de la densidad de compactación del material de cobertura (limo) corresponde a 1,294.39 kgf/m³.

Tabla 13. Valores de los ensayos de densidad de compactación del material de cobertura (limo)

Ensayo	Fecha	Densidad (kgf/m ³)
Año 2006:		
1	Junio	1,269.50
2	Julio	1,321.70
3	Agosto	1,178.90
4	Septiembre	1,170.00
5	Octubre	1,207.85
6	Noviembre	1,245.70
Año 2007:		
7	Agosto	1,354.17
8	Septiembre	1,476.67
9	Octubre	1,357.64
10	Noviembre	1,298.61
11	Diciembre	1,357.64

Fuente de datos: ARES (2006 – 2007)

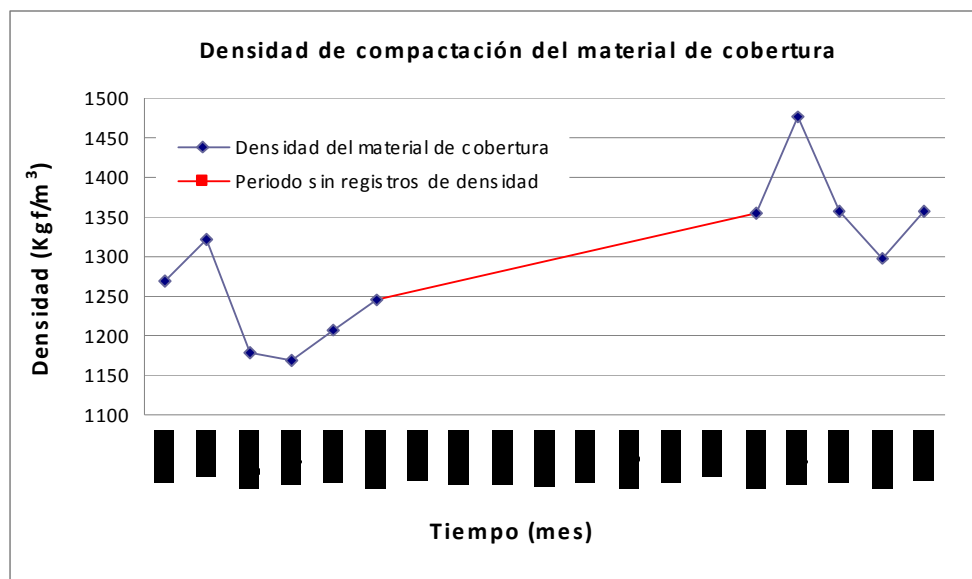


Figura 27. Variación de los valores de densidad de compactación del material de cobertura
Fuente de datos: ARES (2006 – 2007).

Para determinar la permeabilidad sobre las capas de material de cobertura, la firma encargada de la operación del vaso norte realizó ensayos para determinar este parámetro en los meses en que los residuos sólidos eran cubiertos con material de suelo (limo); los meses en que no se determinó la permeabilidad fue por la ausencia de coberturas naturales, es decir cuando utilizaba material plástico para proteger las celdas de residuos sólidos.

La metodología de trabajo para determinar la permeabilidad del material de cobertura fue igual a la empleada en los ensayos realizados para las capas de residuos sólidos. Los resultados de estos ensayos se presentan en la Tabla 14 y la representación de la variación de los valores de permeabilidad para el material de cobertura se presenta en la Figura 28.

Tabla 14. Valores de los ensayos de permeabilidad del material de cobertura

Ensayo	Fecha	Permeabilidad (cm/s)
Año 2006:		
1	Junio	1.03E-4
2	Julio	3.12E-4
3	Agosto	10.0E-4
4	Septiembre	10.0E-4
5	Octubre	9.0E-4
6	Noviembre	7.0E-4
Año 2007:		
7	Agosto	90.0E-4
8	Septiembre	74.0E-3
9	Octubre	37.0E-3
10	Noviembre	40.0E-3
11	Diciembre	39.0E-3

Fuente de datos: ARES (2006 – 2007)

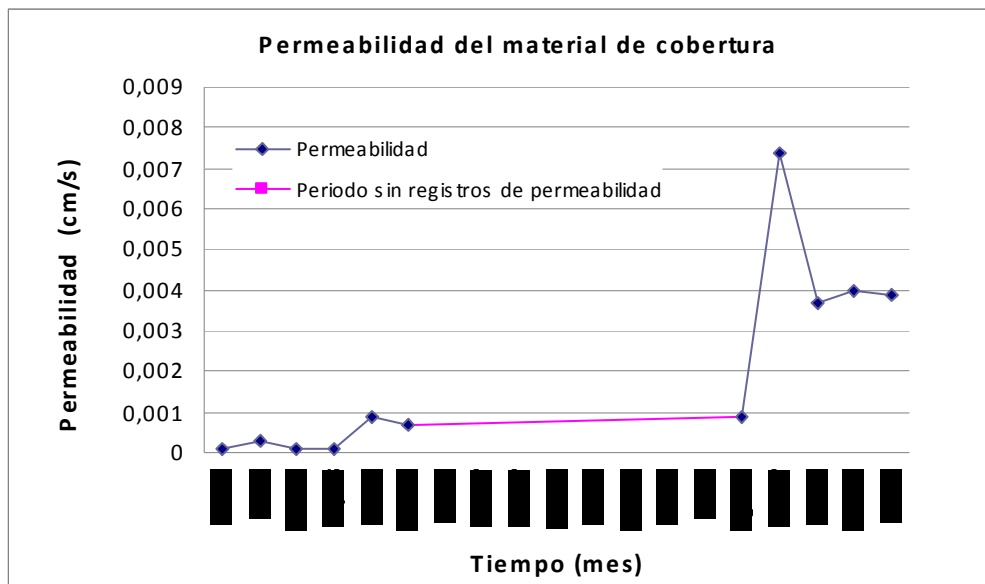


Figura 28. Variación de los valores de permeabilidad del material de cobertura
Fuente de datos: ARES (2006 – 2007).

▪ Manejo y monitoreo de lixiviados

La firma encargada de la operación del relleno sanitario El Guacal realiza el manejo de los lixiviados que se producen en el vaso norte y los que se presentan en los carros recolectores de los residuos sólidos. Con relación a los lixiviados de los vehículos recolectores, de cada vehículo se puede evacuar en promedio 0.05 m^3 de lixiviados en un tiempo de 3 minutos. La evacuación se realiza mediante una tubería de PVC de 6" y luego son almacenados temporalmente hasta ser conducidos a un tanque localizado en la parte inferior del vaso norte, de donde posteriormente son transportados hasta la planta de tratamiento de lixiviados.

Los lixiviados que se producen en el vaso norte del relleno sanitario son recolectados por el sistema de filtros centrales, subcentrales, de taludes y de fondo total; después son conducidos mediante una tubería de PVC de 12" no perforada con una pendiente del 1.5% hasta un manhole localizado en la parte baja del vaso norte (coordenadas: 1183419.990 Norte y 819328.828 Este), finalmente son transportados mediante una tubería de PVC de 6" hasta un tanque de 2000 L el cual sirve de sedimentador primario, y luego llegan por gravedad a través de una manguera agro minera de 3" hasta la planta de tratamiento de lixiviados ubicada en la parte en la parte baja del proyecto CIS (ARES, 2006).

En la Figura 29 se presenta el esquema del sistema de recolección y transporte de lixiviados generados en el vaso norte.

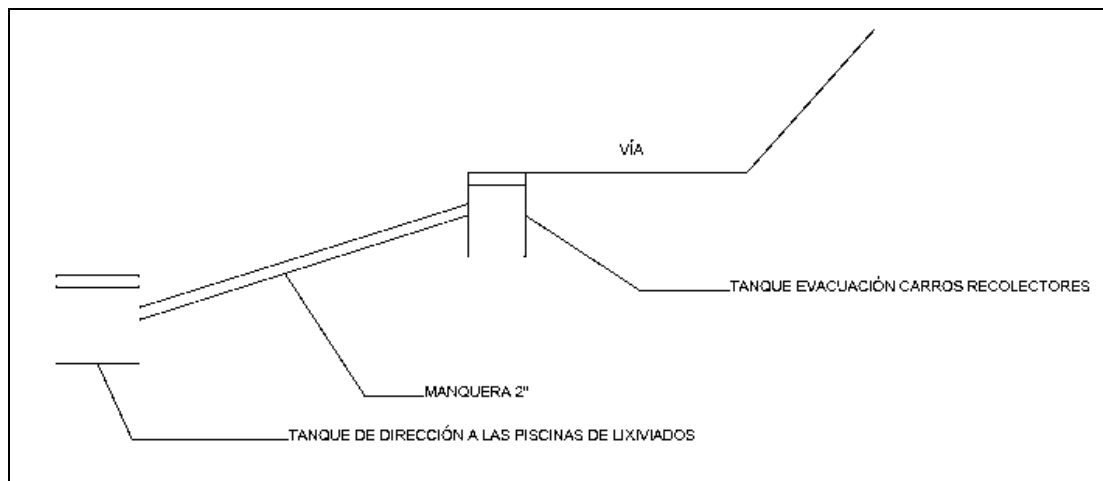


Figura 29. Esquema del sistema de recolección y transporte de lixiviados

Con relación al monitoreo de los lixiviados que se producen en el vaso norte, desde que se inicia el segundo mes de operación del relleno sanitario (Mayo de 2006) se empiezan a realizar por parte del personal técnico mediciones diarias del caudal de lixiviados. Los aforos son realizados volumétricamente en la salida del tubo de PVC de 6" que transporta

los lixiviados desde el manhole en concreto hasta el tanque de 2000 L ubicado en la parte baja del relleno sanitario.

Las variaciones anuales de estos caudales se presentan en la Figura 30.

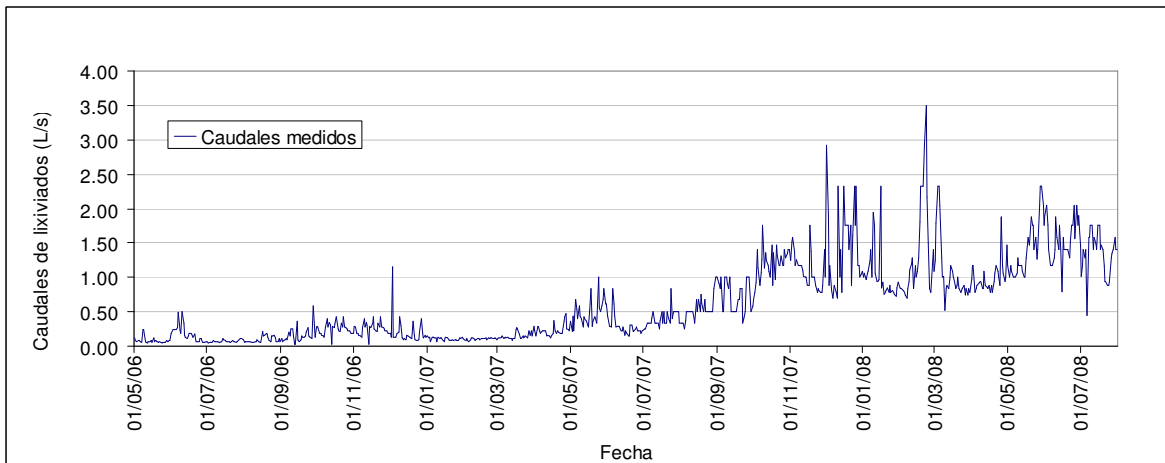


Figura 30. Variaciones del caudal de lixiviados en el años 2006 -2008
Fuente de datos: ARES (2008).

▪ Manejo de gases

Desde que se inicia el segundo mes de operación del vaso norte del relleno sanitario El Guacal, se empieza la construcción de chimeneas para la evacuación de los gases que se producen en el interior de las capas de residuos sólidos. Las chimeneas son instaladas y /o ampliadas a unas alturas que les permitan estar por debajo y encima de las cotas superiores de las celdas de residuos sólidos existentes en el momento de la construcción o ampliación de las chimeneas.

Las chimeneas se construyen con malla electro soldada de 1" x 1 1/2", con un diámetro de 1.05 m; tuberías de 6 m, con un diámetro de 12" en Novafort perforada; y piedra de canto rodado lavado de diámetro de 3" a 6" (ARES, 2006). El número de chimeneas ha ido aumentando a medida que ha incrementado el área de disposición de residuos sólidos en el vaso norte, a la fecha de corte de este estudio se han instalado 18 chimeneas.

▪ Instrumentación

Para la toma de datos necesarios para el control técnico del vaso norte y el análisis de las condiciones climáticas de la zona de localización del relleno sanitario El Guacal, las firmas encargadas de la operación del relleno sanitario, han instalado la instrumentación necesaria para las actividades de seguimiento geotécnico, control topográfico y mediciones de variables meteorológicas.

Para las actividades de geotecnia se utilizan en el vaso norte piezómetros de hilo vibrátil con el fin de medir los niveles mensuales de lixiviados presentes en el interior de las capas de residuos. Para el control topográfico del vaso norte y el monitoreo de los asentamientos tanto diferenciales como totales y los posibles desplazamientos de la masa de residuos sólidos se han instalado puntos de control topográfico. El control topográfico se realiza mensualmente con el fin de monitorear los asentamientos de la masa de residuos.

De otra parte, para las mediciones de las variables climáticas presentes en el sitio de localización del relleno sanitario se instaló una estación meteorológica y un pluviómetro localizado con coordenadas 819271.010 Este y 1183466.293 Norte y con cota 2692.161 msnm. Vale resaltar, que a pesar de contar con una estación meteorológica no ha sido posible contar con registros continuos de datos climáticos debido a múltiples suspensiones en la lectura de datos, por lo cual, los registros diarios de precipitación han sido obtenidos con el pluviómetro.

4. APLICACIÓN DEL MODELO HELP

4.1 INTRODUCCIÓN

El modelo HELP (Hydrologic Evaluation of Landfill Performance) el cual fue previamente descrito, en el numeral 2.3.1 del Capítulo 2, es un modelo hidrológico cuasi - bidimensional para simular el movimiento del agua por encima, a través y fuera de un relleno sanitario o vertedero. El modelo a partir de datos de clima, de suelo y de las características de diseño del vertedero; estima a partir de un conjunto de ecuaciones (ya descritas en el numeral 2.3.1) los almacenamiento de agua superficial; la escorrentía; la infiltración; el crecimiento de la cobertura vegetal, la evapotranspiración; el almacenamiento de humedad en el suelo; el drenaje subsuperficial lateral; la recirculación del lixiviado; el drenaje vertical no saturado y el goteo a través de suelo, de las geomembranas o través del conjunto de capas funcionales en el interior del relleno. En esencia, el modelo es muy bueno para evaluar el comportamiento de las capas que se consideran en el diseño de un relleno sanitario con relación al movimiento del agua entre estas; así mismo, evalúa los diferentes sistemas de combinaciones de capas que se pueden dar en el diseño de un relleno sanitario: capas de suelo con diferentes tipos de cobertura vegetal, capas de residuos sólidos, capas para proporcionar drenajes laterales, líneas de barreras de suelo (arcillas) y materiales sintéticos como geomembranas.

El propósito principal del modelo es evaluar mediante el análisis de varios balances hídricos, las diferentes alternativas de diseño de un relleno sanitario y determinar cual es la más apropiada con relación a la cantidad de agua que se produce. El modelo se puede aplicar en la evaluación del comportamiento hidrológico de vertederos abiertos, cerrados y parcialmente cerrados, más no en vertederos en operación; siendo esta última una de las principales limitaciones del modelo.

En sí mismo, el modelo HELP contiene un conjunto de ecuaciones planteadas bajo varios supuestos que permiten estimar el resultado de los diferentes procesos hidrológicos que ocurren en un relleno sanitario, estas ecuaciones fueron incorporadas a éste modelo pensando que son razonables si el modelo se aplica a rellenos sanitarios diseñados bajo condiciones estándares, es decir para rellenos sanitarios técnica y ambientalmente bien operados; sin embargo, muchos de los planteamientos del modelo, cuando éste se aplica a rellenos sanitarios con diseño inusuales, pueden parecer no razonables y muchos de los resultados pueden verse influenciados por éstas inconsistencias. La Figura 31, presenta

un esquema del diseño típico de un vertedero que tiene todas las características para las cuales son aplicables las ecuaciones planteadas en el modelo HELP.

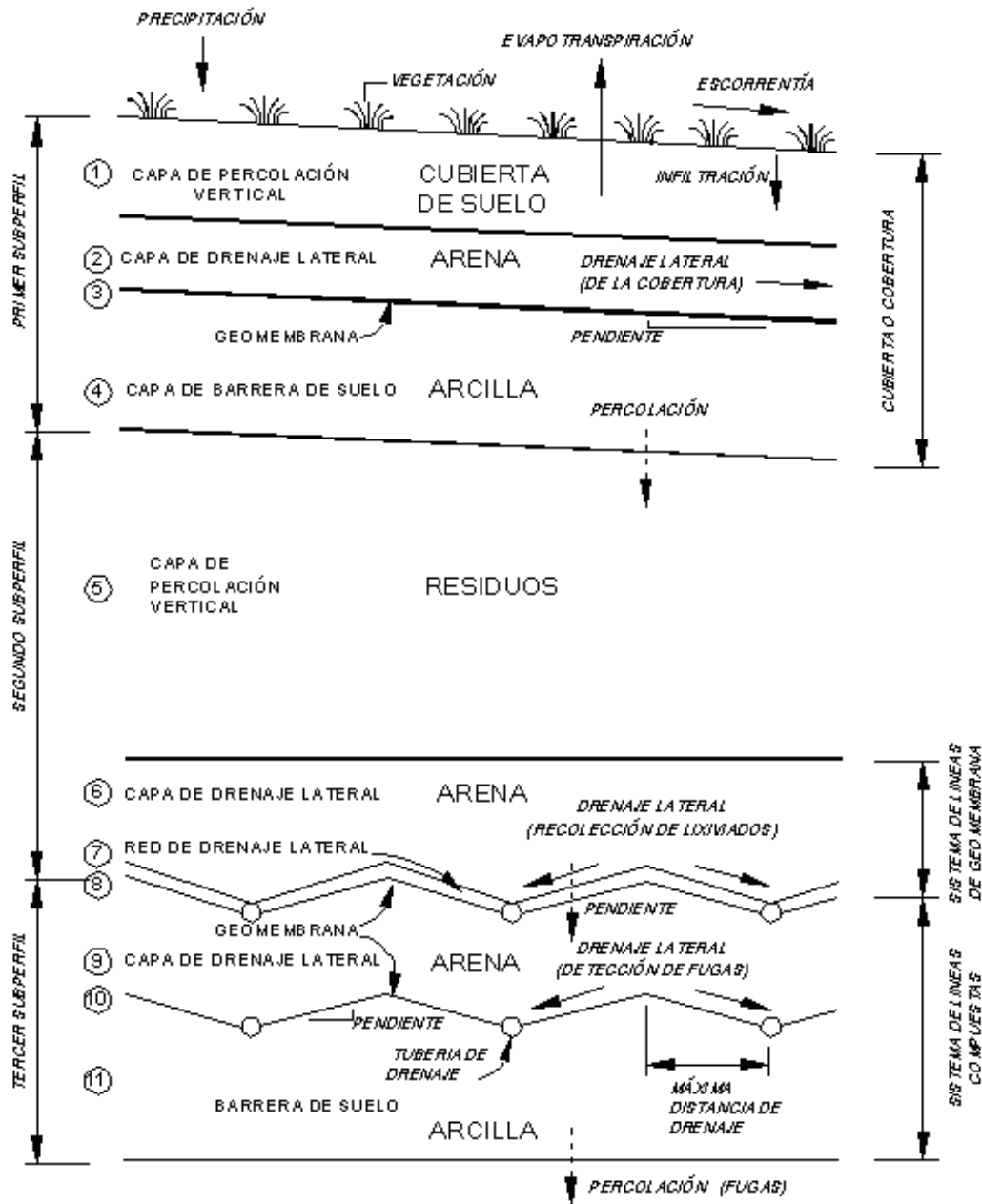


Figura 31. Esquema de la conformación de un vertedero típico para el modelo HELP
Fuente: Schroeder et al. (1994).

Teniendo en cuenta lo anterior, es importante en primer lugar, conocer completamente: la aplicabilidad, el funcionamiento, los fundamentos matemáticos y físicos del modelo, los requerimientos del mismo con relación a la información, las herramientas e información

básica disponibles en el modelo, el procesamiento de la información, la generación de las simulaciones y los resultados obtenidos con el modelo. Bajo este amplio conocimiento, se pueden detectar cuales son las limitaciones del modelo para su aplicación a un caso particular, especialmente para las condiciones operativas de un relleno sanitario y la disponibilidad de registros históricos de variables climáticas.

Bajo estas consideraciones, se analizaron las condiciones para las cuales se podía aplicar el modelo HELP al relleno sanitario El Guacal; se identificaron las debilidades que estaban presentes con relación a la información y a las condiciones actuales del relleno; se establecieron los supuestos necesarios para los aspectos de diseño y las condiciones climáticas que permitieran desarrollar simulaciones por parte del modelo, que si bien no era posible que estas simulaciones arrojaran datos coherentes a la realidad, permitieron analizar ciertos escenarios operativos del relleno. Igualmente se aplicó el propósito principal del modelo: analizar el comportamiento de los caudales de lixiviados bajo diferentes escenarios de diseño del relleno sanitario El Guacal, esto con el fin de comparar la operación actual con una operación técnicamente más eficiente, teniendo como criterio evaluador la generación de lixiviados. Adicionalmente, se realizaron simulaciones para unas condiciones de precipitación distintas a las de la zona de localización del relleno en estudio, estas simulaciones se compararon con las realizadas inicialmente, a fin de percibir los efectos de esta variable en la generación de lixiviados dentro de este modelo; finalmente, se establecieron unas condiciones para cuando el relleno sanitario se encontrará clausurado y se realizaron simulaciones para este escenario.

La metodología llevada a cabo para la aplicación del modelo HELP, los resultados obtenidos, la comparación de los mismos y los análisis concluyentes acerca del modelo y las simulaciones que este realiza, se presentan en este capítulo.

4.2 IDENTIFICACIÓN DE CONDICIONES RESTRICTIVAS PARA LA MODELACIÓN

El conocimiento de los escenarios ideales para los cuales fue desarrollado el modelo HELP, el análisis de sus limitaciones y supuestos, el reconocimiento del estado actual del relleno sanitario El Guacal y la información disponible para la aplicación del modelo; permitieron, identificar las restricciones para el uso de este programa en el relleno sanitario en estudio y establecer las condiciones que se debían adoptar para realizar las simulaciones con este modelo.

Con relación al modelo HELP y sus planteamientos se puede establecer:

- El modelo no es de carácter netamente predictivo, si el uso que se le quiere dar es la estimación a futuro de caudales de lixiviados, sino que, en esencia, es evaluativo, y es una herramienta útil para evaluar el comportamiento de un relleno sanitario ante unas condiciones climáticas y bajo ciertos aspectos técnicos de diseño. Con base en esto, se limitó el uso del modelo a sólo simular los caudales de lixiviados esperados para las condiciones constructivas actuales del relleno sanitario en estudio y para unos escenarios de diseño idealizados.
- El modelo considera que en un relleno sanitario pueden existir varios tipos de capas que determinan el comportamiento del flujo en el interior y fuera del relleno sanitario; este tipo de capas se espera que estén presentes en un relleno sanitario ideal y por ende, el modelo plantea diferentes procesos físicos posibles asociados al papel que cumplen estas capas (Ver Figura 31). Teniendo en cuenta el conjunto posible de capas existentes, el modelo requiere de un gran número de parámetros para caracterizar el relleno sanitario; para el caso del relleno sanitario El Guacal, solo es posible establecer las características del relleno para un solo tipo de capa, la cual represente el flujo como percolación vertical; y para la existencia de una geomembrana. De esta forma, se espera que el modelo deba estimar los caudales de lixiviados bajo condiciones de conductividades hidráulicas que permitan un flujo en una sola dimensión.
- Las características del relleno sanitario solo fueron dadas para las condiciones actuales del mismo, es decir, donde solo existen capas de residuos sólidos municipales. Los datos que el modelo pide para los parámetros involucrados en la evapotranspiración potencial, se consideraron para el caso en que se idealizaba el relleno sanitario ya clausurado.
- El modelo requiere datos diarios de precipitación, temperatura y radiación solar para poder calcular la variable climática de evapotranspiración potencial, además, de considerar otros parámetros característicos de una cobertura vegetal presente en el relleno sanitario. Con relación a esto, se espera que conforme a la realidad, el fenómeno de pérdida de agua hacia la atmósfera en el relleno sanitario El Guacal, se de solamente por evaporación real, debido a que no hay existencia de coberturas vegetales en el mismo.

De otra parte, los datos de clima que se tenían, eran: registros pluviométricos de la estación del relleno sanitario El Guacal desde mayo 01 de 2006 a diciembre 31 de 2008; se tenía un valor promedio de temperatura anual y existía una total escasez de datos de radiación solar. Bajo estas condiciones, fue necesario el uso de información de otras estaciones climatológicas para el relleno de datos faltantes de lluvia, y para datos de temperatura y radiación solar. Los datos debían ser datos de años completos, es decir 365 o 366 días, ya que el modelo genera simulaciones para cada año desde el 1 de enero hasta el 31 de diciembre de ese mismo año.

Teniendo en cuenta lo anterior, se consideró que los resultados de caudales de lixiviados simulados por el modelo, estarían muy distantes de la realidad, debido a que se asumieron muchas características climáticas de otras zonas distintas a la del sitio de localización del relleno sanitario en estudio.

- A falta de información, el modelo HELP cuenta con una base histórica de datos de 5 años de registros de lluvia y con una herramienta para la generación sintética de datos de precipitación, temperatura y radiación solar; sin embargo, estas herramientas no son de uso universal, ya que están disponibles de esta forma: la base de datos es para 102 ciudades de Estados Unidos y el generador de clima funciona con unos coeficientes que fueron determinados para 183 ciudades de este mismo país.

Con relación a lo anterior, en caso de querer realizar estimaciones a futuro de caudales de lixiviados con este modelo, estas podrían ser validas para rellenos sanitarios ubicados en las localidades que maneja el modelo; de lo contrario, el usuario tendría que generar aparte, mediante una herramienta estadística, los datos a futuro e incorporarlos al modelo; tarea que se espera este llena de una alta incertidumbre y un gran número de probabilidades de posibles escenarios de condiciones climáticas, las cuales generarían diferentes comportamientos de caudales de lixiviados.

- El modelo genera un número de años de simulaciones igual al número de años de registros de datos climáticos que el usuario le ingresa, para este caso, solo fue posible simular las condiciones del relleno sanitario El Guacal para tres años: 2006, 2007 y 2008 (período en que se ha ido operando el relleno sanitario). Esto se hizo con el fin de comparar los caudales simulados por el modelo, con los registros de caudales que se tienen para este período de años.
- Para determinar los almacenamientos de humedad en las capas del relleno sanitario, la cabeza hidráulica, el drenaje vertical y la evaporación del agua; el modelo requiere datos de porosidad total, capacidad de campo, punto de marchites (para suelos) y conductividad hidráulica saturada. Para el relleno sanitario El Guacal, no se contaba con datos de estos parámetros, salvo unos resultados de ensayos de permeabilidad en residuos sólidos realizados en campo. De acuerdo con esta situación, se optó inicialmente por utilizar los valores que proporciona el modelo HELP por defecto para cada tipo de capa y textura de material de suelo; finalmente, estos valores fueron analizados y tomados como parámetros de calibración para el modelo, claro esta, conservando siempre las restricciones que el modelo establece como lógicas: “que el punto de marchites sea mayor que cero pero menor que la capacidad de campo; que la capacidad de campo sea mayor que el punto de marchites pero menor que la porosidad; y que la porosidad total sea mayor que la capacidad de campo pero menor que 1”.

Para establecer por defecto los valores de los parámetros anteriormente mencionados y considerar las reglas establecidas anteriormente; el modelo HELP resume estas relaciones en la Figura 32.

- El modelo HELP requiere datos de condiciones iniciales de humedad para cada capa que no sea una línea o barrera de suelo (geomembranas o capas de arcilla), ya que para este tipo de capas el modelo asume que permanecen saturadas todo el tiempo. Para las condiciones de humedad inicial en la capa de residuos sólidos y la capa de grava y filtros, que son los tipos de capas que están presentes en el relleno sanitario en El Guacal, no se contaba con datos reales de humedad en los residuos sólidos que se depositan en este relleno sanitario, por lo cual, se utilizó inicialmente la opción en que el modelo establece este contenido de humedad.
- El modelo HELP supone valores de humedad inicial cercanos a un estado estable y no permite que se den cambios en un largo plazo en el contenido de humedad. El modelo corre un año de simulación para llevar las condiciones iniciales a un estado estable. El contenido final de humedad pasa a ser la condición inicial para el siguiente período de simulación. Los valores que el modelo encuentra como condición inicial no se presentan en los resultados de la simulación.

Después de tener los resultados de la modelación con los datos que el modelo coloca por defecto, se quiso comparar una simulación con valores de humedad reportados en algunas bibliografías.

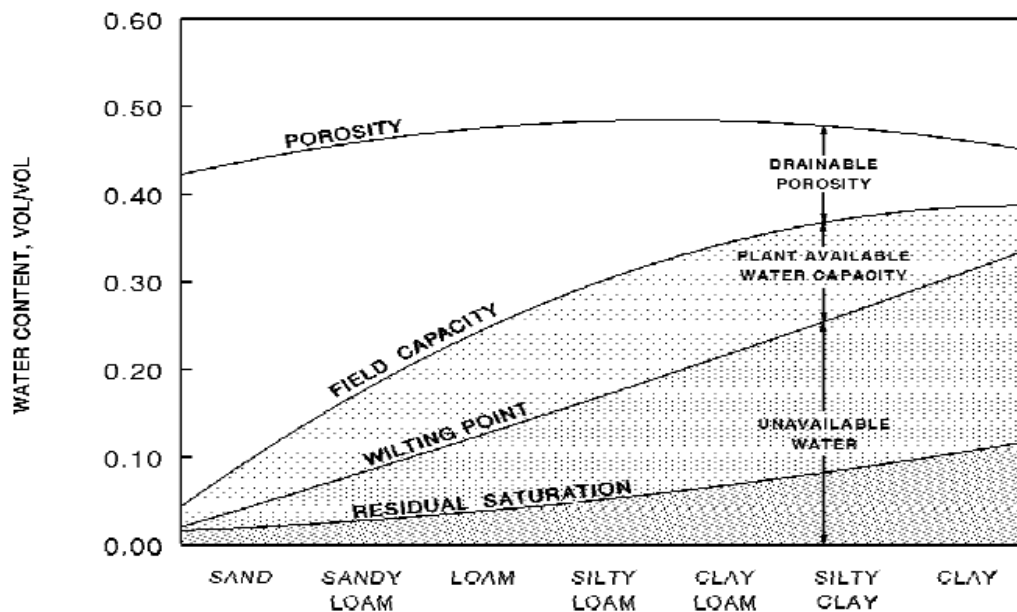


Figura 32. Relaciones de parámetros de humedad y texturas del suelo
Fuente: Schroeder et al. (1994).

Con relación al parámetro de humedad, se reconoce que las variaciones de los contenidos de humedad en el tiempo para un relleno sanitario en operación, obedecen a factores como el ingreso diario de residuos sólidos al relleno sanitario; visto de esta forma, diariamente en el relleno sanitario se van estar dando unos aportes de humedad asociados a los residuos sólidos. Además de lo anterior, la compactación y los asentamientos de las capas de residuos sólidos en el interior del relleno sanitario, generan unos cambios en la capacidad de campo y la porosidad de estos materiales, por consiguiente, el almacenamiento de agua por parte de estas capas debe disminuir.

De acuerdo con lo anterior, se tiene que: los registros de caudales del relleno sanitario El Guacal deben tener los efectos de los factores antes mencionados, ya que en este relleno sanitario ingresan diariamente residuos sólidos y la cantidad de residuos ha sido creciente en el tiempo; igualmente, los residuos sólidos son compactados para poder conseguir una estabilidad geotécnica; sin embargo, al momento de simular hidrológicamente con el modelo HELP las condiciones constructivas de este relleno, los caudales de lixiviados que el modelo genera no consideran los factores de compactación e ingreso diario de residuos sólidos al relleno sanitario, por lo cual se restringe una comparación muy estricta entre estos dos tipos de caudales de lixiviados (simulados y reales).

- El modelo HELP está diseñado para ser aplicado a escenarios de rellenos sanitarios abiertos, cerrados, o parcialmente cerrados, y para unas con condiciones fijas en cada capa que conforma el relleno sanitario; mas no ha sido diseñado para rellenos sanitarios en operación. Para nuestro caso de aplicación, el relleno sanitario a analizar se encuentra en operación y el período seleccionado para este trabajo fue mayo de 2006 - julio de 2008 (fecha en que se inicia la operación del relleno – fecha de corte para recolección de información). Teniendo en cuenta el estado del relleno sanitario, la aplicación del modelo HELP se tuvo que hacer simulando la operación del relleno sanitario año a año; es decir se realizaron tres simulaciones, para las cuales se ingresaron datos climáticos correspondientes a cada año simulado y se establecieron unas condiciones próximas a la realidad del estado operativo del relleno sanitario en el año correspondiente a la simulación.

4.3 FUNCIONAMIENTO DEL MODELO

El funcionamiento del modelo HELP fue explicado en numeral 2.3.1 del Capítulo 2; sin embargo, en Scroeder et al. (1994a) está contenido todo el documento: *The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model, User's Guide for Version 3*, el cual contiene toda la guía de como funciona y se utiliza este modelo.

4.4 PROCESO DE MODELACIÓN

En el proceso de modelación se explican los escenarios de modelación reales que se tuvieron en cuenta para el relleno sanitario en estudio y los que se tuvieron que asumir. Además, se presenta la información que se utilizó para realizar las simulaciones mediante el modelo HELP. Igualmente, se presentan las corridas que se realizaron con este modelo y sus objetivos.

4.4.1 Escenarios de modelación

Los escenarios que se plantearon para aplicar el modelo HELP fueron los siguientes:

- **Escenario 1: “Escenario real – condiciones actuales del relleno sanitario El Guacal”**

Para las condiciones reales y actuales del relleno sanitario El Guacal, se modeló este relleno considerando la construcción y el estado existente del relleno. Para esta simulación se tuvieron en cuenta: los avances en altura que las capas de residuos sólidos alcanzaban en cada año del período a simular; los tipos de capas construidas en el relleno y sus especificaciones constructivas, los resultados de algunos ensayos de campo para permeabilidad, los registros de caudales de lixiviados diarios año a año y los registros de precipitación diaria.

Para modelar este escenario fue necesario establecer los siguientes supuestos: que para el año 1 de simulación (2006) el relleno sanitario contaba con una capa de residuos sólidos con unas características fijas, un espesor determinado y un área correspondiente a la alcanzada al finalizar este año. El espesor se estimó en base al último reporte de crecimiento de la capa de residuos sólidos en el relleno sanitario para finales del año 2006. Para el segundo año de simulación (2007), se establecieron para las capas existentes en el relleno sanitario las características especificadas en la simulación anterior. El espesor de la capa de residuos sólidos se fijó según la altura que habían alcanzado los residuos sólidos a finales del año 2007. Finalmente, para el año 2008, se plantearon las mismas condiciones de las simulaciones anteriores y se estableció un espesor de capa para los residuos sólidos conforme a lo reportado en el relleno sanitario.

En sí, el supuesto más significativo para este escenario, es que aunque se intenta caracterizar lo más realmente posible las capas que conforman el relleno sanitario El Guacal, se fija su espesor por el término de un año; es decir el crecimiento de la capa de residuos sólidos se limita a cambiar año a año y no de forma diaria como sucede en la realidad.

En la Figura 33 se presenta el esquema de las condiciones actuales del relleno sanitario que se tienen en cuenta para modelar este escenario. La conformación de las capas en el interior de este relleno sanitario, están planteadas para unas condiciones basadas en el supuesto explicado anteriormente, el cual es necesario para poder modelar este escenario con el modelo HELP.

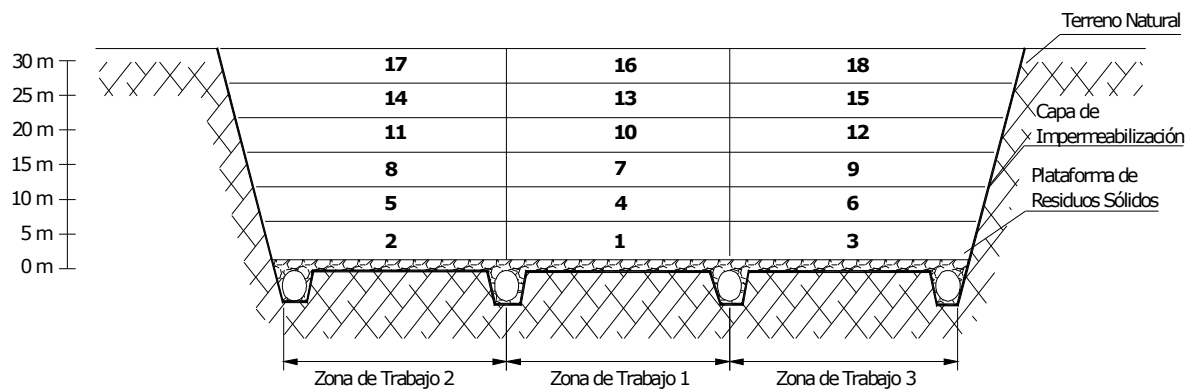


Figura 33. Esquema de la conformación actual del relleno sanitario El Guacal

▪ **Escenario 2: “Escenario ideal – modificaciones a las condiciones actuales del relleno sanitario El Guacal”**

Un segundo escenario que se propuso fue el “escenario ideal”. El cual consistió en aplicar el modelo HELP al relleno sanitario El Guacal, asumiendo la configuración y el esquema típico de relleno sanitario que propone este modelo (Ver Figura 31).

En la Figura 34 se presenta el esquema de las condiciones constructivas ideales que se plantearon para el relleno sanitario y que se tuvieron en cuenta para modelar este escenario.

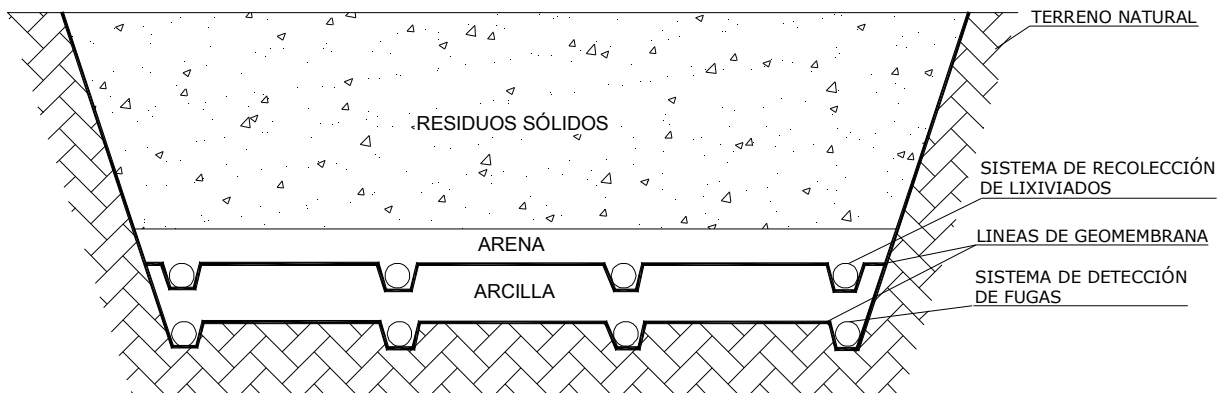


Figura 34. Esquema de la conformación constructiva ideal para el relleno sanitario El Guacal. Esquema asumido para simular el escenario 2 en el modelo HELP.

▪ **Escenario 3: “Escenario de condiciones climáticas distintas para el relleno sanitario El Guacal”**

En esta simulación simplemente se conservaron los mismos planteamientos del escenario real, solo que se incorporaron al modelo unos registros de variables climáticas de otra zona donde posiblemente también hubiese podido operar el relleno sanitario El Guacal, pero bajo unas condiciones de precipitación más favorables para disminuir la cantidad de lixiviados que se producen actualmente en este relleno sanitario.

La zona seleccionada para localizar hipotéticamente el relleno sanitario El Guacal y modelar de esta forma el relleno sanitario bajo las condiciones climáticas de este sitio, se seleccionó teniendo en cuenta lo siguiente:

De acuerdo con la normatividad colombiana vigente para residuos sólidos - Decreto 838 de 2005, la selección de sitios para la disposición final de residuos sólidos, debe hacerse conforme a lo establecido en este decreto. Para identificar otros sitios potenciales diferentes al sitio del relleno sanitario El Guacal, en el proyecto “Plan de ordenación y manejo de la cuenca del río Aburrá - POMCA” (Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín – UNAL et al., 2007) se aplicó este decreto y se obtuvo un mapa de áreas óptimas para la localización de rellenos sanitarios; de esta forma, se seleccionó una de las áreas propuestas pero cuyas características climáticas, en especial la precipitación, fuera de un orden mucho menor que la de la zona del relleno sanitario El Guacal.

En la Figura 35, se presenta el mapa de las áreas propuestas por el proyecto POMCA conforme al Decreto 838 de 2005.

Las áreas identificadas con círculos, son las más adecuadas para la localización de sitios de disposición final. De estas áreas, se tuvieron en cuenta aquellas que se encontraban localizadas en zonas con precipitaciones medias anuales menores a la del sitio de estudio. Las áreas seleccionadas para este escenario fueron el área 10 y área 14, localizadas en los municipios de Itagüí y Bello respectivamente; ambas zonas con precipitaciones medias anuales del orden de los 1,438 a 1,850 mm/año (información del mapa de precipitación del proyecto POMCA), mucho menor que la del sitio de localización del relleno sanitario El Guacal, la cual se registra un orden de los 2120 mm/año. Para efectos de la modelación de este escenario, finalmente, solo se pudo seleccionar el área del municipio de Bello, ya que para esta zona se tenían registros históricos de la estación pluviográfica Fabricato (1195470 N y 831500 E) a diferencia de la zona del municipio de Itagüí, en la cual no se encuentra una estación climatológica que nos permitiera tener registros de precipitación de este sitio.

Los valores de temperatura de este nuevo sitio de localización se ajustaron a la temperatura media anual de la zona del área seleccionada.

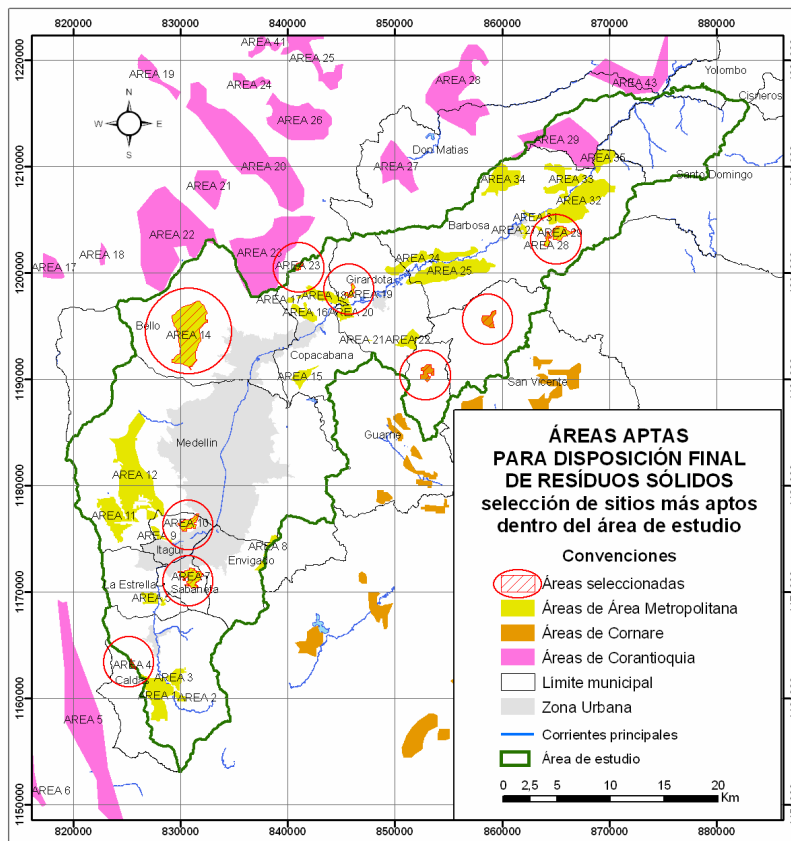


Figura 35. Mapa de áreas aptas para la disposición final de residuos sólidos
Fuente: Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín (2007).

▪ **Escenario 4: “Escenario para el relleno sanitario El Guacal clausurado”**

Un último escenario es para el relleno sanitario clausurado. En este, se planteo un diseño para el relleno sanitario ya clausurado y se modelo el comportamiento hidrológico del mismo bajo unas condiciones climáticas iguales a las del escenario real. Las simulaciones para este escenario se hicieron para un período de tres años utilizando el mismo registro histórico de datos tomados por la estación pluviométrica del relleno sanitario.

4.4.2 Proceso de calibración

El modelo se intentó calibrar con los resultados de la modelación de la etapa operativa del relleno sanitario El Guacal. El proceso consistía, en validar los valores de cada una de las características de las capas que conforman el relleno sanitario. Inicialmente, los valores ingresados al modelo serían los tomados por defecto, y luego, se validarían hasta lograr que la serie simulada adquiriera un comportamiento parecido al de la “serie de caudales reales”.

4.4.3 Corridas para el modelo HELP

A continuación, se indican todas las corridas que se realizaron con el modelo HELP en base a los escenarios planteados:

- Corrida No. 1: simulación del relleno sanitario El Guacal para el escenario real, permitiendo que el modelo HELP caracterice las capas del relleno con los valores que este asigna por defecto.
- Corrida No. 2: simulación del relleno sanitario para el escenario real, pero evaluando los valores de los parámetros que caracterizan las capas del relleno. Estos valores se probaron con los datos de los ensayos de campo y con algunos valores establecidos en bibliografías.
- Corrida No. 3: simulación para la evaluación hidrológica del relleno sanitario El Guacal, bajo condiciones constructivas ideales.
- Corrida No. 4: simulación del relleno sanitario, ingresando al modelo datos de variables climáticas para una zona distinta en la cual se encuentra localizado el relleno sanitario El Guacal actualmente.
- Corrida No. 5: simulación para la evaluación del comportamiento hidrológico del relleno sanitario El Guacal ya clausurado.

4.4.4 Información utilizada

La información utilizada para la modelación se discrimina con relación a cada corrida del modelo.

Tabla 15. Información de clima utilizada para aplicación del modelo HELP

Corrida No.	Información de clima	
	Tipo de información	Fuente de información
1, 2 y 3	Precipitación diaria	Estación pluviométrica del relleno sanitario El Guacal. Período de registro: 05/01/06 -12/31/08. Los datos faltantes del período 01/01/06 – 04/31/06, fueron rellenos con los registros de la estación más cercana Astilleros (IDEAM) (1183957N - 823092E).
	Temperatura diaria	No se contaba con datos de temperatura diaria, solo con algunos registros de la estación meteorológica ubicada en el relleno sanitario El Guacal. Para estos datos, la temperatura media anual es de 12.7°C. Para ingresar datos diarios al modelo, se plantearon variaciones de la temperatura a nivel mensual del rango de los 2°C y se fijo el mismo valor del mes para cada día. Los valores promedios de la temperatura mensual corresponden a los 12.7°C.
	Radiación solar diaria	La estación meteorológica del relleno sanitario en estudio, no tenía una base de datos continua para los tres años de simulación 2006, 2007 y 2008. Los datos de radiación solar eran prácticamente escasos y a nivel del Valle de Aburrá no se cuenta con una estación que proporcione estos datos. Para aplicar este modelo se utilizaron los datos de la estación de Cenicafé.
4	Precipitación diaria	Se utilizaron tres años de registros de precipitación diaria de la estación Fabricato (1195470 N - 831500 E).
	Temperatura diaria	Valores de temperatura media anual del municipio de Bello: mapa de temperatura del proyecto POMCA (UNAL et al., 2007).
	Radiación solar diaria	Se utilizaron los datos de la estación de Cenicafé.
5	Precipitación diaria	Se utilizaron cinco (5) años de registros de la estación Astilleros (IDEAM) (1183957N - 823092E).
	Temperatura diaria	Se utilizaron los mismos datos de las corridas 1, 2 y 3.
	Radiación solar diaria	

Tabla 16. Información de diseño del relleno sanitario y datos de suelo

Corrida No.	Información de diseño del relleno sanitario

	Tipo de información	Fuente de información
1	Área del relleno sanitario	Informes de la firma encargada de la operación (ARES, 2008).
	% del área donde es posible la escorrentía	
	Humedad inicial	Datos del modelo por defecto.
	Profundidad de zona de evaporación	Se establecen inicialmente 10 cm.
	Velocidad del viento	Información de la estación meteorológica del relleno sanitario El Guacal.
	Tipo de capa, espesor, porosidad, capacidad de campo, conductividad hidráulica, especificaciones del drenaje, especificaciones técnicas de la geomembrana.	Datos del modelo por defecto.
2	Área del relleno sanitario	Informes de la firma encargada de la operación (ARES, 2008).
	% del área donde es posible la escorrentía	
	Humedad inicial	Datos de bibliografía: humedad característica de los residuos sólidos (Tchobanoglous, et al., 1999)
	Profundidad de zona de evaporación	Se establecen 10 cm.
	Velocidad del viento	Información de la estación meteorológica del relleno sanitario El Guacal.
	Tipo de capa, espesor, porosidad, capacidad de campo, conductividad hidráulica, especificaciones del drenaje, especificaciones técnicas de la geomembrana.	Informes del seguimiento constructivo y operativo del relleno sanitario El Guacal. Incluye resultados de ensayos de campo sobre densidad y permeabilidad.
3	Área del relleno sanitario	Informes de la firma encargada de la operación (ARES, 2008).
	% del área donde es posible la escorrentía	
	Humedad inicial	Datos de bibliografía: humedad

Corrida No.	Información de diseño del relleno sanitario	
	Tipo de información	Fuente de información
		característica de los residuos sólidos (Tchobanoglous, et al., 1999)
	Profundidad de zona de evaporación	Se establecen 10 cm.
	Velocidad del viento	Información de la estación meteorológica del relleno sanitario El Guacal.
	Tipo de capa, espesor, porosidad, capacidad de campo, conductividad hidráulica, especificaciones del drenaje, especificaciones técnicas de la geomembrana.	Datos del modelo por defecto.
	Área del relleno sanitario	Informes de la firma encargada de la operación (ARES, 2008).
4	% del área donde es posible la escorrentía	
	Humedad inicial	Datos de bibliografía: humedad característica de los residuos sólidos (Tchobanoglous, et al., 1999)
	Profundidad de zona de evaporación	Se establecen 10 cm.
	Velocidad del viento	Información de la estación meteorológica del relleno sanitario El Guacal.
	Tipo de capa, espesor, porosidad, capacidad de campo, conductividad hidráulica, especificaciones del drenaje, especificaciones técnicas de la geomembrana.	Informes del seguimiento constructivo y operativo del relleno sanitario El Guacal. Incluye resultados de ensayos de campo sobre densidad y permeabilidad.
5	Área del relleno sanitario	Informes de la firma encargada de la operación (ARES, 2008).
	% del área donde es posible la escorrentía	
	Humedad inicial	Datos del modelo por defecto.
	Profundidad de zona de evaporación	Se establecen 10 cm.
	Velocidad del viento	Información de la estación meteorológica del relleno sanitario El Guacal.
	Tipo de capa, espesor, porosidad, capacidad de campo, conductividad hidráulica,	Datos del modelo por defecto.

Corrida No.	Información de diseño del relleno sanitario	
	Tipo de información	Fuente de información
	especificaciones del drenaje, especificaciones técnicas de la geomembrana.	

4.5 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DEL MODELO HELP

En éste numeral se presentan los resultados de los cuatro escenarios propuestos para evaluar el comportamiento hidrológico de los caudales de lixiviados para el relleno sanitario El Guacal.

Cada escenario posee varias corridas del modelo y para cada una de estas corridas, se presentan los resultados de las series de caudales de lixiviados simuladas con el modelo HELP y se comparan estos resultados con la serie de caudales de lixiviados reales.

4.5.1 Resultados de los escenarios de modelación

▪ Resultados: escenario 1

Los resultados para este escenario corresponden a la simulación de los caudales de lixiviados para el vaso norte, durante la etapa operativa y conforme a los diseños constructivos realizados para este relleno sanitario (construcción y operación real).

Teniendo en cuenta la condición restrictiva del modelo HELP para evaluar un relleno sanitario en operación, se realizaron varias corridas para este escenario, cada una correspondía a un año de operación del relleno. A continuación se presentan los resultados de los años simulados y un resumen de los datos ingresados al modelo.

Corrida No. 1: en la Tabla 17 se presenta un resumen de los valores de cada una de las variables que el modelo HELP tomó por defecto para la simulación.

Tabla 17. Valores para las características de las capas – Corrida 1

CAPAS EN EL RELLENO	
Capa 1: Tipo 1 - capa de percolación vertical	
Número de textura del material 18 – Residuos sólidos	
Espesores	2006: 811 cm
	2007: 2,363 cm
	2008:3,000 cm
Porosidad	0.6710 vol/vol
Capacidad de campo	0.2920 vol/vol
Punto de marchitado	0.0770 vol/vol
Conte. Ini. Agua en suelo	0.3316 vol/vol
Cond. Hidra. Efectiva sat.	1.0 e-03 cm/seg
Capa 2: Tipo 2 - capa de percolación lateral	
Número de textura del material 21 - Grava	
Espesor	30.00 cm
Porosidad	0.3970 vol/vol
Capacidad de campo	0.0320 vol/vol
Punto de marchitado	0.0130 vol/vol
Conte. Ini. Agua en suelo	0.1952 vol/vol
Cond. Hidra. Efectiva sat.	0.3 cm/seg
Pendiente	1.50%
Largo de drenaje	215.0 m
Capa 3: Tipo 4 - membrana flexible	
Número de textura del material 35 – Geomembrana HDPE	
Espesor	0.15 cm
Porosidad	0.0
Capacidad de campo	0.0
Punto de marchitado	0.0
Conte. Ini. Agua en suelo	0.0
Cond. Hidra. Efectiva sat.	0.2 E-12 cm/seg

Al modelar las condiciones reales de conformación del relleno sanitario El Guacal para el año 2006, los resultados obtenidos con esta corrida, corresponden a una serie de caudal simulada con un comportamiento muy distinto a la serie de caudales reales. Para estos resultados, la serie simulada por el HELP es una serie que en la mayor parte del tiempo permanece por debajo de la serie real y completamente suavizada, en la cual no se presentan los picos que normalmente se pueden apreciar en cualquier serie de tiempo. En la Figura 36 se presenta el comportamiento las series de caudales de lixiviados.

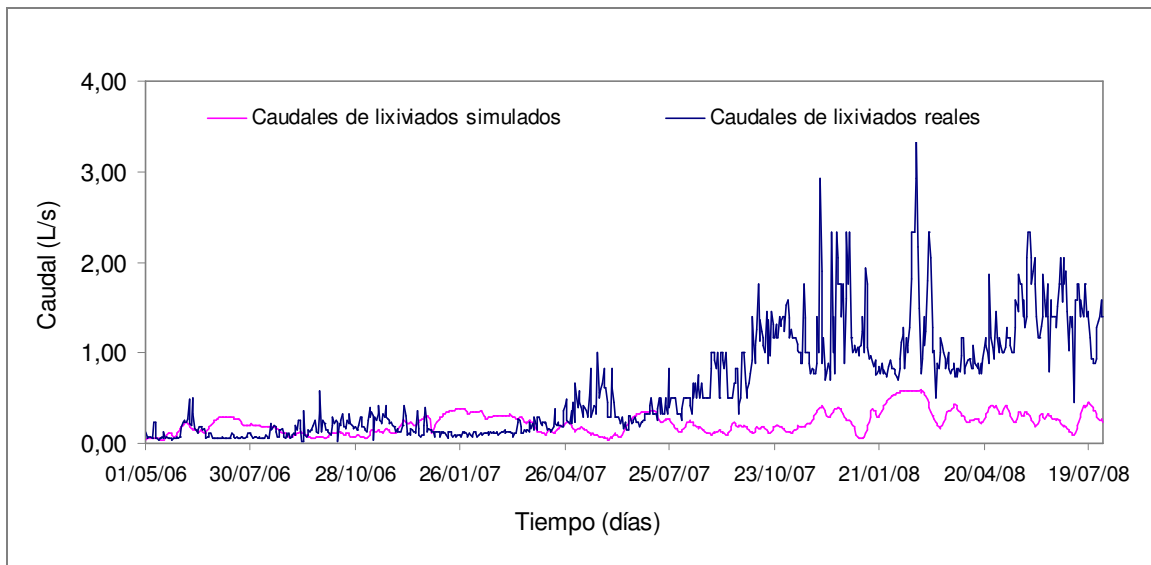


Figura 36. Caudales de lixiviados simulados por el HELP – Corrida No. 1
 Simulación con valores que el modelo toma por defecto
 Periodo de simulación (01/05/2008 – 31/12/2008)

Corrida No. 2: Para lograr que la serie simulada tomara un comportamiento parecido a una serie de tiempo, se probaron varios arreglos de capas, los cuales permitieron controlar el almacenamiento de agua en el interior del vertedero y las infiltraciones de agua de precipitación. Se optó entonces, por seleccionar de todos los arreglos de capas analizados, un conjunto de tres capas formado por: una capa 1 de drenaje vertical, la cual se ubicó encima de la capa de residuos sólidos (cobertura diaria), y cuyo objetivo era controlar las infiltraciones. Las capas de residuos sólidos y de grava, se simularon como una sola capa de drenaje horizontal, a la cual se le incluyó la longitud de los drenajes existentes en el fondo del relleno sanitario y la pendiente con que estos drenes fueron construidos. Finalmente, para controlar las fugas que el modelo tiende a simular, se reemplazó la línea de geomembrana por una capa de barrera de suelo de baja permeabilidad (arcilla) con un gran espesor. En la Tabla 18 se presenta un resumen de los valores dados a cada una de las características físicas de las capas simuladas para esta corrida. La Figura 37 presenta los resultados de la simulación para la corrida N.2 del escenario 1.

Tabla 18. Valores para las características de las capas – Corrida 2

CAPAS EN EL RELLENO	
Capa 1: Tipo 1 - capa de percolación vertical	
Número de textura del material 8 - Limo	
Espesor	30,00 cm
Porosidad	0.4630 vol/vol
Capacidad de campo	0.2320 vol/vol

Punto de marchitado	0.1160 vol/vol
Conte. Ini. Agua en suelo	0.3136 vol/vol
Cond. Hidra. Efectiva sat.	0.37E-03 cm/seg
Capa 2: Tipo 2 - capa de percolación lateral	
Número de textura del material 0 – Residuos sólidos	
Espesores	2006: 811 cm
	2007: 2,363 cm
	2008:3,000 cm
Porosidad	0.6710 vol/vol
Capacidad de campo	0.2920 vol/vol
Punto de marchitado	0.0770 vol/vol
Conte. Ini. Agua en suelo	0.3316 vol/vol
Cond. Hidra. Efectiva sat.	0.014 cm/seg
Longitud de drenaje	215 m
Pendiente del drenaje	1.5%
Capa 3: Tipo 3 - Barrera de suelo	
Número de textura del material 11 – Arcilla	
Espesor	1.0E05 cm
Porosidad	0.4640 vol/vol
Capacidad de campo	0.3100 vol/vol
Punto de marchitado	0.1870 vol/vol
Conte. Ini. Agua en suelo	0.4640 vol/vol
Cond. Hidra. Efectiva sat.	0.64 E-04 cm/seg

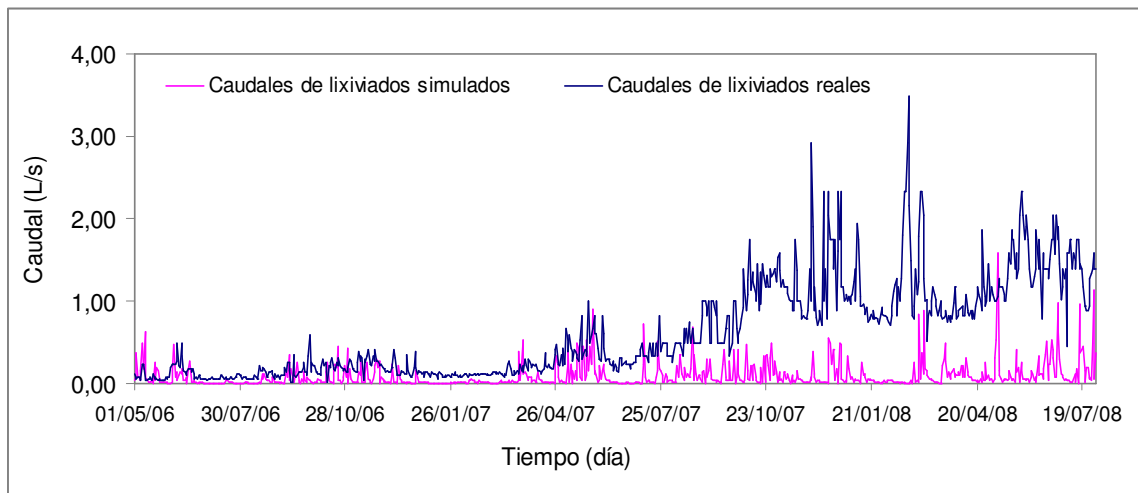


Figura 37. Caudales de lixiviados simulados por el HELP – Corrida No. 2
 Simulación con valores y conformación de capas asumido para mejorar la serie simulada
 Período de simulación (01/05/2008 – 31/12/2008)

Con la conformación de capas asumida para representara le diseño real del vaso norte del relleno sanitario El Guacal, se puede ver en la Figura 37 una serie simulada con un comportamiento muy parecido a la serie real; sin embargo, aunque gráficamente la serie

simulada tiene cierta semejanza con la real, se encontró que para un análisis de significancia estadística del 95%, la serie simulada no presenta ningún tipo de correlación con la serie real, lo cual permite establecer que el modelo para la etapa operativa del relleno sanitario, no logra representar la realidad. Esto está sustentado con las limitaciones que posee el modelo HELP para simular rellenos sanitarios activos.

▪ **Resultados: Calibración**

Realmente para este modelo y las condiciones del relleno sanitario El Guacal, no se puede hablar de una calibración real, ya que el modelo HELP está planteado para ser aplicado a rellenos sanitarios clausurados, y el relleno sanitario en estudio aún se está operando. Aunque el proceso operativo del relleno sanitario se simuló año a año, para cada periodo de tiempo, se tuvieron que fijar los espesores de las capas de residuos sólidos y su área; además se encontró que para la conformación real del relleno sanitario, los caudales obtenidos no representaban ningún comportamiento parecido a los caudales reales. Esto se justifica en el hecho de que los caudales reales del relleno sanitario El Guacal están completamente influenciados por el crecimiento de las capas de residuos sólidos en el tiempo, y la ampliación del fondo del vaso norte, lo cual permite que sea mucho mayor el área que está expuesta a la lluvia y por ende van a ser mayores las infiltraciones de agua que dan origen a la formación de los lixiviados. Por otro lado, en el modelo HELP es siempre un área fija por un tiempo mínimo de un año (periodo mínimo que requiere el modelo para realizar las simulaciones) la que está expuesta a la precipitación y a los efectos de las condiciones climáticas. Por lo cual, son las condiciones de permeabilidad, porosidad, capacidad de campo y punto de marchites de cada una de las capas que conforman el relleno sanitario, las que controlan el flujo en el interior del relleno sanitario y la percolación de los lixiviados.

En la corrida 2 de este modelo, se logró encontrar un arreglo de capas que permitió generar una serie de caudales de lixiviados con una señal muy parecida a la serie real (ver Figura 37 y Tabla 18); sin embargo esta conformación de capas no era precisamente igual a la existente en el relleno sanitario; pero permitió controlar los efectos de la infiltración y la escorrentía superficial que con la conformación real no era posible.

Para efectos de una mejor calibración del modelo HELP, se considera que lo factible es aplicarlo para el relleno sanitario clausurado.

▪ **Resultados: escenario 2 y 3**

Se consideró que no era justificable para la simulación de los escenarios 2 y 3 aplicar este modelo sin calibrar; ya que el objetivo de estos escenarios era evaluar el comportamiento de los caudales de lixiviados reales durante la etapa operativa, bajo diferentes

condiciones climáticas y de diseño. Al no lograr que el modelo HELP representara el comportamiento real de los caudales de lixiviados, no fue posible poder analizar la influencia de la precipitación y la forma constructiva del relleno sanitario en la generación de los caudales reales.

▪ **Resultados: escenario 4**

En vista de que el modelo HELP es esencialmente planteado para rellenos sanitarios clausurados, este se aplicó para este escenario a pesar de no estar calibrado para la etapa operativa. El principal objetivo de este escenario fue estimar a futuro la generación de caudales de lixiviados para cuando el relleno sanitario se encuentre clausurado.

La conformación de las capas para este escenario se planteó teniendo en cuenta las especificaciones técnicas requeridas para garantizar una buena clausura de un relleno sanitario (Qian et al., 2002). Los valores de las características de las capas fueron tomadas de los datos que el modelo contiene para cada tipo de suelo. Se utilizaron tres años de registros climáticos para modelar los efectos de las variables climáticas en la generación de lixiviados. Para simular este escenario se asumió que el relleno sanitario se encontraba clausurado para el año 2009. La modelación se realizó hasta el año 2011. En la Tabla 19 se presenta un resumen de la conformación de las capas y los valores correspondientes a cada una de sus características. La Figura 38, presenta la serie de caudales simulada para la clausura del relleno sanitario relacionada con la precipitación del periodo de simulación de este escenario.

Tabla 19. Valores para las características de las capas – Escenario 4 (Corrida No. 5)

CAPAS EN EL RELLENO	
Capa 1: Tipo 1 - capa de percolación vertical	
Número de textura del material 9 - Cobertura vegetal	
Espesor	30,00 cm
Porosidad	0.5010 vol/vol
Capacidad de campo	0.2840 vol/vol
Punto de marchitado	0.1350 vol/vol
Conte. Ini. Agua en suelo	0.3071 vol/vol
Cond. Hidra. Efectiva sat.	0.19E-03 cm/seg
Capa 2: Tipo 1 - capa de percolación lateral	
Número de textura del material 34 - Capas de geocompuestos	
Espesor	20,00 cm
Porosidad	0.8500 vol/vol
Capacidad de campo	0.0100 vol/vol
Punto de marchitado	0.0050 vol/vol
Conte. Ini. Agua en suelo	0.0122 vol/vol
Cond. Hidra. Efectiva sat.	0.33E02 cm/seg

CAPAS EN EL RELLENO	
Longitud de drenaje	215 m
Pendiente del drenaje	1.5%
Capa 3: Tipo 3 - Línea de geomembrana	
Número de textura del material 35 - Geomembrana HPDE	
Espesor	0,15 cm
Porosidad	0.0
Capacidad de campo	0.0
Punto de marchitado	0.0
Conte. Ini. Agua en suelo	0.0
Cond. Hidra. Efectiva sat.	0.19 E-12 cm/seg
Capa 4: Tipo 1 - capa de percolación vertical	
Número de textura del material 5 - Capa de suelo compuesta	
Espesor	20,00 cm
Porosidad	0.4570 vol/vol
Capacidad de campo	0.1310 vol/vol
Punto de marchitado	0.0580 vol/vol
Conte. Ini. Agua en suelo	0.1310 vol/vol
Cond. Hidra. Efectiva sat.	0.10E-02 cm/seg
Capa 5: Tipo 1 - capa de percolación vertical	
Número de textura del material 0 - Residuos sólidos	
Espesor	3000.00 cm
Porosidad	0.6710 vol/vol
Capacidad de campo	0.2920 vol/vol
Punto de marchitado	0.0770 vol/vol
Conte. Ini. Agua en suelo	0.2920 vol/vol
Cond. Hidra. Efectiva sat.	0.14E-01 cm/seg
Capa 6: Tipo 1 - capa de percolación lateral	
Numero de textura del material 31 - Grava	
Espesor	30,00 cm
Porosidad	0.3970 vol/vol
Capacidad de campo	0.0320 vol/vol
Punto de marchitado	0.0130 vol/vol
Conte. Ini. Agua en suelo	0.0320 vol/vol
Cond. Hidra. Efectiva sat.	0.30 cm/seg
Longitud de drenaje	215 m
Pendiente del drenaje	1.5%
Capa 7: Tipo 3 - Línea de geomembrana	
Número de textura del material 35 - Geomembrana HPDE	
Espesor	0,15 cm
Porosidad	0.0
Capacidad de campo	0.0
Punto de marchitado	0.0
Conte. Ini. Agua en suelo	0.0
Cond. Hidra. Efectiva sat.	0.19 E-12 cm/seg

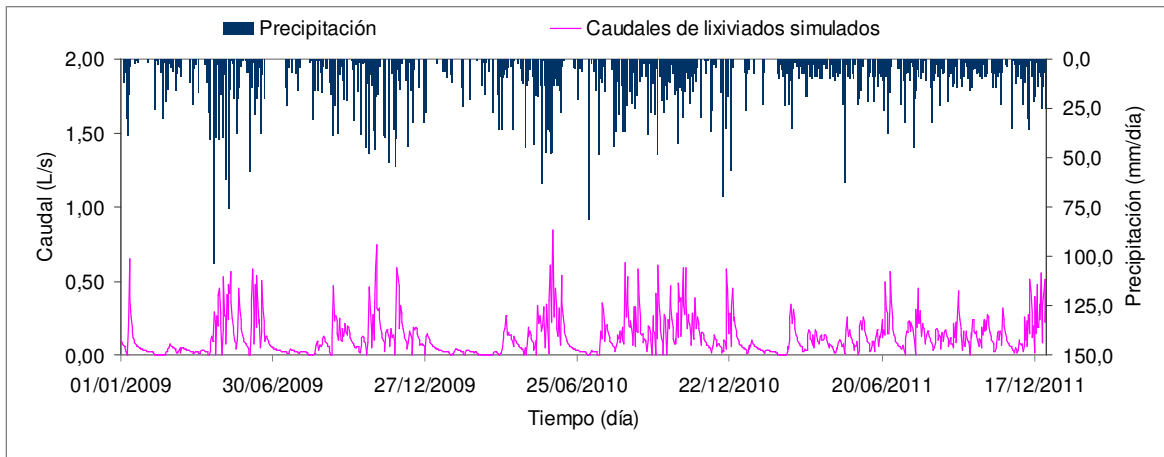


Figura 38. Caudales de lixiviados simulados por el HELP – Escenario 4 (Corrida No.5) Simulación para el relleno sanitario clausurado. Periodo de simulación (01/01/2009 – 31/12/2011)

De acuerdo con la figura anterior, los caudales de lixiviados simulados para la clausura del relleno sanitario El Guacal (vaso norte) no exceden la magnitud de 0.84 L/s, presentándose este valor para mediados del año 2010. Los caudales en sí se mantienen en un rango entre 0.01 – 0.84 L/s, cuyos valores máximos y mínimos llegan a estar relacionados con la precipitación. De acuerdo con la conformación de las capas o cobertura final, se esperaría que el relleno sanitario no deje pasar agua como infiltración; sin embargo, el modelo HELP considera que se pueden presentar algún tipo fugas a través de la cubierta, lo cual implica la percolación del agua lluvia y por consiguiente la respuesta de los caudales asociada a los eventos de precipitación. Vale la pena aclarar que este escenario se simuló bajo el supuesto de que el relleno sanitario sería clausurado bajo las condiciones planteadas en la Tabla 19; sin embargo, se considera conveniente llevar a cabo la calibración de este modelo para las condiciones de posclausura.

5. MODELO DE BALANCE HÍDRICO PARA ESTIMACIÓN DE CAUDALES DE LIXIVIADOS EN UN RELLENO SANITARIO

5.1 INTRODUCCIÓN

El método que se ha venido utilizando para estimar la generación de caudales de lixiviados en los rellenos sanitarios, es el método de balance hídrico, método para el cual se han desarrollado muchos modelos hidrológicos y otros que incorporan la biodegradación de los residuos como un factor determinante en la producción de lixiviados durante las diferentes edades del relleno (modelos descritos en el Capítulo 2, Numeral 2.3).

La mayoría de los modelos hidrológicos de balance hídrico para rellenos sanitarios considerados en éste trabajo, realizan la estimación de los caudales de lixiviados mediante balances en cada capa del relleno, teniendo en cuenta las variables climáticas de la zona de localización del vertedero, las características hidráulicas de los materiales utilizados para la conformación de las capas, las condiciones de humedad inicial del suelo y de los residuos, la capacidad de almacenamiento de humedad de las capas y otras características de carácter constructivo del relleno.

Con relación a la escala temporal y espacial, estos modelos consideran en su mayoría la escala diaria para el balance hídrico, caso para el cual las variables climáticas como la precipitación, radiación solar y temperatura, son ingresadas a los modelos en una resolución diaria, con el fin de calcular los efectos de las mismas sobre el suelo (evapotranspiración, evaporación, escorrentía superficial, etc.) a igual resolución temporal. Teniendo en cuenta dichas variables y las condiciones hidráulicas y de humedad de las capas del relleno, estos modelos realizan los balances hídricos capa a capa para calcular en forma diaria la aparición y cantidad de lixiviados para el relleno. Espacialmente, estos modelos tienen en cuenta el área del relleno que interviene en los balances hídricos y pueden considerar un número de capas “x” si el relleno está en operación, es decir desde la capa inferior (puede ser la capa de protección del fondo ó los filtros) hasta la capa existente en la fase operativa actual del relleno; ó el número de capas “x” que conforman el relleno sanitario ya clausurado.

Realmente, estos modelos estiman la formación y aparición de los lixiviados, teniendo en cuenta como mínimo la presencia de capas de residuos en el relleno, es decir,

estimaciones durante la fase operativa del vertedero, o todas las capas del relleno si éste se encuentra en la fase de clausura. Visto de esta forma, la fase constructiva del relleno sanitario, que es durante la cual se adecua la cavidad y fondo del relleno, se construyen los sistemas de filtros de recolección de lixiviados y se conforman las primeras capas de suelo y geomembranas, previo a la conformación de capas de residuos; no se tiene en cuenta por parte de estos modelos para realizar balances hídricos que permitan estimar el flujo que entra y sale del relleno en dicha fase (agua proveniente de la precipitación, escurrimientos de los taludes o laderas del relleno).

De acuerdo con el anterior, es importante considerar que todas las fases del relleno son importantes para realizar la estimación de los volúmenes de lixiviados que se generan en cada una de la etapas, ya que técnicamente los sistemas de tratamiento de estos líquidos deben estar adecuados para manejar la cantidad y composición los aportes de líquidos que se producen durante la construcción, operación y clausura del relleno.

Es así, como en éste capítulo, se desarrolló un modelo hidrológico de balance hídrico para un relleno sanitario, el cual realiza la estimación de los lixiviados y aportes de agua por etapas: constructiva, operativa y clausura. Éste modelo se aplicó bajo unas condiciones constructivas y operativas reales e ideales para el relleno sanitario EL Guacal, y, posteriormente, para un escenario en el cual el relleno se encuentra clausurado.

Igualmente, después de evaluado el modelo, éste se aplica para un escenario de condiciones climáticas distintas a las de la zona de localización del Centro Industrial del Sur (CIS) – El Guacal, con el fin de analizar la influencia de la precipitación en la generación de los lixiviados.

La finalidad de realizar mediante éste modelo, el balance hídrico en todas las etapas del relleno, se fundamenta en la importancia de considerar, antes, durante y después de la disposición de los residuos, los efectos de la precipitación y la forma constructiva y operativa del relleno en la producción de los lixiviados.

De otra parte, el modelo se plantea como una herramienta de fácil operación y aplicación para estimar de acuerdo a la evolución de un relleno sanitario los caudales de lixiviados a generarse; su variación en el tiempo y la influencia de las variables climáticas y características físicas de los residuos en los mismos. Además, permite analizar las condiciones de caudales extremos, medios y mínimos para los lixiviados, a fin de realizar de forma adecuada los diseños de las estructuras hidráulicas necesarias para la recolección, transporte y almacenamiento de los lixiviados.

El modelo de balance hídrico por etapas tiene dos fundamentos: primero, el modelo conceptual de los métodos generales de estimación de volúmenes de lixiviados

desarrollados para rellenos sanitarios, los cuales calculan los aportes de humedad de una capa a otra, dentro del relleno, hasta llegar al sistema de recolección de lixiviados, donde, finalmente se estiman los caudales de lixiviados que se producen en el relleno sanitario. El planteamiento conceptual de estos modelos se presenta en el Capítulo 2, Numeral 2.3.1.

En la Figura 39 se presenta el esquema del modelo conceptual general de la mayoría de los modelos de balance hídrico para rellenos sanitarios.

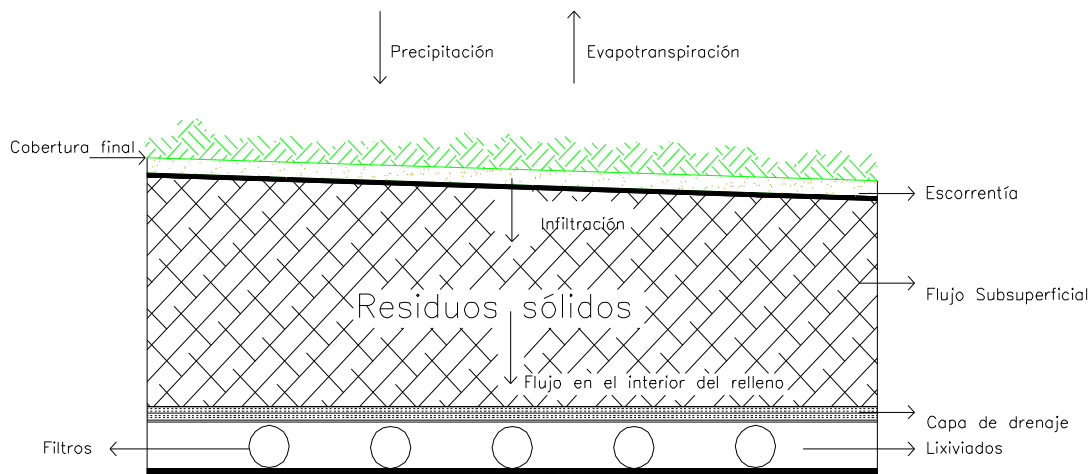


Figura 39. Esquema del modelo conceptual general de balance hídrico en rellenos sanitarios

El segundo fundamento de éste modelo, es el modelo simplificado de tanques estudiado por (Vélez, 2001), el cual es uno de los métodos que se han venido implementando en los últimos años para la estimación de caudales en cuencas con información escasa.

El modelo busca representar por medio de un sistema de tanques interconectados entre sí los procesos determinantes de la producción de la escorrentía: interceptación, detención, infiltración, evaporación y evapotranspiración, la escorrentía subsuperficial, recarga del acuífero, retorno del flujo base y flujo en los canales de la red de drenaje.

Específicamente el modelo propuesto, retoma del modelo de tanques de Vélez (2001), el planteamiento de que para cada tanque (los cuales representan para éste caso, cada capa del relleno) existen unas entradas de agua, unas salidas y unos almacenamientos.

En la Figura 40 se presenta el esquema conceptual del modelo de tanques estudiado por Vélez (2001). En esta figura se presentan las variables que hacen parte del balance hídrico, donde las X_i , D_i y Y_i representan el agua disponible, las entradas y las salidas de agua respectivamente; las H_i representan en cada tanque los almacenamientos de agua

día a día; finalmente la variable H_U , representa el almacenamiento máximo de agua para el tanque 1.

La descripción detallada de cada una de las variables, los tanques y las ecuaciones de balance, están contenidas en (Vélez, 2001).

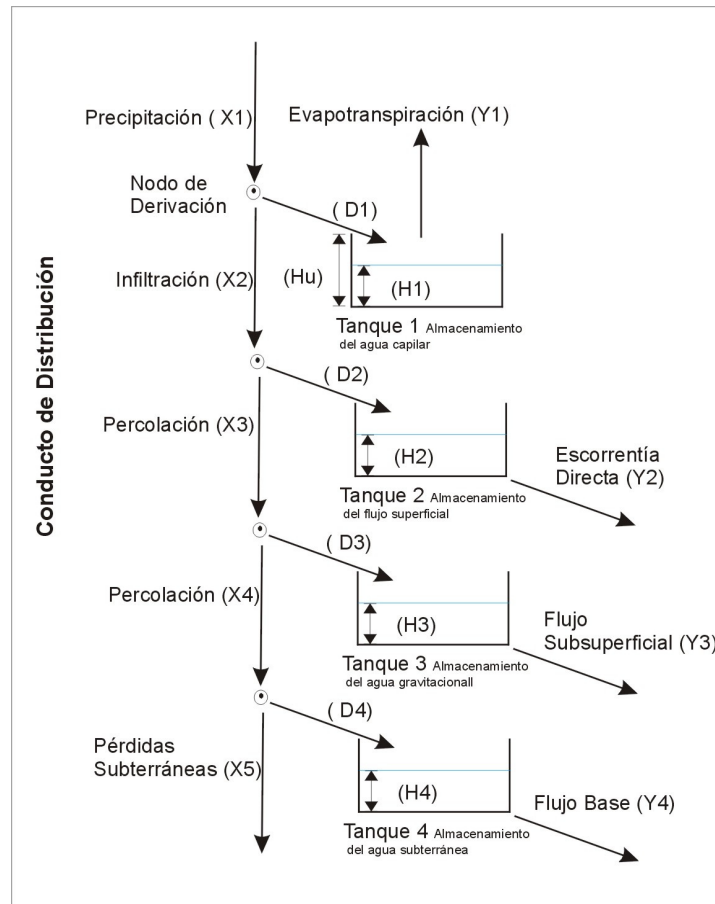


Figura 40. Esquema conceptual del modelo de tanques
Fuente: Vélez (2001).

En resumen, de éste modelo se conserva: la representación de los procesos que ocurren en el relleno sanitario mediante tanques de almacenamiento, es decir a “grosso modo”: un tanque que represente la entrada de agua por precipitación y la salida por evaporación o evapotranspiración (cuando hay cobertura vegetal); otro tanque donde se represente el paso de agua al interior del relleno sanitario por infiltración y la salida de agua por percolación y finalmente un tanque donde se represente la salida del lixiviado. Esta explicación corresponde al hecho de que el relleno sanitario éste en operación; sin embargo, como el modelo propuesto pretende estimar aportes de líquidos desde la construcción del relleno sanitario; igualmente conserva la representación de los procesos que ocurren en cada etapa del relleno mediante un conjunto de tanques interconectados

entre sí. El número de tanques depende de los procesos que ocurren en cada etapa del relleno sanitario.

5.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El modelo, a diferencia de los otros modelos hidrológicos para rellenos sanitarios, tiene la finalidad de estimar valores de caudales de lixiviados y/o escorrentía a una resolución temporal diaria en cada una de las etapas del relleno, es decir, desde que se inicia la construcción del relleno hasta después de su clausura. Por medio de un conjunto de etapas, el modelo busca representar la evolución constructiva y operativa del relleno y los procesos determinantes en los aportes de líquidos: escorrentías; aportes y retención de humedad; evaporación; evapotranspiración; infiltración; variación de la conductividad de hidráulica de las capas; flujo en el interior del vertedero y percolación. Estos procesos se consideran desde la adecuación del sitio para la puesta en marcha del relleno hasta el cierre del mismo.

La representación de cada uno de estos procesos, se realiza mediante las ecuaciones de balance de masa para cada una de las capas del relleno, desde la capa superficial (si el relleno no está clausurado) o desde la cobertura final hasta el sistema de recolección de lixiviados.

Las ecuaciones de balance son planteadas en el modelo de acuerdo a la etapa en que se encuentre el relleno; y estas estiman a partir de los datos de entrada, la generación de lixiviados en un intervalo de tiempo establecido.

En el modelo, la estimación de la cantidad de estos líquidos se basa en la realización de balances hídricos etapa por etapa, estableciéndose para la modelación cuatro etapas para analizar las variaciones de los caudales de lixiviados y/o escorrentías a lo largo de todo el proceso evolutivo del relleno sanitario.

Cada etapa representa una condición de evolución del relleno sanitario y lo que ocurre en una etapa es tenido en cuenta en la etapa siguiente, siendo el modelo de esta forma, un acoplamiento de los diferentes balances hídricos que se dan etapa por etapa. Cada proceso que ocurre en los balances de cada etapa, es representado como un tanque i , donde se interconectan las salidas de éste tanque con las entradas a un tanque $i+1$, dando como resultado para cada etapa, un conjunto de tanques que modelan la entrada del agua al relleno, su recorrido, almacenamiento y su salida como lixiviado o escorrentía de agua lluvia cuando no se ha iniciado la disposición de los residuos sólidos.

Antes de describir más a fondo el planteamiento conceptual del modelo y las ecuaciones de balance hídrico para cada etapa, es conveniente realizar una descripción general de cada etapa y los procesos de se dan en cada una de estas:

Etapa 0 - Adecuación del vaso o pits: corresponde a la conformación de la cavidad o vaso de disposición, mediante obras como cortes de tierra, nivelación, compactación del fondo; también se inicia la preparación del terreno para la construcción de los sistemas de drenaje y filtros.

Durante esta etapa no hay presencia de lixiviados debido a que no se ha iniciado la disposición de los residuos sólidos; sin embargo, la incorporación de esta etapa en el modelo reviste de importancia desde el punto de vista ambiental; ya que los balances hídricos durante esta fase del relleno sanitario estiman las escorrentías de aguas lluvias generadas por el vaso de disposición, el cual al ser construido interviene las condiciones de drenaje natural que se daban en la zona de localización del relleno antes de su construcción. Es importante considerar que los aportes de escorrentía del vaso durante la Etapa 0 van acompañados de sedimentos; y su estimación (caudales de escorrentía) es importante para cuantificar los aportes a la red de drenaje natural y para diseñar estructuras para el manejo de aguas lluvias durante la etapa de operación del relleno sanitario.

En esta etapa se representan los procesos de evaporación, escorrentía directa, escorrentía subsuperficial y aportes al agua subterránea; éste último proceso ocurre cuando el fondo del vaso se encuentra descubierto, es decir cuando aún no se ha impermeabilizado.

Las entradas, almacenamientos y salidas de agua se representan en cuatro tanques, los cuales serán definidos más adelante.

Etapa 1 – Conformación del fondo, sistema de drenajes y filtros: en ésta parte de la fase constructiva del relleno sanitario se realiza la impermeabilización de todo el vaso o pits, mediante la instalación de geomembranas y/o conformación de capas de suelo con baja permeabilidad (arcillas).

Para efectos de la modelación se considera bajo los aspectos técnicos y ambientales de una adecuada construcción de un relleno sanitario, que toda el área necesaria para la disposición de los residuos sólidos debe estar impermeabilizada para evitar infiltraciones de lixiviados y posterior contaminación de los almacenamientos de agua subterráneas. Visto de esta forma, en esta etapa, que se espera sea de corta duración, se representan la entrada de agua al vaso, las salidas del vaso por evaporación y los aportes directos de agua por escorrentía; en caso de considerar fallas en la impermeabilización del vaso, se

pueden representar con otros tanques, las infiltraciones y aportes a los almacenamientos de agua subterránea.

En esta etapa también se considera la existencia de los sistemas de encauzamiento, drenaje y evacuación de las entradas de agua en el vaso. Durante esta etapa se modela la cantidad de agua que puede salir por una capa de drenaje, dado el caso en que se utilice material de grava. Igualmente, se representa el flujo de agua a través de las capas de drenaje y las tuberías de filtro.

Los procesos que se dan en esta etapa y que hacen parte del balance hídrico de la misma, se representan en un conjunto de tres tanques.

Etapa 2 - Operación del relleno sanitario: en ésta etapa se realiza la conformación de la capa de residuos sólidos mediante la construcción de celdas diarias, las cuales son cubiertas diariamente con materiales de suelo o materiales sintéticos, con el fin de aislar los residuos de los efectos del medio ambiente y viceversa. Pueden existir casos en los cuales no se utilicen las coberturas diarias permanentes.

Esta etapa es considerada las más importantes, ya que durante la operación del relleno sanitario el agua que ingresa en el vaso entra en contacto con los residuos sólidos y sumada a los aportes de humedad por parte de los residuos, da origen a los lixiviados.

De forma general, en esta etapa el balance hídrico considera las entradas de agua por parte de la precipitación y los aportes de humedad contenida en la basura. Además, representa los procesos de: evaporación del agua en la parte superficial de la capa de residuos que se encuentra expuesta a los efectos de la temperatura ambiente y la radiación solar; el flujo en el interior del vertedero; los almacenamientos o retención de agua por parte de las capas de residuos sólidos; y las salidas de agua (lixiviados) a través de las capas de residuos y de las capas de drenajes y sistema de filtros. Estos procesos son representados mediante un conjunto de tres tanques.

Etapa 3 – Clausura y posclausura del relleno sanitario: se realiza el cierre total del vaso o pits de disposición de residuos sólidos. La cobertura final establece primeramente la colocación de una capa de baja permeabilidad o cobertura sintética, con el fin de controlar las infiltraciones de agua lluvia; finalmente, se acondiciona una capa vegetal como cobertura de cierre del relleno sanitario.

En esta etapa se adiciona un balance hídrico más al sistema, en el cual se consideran los procesos dados en la cobertura final del vertedero. Para éste caso, se estima a partir de las entradas de agua, las salidas en forma de: evapotranspiración; escorrentía superficial directa; escorrentía subsuperficial, es decir el agua que logra ingresar a la parte superior de la capa vegetal pero que luego de transitar por esta sale en forma de flujo

susbsuperficial. También se estima un posible ingreso de agua al relleno sanitario, es decir el agua que logra traspasar la cobertura final del relleno sanitario.

Para la parte interior del relleno sanitario, en esta etapa se estiman las variaciones de los caudales de lixiviados luego de estar clausurado. Los procesos de flujo en el interior del relleno siguen siendo los mismos que se plantearon en la etapa 3, solo que se establece, que las salidas de agua como lixiviados, están en función de los almacenamientos que quedaron presentes hasta el momento en que se inició la cobertura final del relleno.

5.2.1 Variables y parámetros que considera el modelo

Antes de explicar el modelo conceptual se hace necesario describir las variables, parámetros, métodos de solución y planteamientos que el modelo considera para los balances hídricos en cada una de las etapas del relleno sanitario.

Las variables a considerar son las climáticas y las relacionadas con el diseño del relleno sanitario; los parámetros a los cuales se refiere el modelo corresponden a las características físicas de las capas de suelo y de los residuos sólidos.

▪ Variables climáticas

Las variables climáticas que el modelo considera son la precipitación diaria, la temperatura media mensual y la radiación solar del sitio de localización del relleno sanitario. Con estas variables el modelo calcula la evaporación o evapotranspiración potencial y real.

Los datos de estas variables pueden ser tomados de la estación más cercana al relleno sanitario o de una estación propia, si el relleno la posee.

La precipitación es la variable más importante en un balance hídrico para la estimación de caudales de lixiviados, ya que representa la principal entrada de agua al relleno sanitario e influye determinante en la cantidad de producción de lixiviados durante la etapa operativa del relleno. Igualmente, representa el mayor aporte de agua por escorrentía directa durante la fase constructiva y de clausura del relleno sanitario.

El modelo considera la estimación de la evaporación cuando el relleno sanitario aún no se ha clausurado, es decir cuando no hay presencia de coberturas vegetales en el mismo; de lo contrario, se estiman las salidas de agua hacia la atmósfera por evapotranspiración.

La evaporación o evapotranspiración potencial es calculada mediante la ecuación de Turc modificado para una humedad relativa media mensual superior al 50%. Esta ecuación es presentada en Vélez (2004):

$$EVP = K \left(\frac{T}{T + 15} \right) (R_g + 50) \quad (4.1)$$

Donde:

K: constante con valores mensuales de acuerdo al número de días del mes (0.40)

T: temperatura media mensual (°C)

R_g: radiación global incidente (cal/cm²/día)

Con relación a esta variable: la precipitación es tomada en cuenta para determinar la salida de agua por evaporación, a partir del agua que queda retenida (parte de la lluvia) en la superficie de la capa de suelo o residuos sólidos presente en el relleno sanitario y que esta expuesta a la intemperie. El planteamiento para determinar la salida de agua por evaporación se explica en los métodos de solución y planteamientos del modelo.

Teniendo en cuenta las salidas de agua por evaporación o evapotranspiración, los procesos hidrológicos de escorrentía, infiltración y percolación, se estiman considerando el agua disponible después de darse la evaporación y las características de los materiales de las capas presentes en el relleno sanitario. Estos procesos se explican en el numeral 5.2.2 correspondiente al modelo conceptual.

▪ **Caudales de lixiviados**

El modelo requiere los registros de caudales diarios de lixiviados medidos durante la operación del relleno sanitario, éste dato es necesario para efectos de la calibración del modelo para la etapa operativa.

▪ **Diseño del relleno sanitario**

Con relación al diseño, el modelo requiere conocer de acuerdo a la etapa en que se encuentra el relleno sanitario: el área que puede producir escorrentía directa; el área total y del fondo del relleno sanitario; el tipo y dimensiones de las capas que están presentes en el relleno sanitario (capas de impermeabilización, capas de drenaje, filtros, residuos sólidos, etc.); el orden de conformación de las capas; la cantidad de residuos sólidos que ingresan diariamente al relleno sanitario y el proceso operativo del mismo; éste último se refiere a: la forma como se disponen los residuos sólidos en el relleno sanitario y al número y geometría de las zonas de disposición de los residuos, lo cual determina como es el crecimiento en área y altura de las celdas de residuos sólidos. Finalmente, es

necesario conocer el diseño del relleno sanitario ya clausurado, con el fin de modelar los balances hídricos durante la etapa de clausura.

En conclusión, es necesario establecer el esquema del perfil del relleno sanitario con relación a la etapa correspondiente. Estos esquemas deben describir de forma clara el diseño, conformación y orden de las capas del relleno sanitario.

▪ **Parámetros : características de las capas de suelo y residuos sólidos**

Las capas que pueden estar presentes en el relleno sanitario con relación a la etapa evolutiva del mismo son: capa de suelo del fondo del relleno sanitario; capa de impermeabilización del fondo del relleno; capa de drenaje vertical, que generalmente son gravas; las líneas de filtros; capa de residuos sólidos; capas de coberturas diarias de residuos sólidos, las cuales pueden ser temporales o permanentes; la capa cierre del relleno sanitario y la cobertura de suelo vegetal o capa final.

A continuación se explican cada uno de los parámetros que el modelo considera con relación a cada tipo de capa.

- Para la capa de suelo del fondo del relleno, la capa de cobertura de suelo vegetal y la capa drenaje vertical, el modelo requiere de los siguientes parámetros:

Capacidad máxima de almacenamiento de agua para evaporación (Hu): éste parámetro es dado solo para la capa que está expuesta a los efectos de la temperatura y radiación solar del medio. De acuerdo con Vélez (2001), esta capacidad es igual a la suma de la capacidad de almacenamiento de “agua útil” en el suelo y la capacidad de la cobertura de la superficie para almacenar agua. La capacidad de almacenamiento de “agua útil” está relacionada con la cantidad de agua que hay que agregar a una columna de suelo muy seco hasta alcanzar el mayor almacenamiento capilar posible, sin que el agua fluya por la acción de la gravedad. La capacidad de la cobertura de la superficie por lo general está relacionada con la cobertura vegetal; sin embargo, si la capa de suelo no presenta cobertura vegetal, éste parámetro se refiere solo a la capacidad de almacenamiento de agua por parte del suelo y que puede ser extraída por evaporación del fondo del relleno sanitario. El almacenamiento es dado en mm de agua y su valor se establece inicialmente en el modelo y es validado durante la calibración del modelo.

Condiciones iniciales de Humedad (Hi): se refiere a la humedad inicial presente en la capa. Para el caso del almacenamiento de agua para evaporación en la superficie del suelo, éste valor se establece como un valor muy mínimo con relación al Hu; y para el interior de la capa, los valores iniciales de humedad pueden ser dados como ceros. Igualmente que para Hu, los Hi son dados en mm de agua y son validados durante la calibración del modelo.

Los almacenamientos iniciales H_i , con relación al proceso hidrológico que el modelo representa en cada tanque se definen como: humedad inicial para almacenamiento capilar (evaporación o evapotranspiración); humedad inicial para almacenamiento de agua superficial (es tenido en cuenta si ocurre escorrentía directa); humedad inicial en la parte subsuperficial de la capa (es tenido en cuenta si ocurre escorrentía subsuperficial); humedad inicial en el interior de la capa (para infiltración o percolación).

Conductividad hidráulica (K_s): esta característica esta relacionada con la capacidad que tiene el suelo u otro material de dejar pasar agua a través del mismo. Inicialmente, en el modelo se tienen en cuenta las conductividades medidas numéricamente por medio del coeficiente de permeabilidad K o permeabilidad de Darcy.

La conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad está influenciado por las características del medio o del material de la capa, tales como: porosidad, tamaño de las partículas, relación de vacíos, composición, viscosidad y peso específico del fluido que pasa a través del medio (Schroeder et al., 1994).

En el modelo se consideran inicialmente los valores de conductividad hidráulica saturada para los diferentes materiales de las capas. Estos valores son tomados de Schroeder et al. (1994) y son el resultado de la aplicación de la ecuación de Darcy que relaciona las características del medio y las del fluido (Freeze y Cherry, 1979; citado en Schroeder et al., 1994):

$$K_s = \left(\frac{g}{\nu} \right) C d^2 \quad (4.2)$$

Donde:

K : conductividad hidráulica saturada en (cm/s)

g : gravedad (cm/s²)

ν : viscosidad cinemática del fluido (cm²/s)

C : constante de proporcionalidad dada en función de la porosidad

d : diámetro de la partícula (cm)

Los valores de éste parámetro son ingresados al modelo en mm/día y son validados durante la calibración del modelo.

De acuerdo con el proceso hidrológico que el modelo representa en cada tanque se consideran las siguientes conductividades hidráulicas: conductividad hidráulica de la parte

superior de la capa (infiltración) y conductividad hidráulica en la parte inferior de la capa (percolación).

Tiempo de residencia (T_R): éste parámetro hace referencia al tiempo de viaje del agua a través de la capa y es estimado en función de la conductividad hidráulica y el espesor de la capa. Éste parámetro dado en días es utilizado para estimar la cantidad de agua que puede salir de las capas del relleno sanitario.

De acuerdo con Vélez (2001), la salida de agua de las capas esta dado por un coeficiente de descarga α , el cual es en función del tiempo de residencia del agua en el interior de las capas.

$$\alpha = \frac{1}{T_R} \quad (4.3)$$

α es dado en unidades de día^{-1} . De acuerdo con la expresión anterior el tiempo de residencia se expresa como:

$$T_R = \frac{h}{K} \quad \text{ó} \quad \frac{1}{T_R} = \frac{K}{h} \quad (4.4)$$

Donde:

h: altura o espesor de la capa (mm)

K: conductividad hidráulica de la capa (mm/días)

- Para los residuos sólidos presentes en el relleno sanitario el modelo requiere de las siguientes características y parámetros:

Densidad de compactación de los residuos sólidos: esta característica sirve para determinar en el modelo la altura de los residuos sólidos dentro de las zonas de disposición de residuos y el contenido de humedad de agua en los residuos sólidos. Estas variables se explican más adelante.

La densidad de compactación es requerida en Kg/m^3 y su valor se puede tomar de los resultados de ensayos de campo. Los valores utilizados en el modelo son evaluados considerando los rangos establecidos por Fassett et al. (1994) presentados en Palma et al. (2004):

Tabla 20. Valores de densidades de acuerdo al grado de compactación

Densidades	Mala compactación	Compactación moderada	Buena compactación
Rango de densidad total (Ton/m ³)	0.30 – 0.94	0.52 – 0.78	0.89 – 1.07
Promedio de densidad total (Ton/m ³)	0.54	0.70	0.97
Rango de densidad seca (Ton/m ³)	0.19 – 0.35	0.35 – 0.54	
Promedio de densidad seca (Ton/m ³)	0.27	0.46	

Fuente: Fassett et al. (1994), citado en Palma et al. (2004).

Altura diaria de residuos sólidos (h_r): éste valor corresponde a la altura que alcanzan diariamente los residuos sólidos en las zonas de disposición. Éste parámetro es determinado por el modelo considerando la densidad de compactación y el área de la zona de disposición.

$$h_r = \frac{m_r}{\rho_r} \times A_z \quad (4.5)$$

Donde:

h_r : altura diaria de la capa de residuos sólidos (m)

m_r : cantidad diaria de residuos sólidos que ingresan a la zona z (Kg)

ρ_r : densidad de compactación de los residuos sólidos (Kg/m³)

A_z = área de la zona de operación o de disposición de residuos sólidos (m²)

Contenido de humedad diaria de residuos sólidos (H_r): éste valor corresponde al contenido de humedad diaria en lámina de agua presente en la capa de residuos sólidos. El valor requerido en el modelo en mm, se estima considerando la densidad, altura diaria de los residuos sólidos y el contenido volumétrico de humedad en los residuos sólidos.

La siguiente ecuación es el resultado de una simplificación que permite estimar en mm la altura de la lámina de agua en los residuos sólidos.

$$H_r = \rho_r \times \theta \times h_r \quad (4.6)$$

Donde:

H_r : humedad diaria de los residuos sólidos en lámina de agua (mm)

ρ_r : densidad de compactación de los residuos sólidos (Kg/m³)

h_r : altura diaria de la capa de residuos sólidos (m)

θ : contenido volumétrico de humedad de los residuos sólidos (vol/vol). De acuerdo con Schroeder et al. (1994), éste valor es del orden de 0.29; sin embargo, en el modelo el valor se valida durante la calibración del modelo.

Porosidad de los residuos sólidos (η): corresponde a la relación entre el volumen de vacíos y el volumen total ocupado por los residuos sólidos (Qian et al., 2002). Los valores de porosidad que considera el modelo corresponden a los sugeridos por Schroeder et al. (1994), el cual recomienda un valor de 0.67.

Capacidad de campo (C_c) y punto de marchites (w_p) de los residuos sólidos: de acuerdo con Qian et al. (2002), la capacidad de campo (C_c) es definida como el contenido volumétrico de agua residual después de un largo periodo de drenaje por gravedad. Éste parámetro es importante porque esta relacionada con la capacidad de almacenamiento de agua que tienen los residuos sólidos dentro del relleno sanitario.

El punto de marchites (w_p) se define como el contenido volumétrico de agua más bajo que puede ser alcanzado, debido a la remoción de humedad realizada por la transpiración de las plantas (Qian et al., 2002)

Aunque el parámetro de punto de marchites esta relacionado con suelos con cobertura vegetal, Qian et al. (2002) y Schroeder et al. (1994), aplican esta característica a los residuos sólidos, ya que existe una expresión de conductividad hidráulica no saturada reportada por Campbell (1974) que incorpora éste parámetro. Está expresión se presenta más adelante. Aunque dicha ecuación no está establecida para los residuos sólidos, la mayoría de los modelos hidrológicos para rellenos sanitarios utilizan esta expresión, asumiendo que muchos de los procesos físicos que ocurren en los suelos también se presentan en las capas de residuos sólidos.

Los valores de capacidad de campo y punto de marchites para el modelo, son tomados de Schroeder et al. (1994). En éste documento la capacidad de campo para los residuos sólidos se establece con un valor 0.292 y el punto de marchites con un valor 0.077.

Conductividad hidráulica de los residuos sólidos: la conductividad hidráulica de los residuos sólidos es importante en el modelo, ya que la misma determina la cantidad de agua que atraviesa las capas de residuos sólidos hasta ser recogida en forma de lixiviados. El modelo considera la conductividad hidráulica no saturada, cuya expresión es reportada por Campbell (1974). Esta conductividad hidráulica es utilizada en Schroeder et al. (1994) para describir el flujo a través de las capas de suelo o de residuos sólidos cuando en las mismas existen espacios vacíos. La expresión para la conductividad

hidráulica no saturada reportada por Campbell (1974) citado en Schroeder et al. (1994) es la siguiente:

$$K_u = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\eta - \theta_r} \right)^{3 + \left(\frac{2}{\lambda} \right)} \quad (4.7)$$

Donde:

K_u : conductividad hidráulica no saturada (cm/s)

K_s : conductividad hidráulica saturada (cm/s)

θ : contenido volumétrico de humedad (vol/vol)

θ_r : contenido volumétrico de humedad residual (vol/vol)

η : porosidad total

λ : índice de distribución del tamaño de los poros

Para el modelo, los valores de estos parámetros son tomados de Schroeder et al. (1994). El modelo requiere los valores de K_u en mm/día.

Velocidad de Darcy y velocidad real para las capas de residuos sólidos: en Vélez (2004) se establece que la velocidad dada por la ley de Darcy no es la velocidad real a la cual se desplaza el agua en un medio poroso. En efecto, dicha velocidad considera que el flujo se hace a través de toda la sección y se define como Q/A , mientras que realmente el fluido se desplaza únicamente a través de los poros, siendo por lo tanto el área menor que el área de toda la sección. Esta es la razón por la cual a la velocidad de Darcy se le denomina velocidad aparente o velocidad de flujo para diferenciarla de la velocidad real, la cual viene a ser la velocidad de desplazamiento del agua a través de los poros.

En el modelo la velocidad real a la cual el agua o los lixiviados se mueven a través de los poros de las capas de residuos sólidos, es tomada en cuenta para determinar el coeficiente de descarga y el tiempo de residencia para el agua que se encuentra presente en la capa de residuos.

La velocidad real es estimada a partir de la ecuación presentada en Vélez (2004), la cual relaciona la velocidad de Darcy y la velocidad real:

$$V_r = \frac{V}{\eta} \quad (4.8)$$

Donde:

V_r : velocidad real en mm/día

V : velocidad de Darcy en mm/día.

η : porosidad total de los residuos sólidos (vol/vol)

$$V = Ki \quad (4.9)$$

Donde:

K : conductividad hidráulica en (mm/día)

i : gradiente hidráulico de la ecuación de Darcy

Tiempo de residencia (T_R) y coeficiente de descarga α : para los residuos sólidos el tiempo de residencia y el coeficiente de descarga del agua contenida en estas capas, se estiman en función de la velocidad real y la altura de las capas de residuos sólidos. Si α se estima como en la ecuación 0, entonces se tiene:

$$\frac{1}{T_R} = \frac{V_r}{h_r} \quad (4.10)$$

Donde:

V_r : velocidad real en mm/día

h_r : altura de la capa de residuos sólidos en mm

5.2.2 Modelo conceptual

El modelo conceptual se refiere a los métodos de solución y planteamientos del modelo para simular los procesos hidrológicos y de generación de lixiviados que ocurren en el relleno sanitario en cada una de las etapas.

El modelo de balance hídrico propuesto en éste trabajo, es una simplificación de los procesos físicos que ocurren en un relleno sanitario en función de la precipitación y de los residuos sólidos que ingresan diariamente en un relleno sanitario. El número y tipo de procesos varían de acuerdo a la etapa en que se encuentra el relleno (construcción,

operación o clausura) y se tratan de representar mediante ecuaciones de conservación de masa. El número de ecuaciones para cada etapa depende del número de tanques presentes en la misma.

Las ecuaciones que hacen parte de cada tanque dentro de una etapa correspondiente se presentan a continuación.

▪ **Etapa 0**

En la Figura 41 se presenta el esquema conceptual del modelo de balance hídrico durante la etapa de conformación del vaso.

De acuerdo con la Figura 41 en cada tanque I_i , D_i , Y_i y H_i , representan en orden, la disponibilidad de agua, las entradas, las salidas y los almacenamientos de agua.

Tanque 1: representa la capa superficial del fondo natural del relleno (material de suelo), en éste tanque la entrada de agua D_1 corresponde al agua de precipitación disponible (I_1) para evaporación y que puede quedar almacenada en la capa superficial del suelo, dependiendo, de las condiciones iniciales de humedad presentes en esta capa (H_{i1}) y la capacidad máxima de almacenamiento de agua que puede tener la misma (H_U).

En éste tanque la salida de agua de la capa superficial se estima como evaporación, la cual se representa como Y_1 .

Teniendo en cuenta las ecuaciones planteadas en el trabajo de Vélez (2001), las variables para ese tanque se determinan así:

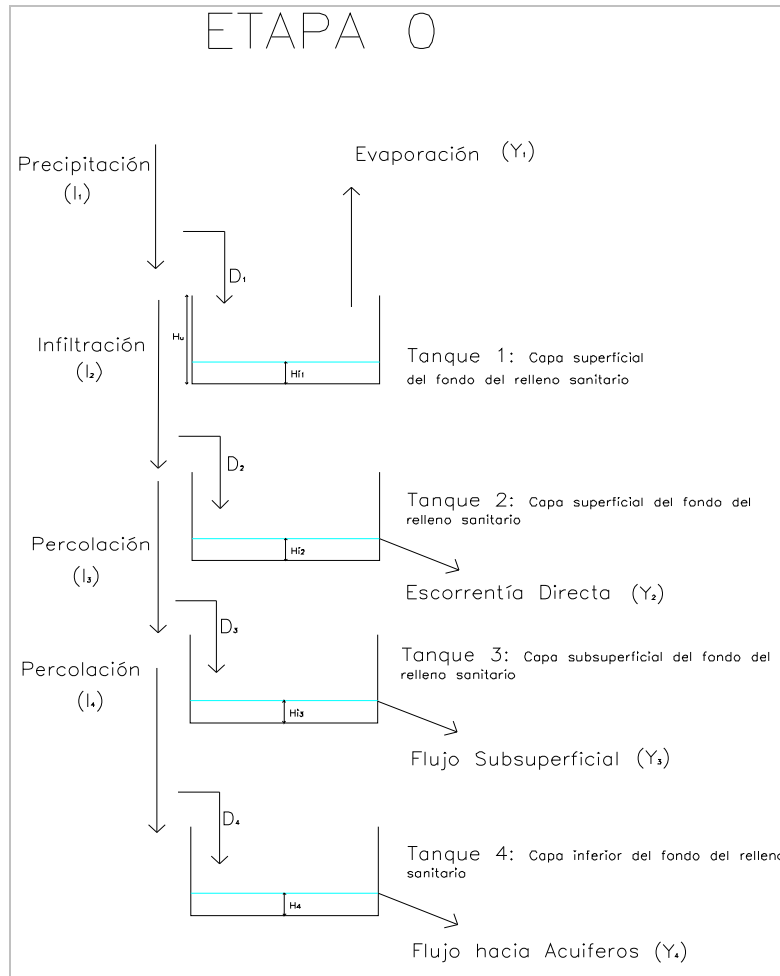


Figura 41. Esquema del modelo conceptual de balance hídrico para la Etapa 0

$$D_1 = \text{Min} \left\{ I_1 \cdot \left(1 - \left(\frac{H_{i1}}{H_u} \right)^a \right); H_u - H_{i1} \right\} \quad (4.11)$$

Parte de la precipitación (I_1) que entra al tanque (D_1) puede corresponde a: el mínimo valor entre lo que se requiere para completar H_u teniendo en cuenta a H_{i1} , y la cantidad de precipitación que puede entrar al suelo, la cual es determinada a partir de la relación entre los dos almacenamiento y un coeficiente de infiltración (a). Éste planteamiento es discutido en Vélez (2001), donde se establece que el coeficiente de infiltración puede tomar valores entre 1 y 3 y es un parámetro que define el analista.

La variable H_i , cuando se inicia el balance hídrico en el día i ($i=1$), corresponde a la condición inicial H_{i1} ; luego de estimar la entrada de agua D_1 , se considera un estado intermedio definido como:

$$H_{1(\text{Intermedio})} = D_1 + H_{i1} \quad (4.12)$$

Con relación a la salida de agua por evaporación, Y_1 se define como la evaporación real de agua que ocurre sobre la superficie del fondo del relleno.

$$Y_1 = EVP \cdot \left(\frac{H_1}{Hu} \right)^b \quad (4.13)$$

Donde EVP es la evaporación potencial, la cual es calculada con la ecuación 5.1 y b es un coeficiente de evaporación cuyo valor es discutido en (Vélez, 2001).

Además, en el modelo se tiene en cuenta que en éste tanque, el valor de la evaporación real no puede ser mayor que el agua disponible para evaporación (H_1). De acuerdo con esto, en el modelo se aplica el siguiente condicional para determinar la salida de agua real por evaporación. Esta ecuación es establecida en Vélez (2001):

$$Y_1 = \text{Min} \left(EVP \cdot \left(\frac{H_1}{Hu} \right)^b ; H_1 \right) \quad (4.14)$$

Para el caso de Y_1 , H_1 corresponde al estado intermedio $H_{1(\text{intermedio})}$. Finalmente se genera un estado final $H_{1(\text{final})}$, el cual corresponde a:

$$H_{1(\text{final})} = H_{1(\text{intermedio})} - Y_1 \quad (4.15)$$

$H_{1(\text{final})}$ del día i, pasa a ser la condición inicial H_{i1} para el día i+1.

Tanque 2: en éste tanque los procesos representados en el mismo, aún se dan en la capa superficial del fondo natural del relleno sanitario. D_2 es parte del agua de precipitación que puede infiltrarse superficialmente en el suelo pero que logra salir rápidamente como escorrentía superficial (Y_2). D_2 esta relacionada con la existencia de agua superficial (H_{i2}) sobre el fondo natural del relleno y la capacidad que tiene la capa superficial de dejar pasar o no agua al interior del suelo, es decir la permeabilidad (Ks_2). Esta permeabilidad corresponde a los valores de conductividad hidráulica que son presentados en Schroeder et al. (1994) y que fueron determinados con la ecuación 5.2.

$$D_2 = \text{Max}((I_2 - Ks_2); 0) \\ I_2 = I_1 - D_1 \quad (4.16)$$

De la cantidad de agua de precipitación I_1 que queda del tanque anterior ($I_1 - D_1$) una cantidad de agua puede entrar a la capa superficial (D_2), esta depende de la conductividad hidráulica de la capa (Ks_2); de esta forma si la conductividad hidráulica es mayor que I_2 entonces toda el agua pasara al interior de la capa y por consiguiente no se generara escorrentía.

D_2 se suma a las condiciones iniciales de humedad del tanque 2 (H_{i2}) para formar un estado intermedio de almacenamiento (H_2) para un tiempo t_i . Parte de éste almacenamiento puede salir como escorrentía superficial (Y_2).

Para efectos de analizar los aportes de agua por escorrentía a la red de drenaje natural, las salidas de agua (Y_2) de éste tanque son las más importantes para éste análisis.

Las salidas de agua en éste tanque son dadas en función del coeficiente de descarga α , el cual esta relacionado con el tiempo de residencia.

$$Y_2 = \alpha \cdot H_2 \quad (4.17)$$

En donde el coeficiente de descarga es función del tiempo de la residencia del agua en el interior del suelo.

$$\alpha = \frac{1}{\text{tiempo de residencia}} \quad (4.18)$$

Estos dos parámetros fueron explicados con las ecuaciones 5.3 y 5.4; sin embargo la conductividad hidráulica (K) está dada para la parte superficial del fondo del relleno sanitario. Visto de esta forma, los tiempos de residencia para cada capa representada con los tanques, dependen de las características físicas de la misma, las cuales determinan el tiempo que demora el agua en salir de la capa.

Después de haber determinado la salida en éste tanque (Y_2) para un tiempo t_i , se establece un estado de almacenamiento final y las condiciones iniciales para t_{i+1} de la misma forma que en el tanque 1, es decir mediante la ecuación 5.15.

Tanque 3: representa una capa subsuperficial del suelo donde se encuentra almacenada el agua H_3 , es decir, la que logró pasar un poco más debajo de la superficie del terreno. En éste tanque, D_3 es el agua que entra como resultado de la percolación del agua lluvia y que se retiene por cierto tiempo formando una estado de almacenamiento H_3 , para luego salir en forma de flujo subsuperficial (Y_3); dicha percolación esta relacionada con las condiciones de permeabilidad de la capa subsuperficial del suelo que conforma el fondo natural del relleno (Ks_3).

$$D_3 = \text{Max}((I_3 - Ks_3); 0)$$

$$I_3 = I_2 - D_2 \quad (4.19)$$

Igual que para el tanque anterior, la conductividad hidráulica (Ks_3) de la capa subsuperficial define la cantidad de agua que puede entrar a esta capa, y que luego saldrá en forma de flujo subsuperficial (Y_3).

$$Y_3 = \alpha \cdot H_3 \quad (4.20)$$

α se determina con la ecuación 5.3 y 5.4. La conductividad hidráulica (Ks_3) está dada para la parte subsuperficial del fondo del relleno sanitario.

Para éste tanque se establecen también almacenamientos intermedios, almacenamientos finales y condiciones iniciales para cada tiempo t de la modelación.

Tanque 4: finalmente, éste tanque representa el agua que fluye verticalmente hacia el interior del fondo natural del vaso y que queda como almacenamiento para aguas subterráneas. El agua lluvia que logra percolar más allá de la capa subsuperficial del fondo del relleno se representa como D_4 , el almacenamiento inicial de agua en éste tanque esta dado como H_{i4} , y las salidas de agua hacia las aguas subterráneas se representan como Y_4 .

La cantidad de agua que se deriva para el flujo subterráneo depende de la cantidad de agua que ha percolado y de la cantidad que pasa a las pérdidas, las cuales se representan como Kp .

$$D_4 = \text{Max}((I_4 - Kp); 0)$$

$$I_4 = I_3 - D_3 \quad (4.21)$$

Para la representación del flujo a través de almacenamiento subterráneo, se utiliza la ecuación de continuidad y una ecuación que relaciona la tasa de flujo que sale de éste almacenamiento con la cantidad de agua almacenada (Vélez, 2001).

$$Y_4 = \alpha \cdot H_4 \quad (4.22)$$

Los estados intermedios H_4 , los almacenamientos finales y las condiciones iniciales, se calculan igualmente que para los tanques anteriores.

Finalmente el caudal para cada tiempo t_i se calcula como:

$$Q = (Y_2 + Y_3) * Area_{celda} * Factor\ de\ conversi\ on\ para\ unidades\ de\ caudal \quad (4.23)$$

▪ **Etapa 1**

En la Figura 42 se presenta el esquema conceptual del modelo de balance hídrico durante la etapa de impermeabilización del vaso y conformación del sistema de drenaje y filtros.

En esta etapa se establece que aún no se ha iniciado la disposición de los residuos sólidos en el vaso, por lo cual, solo se modela en éste tanque el agua de precipitación que pasa a través del dren y/o filtros y que posteriormente sale hacia la red de drenaje natural o hacia un sistema de desagüe de los filtros.

Tanque 1: para esta etapa en la cual el vaso se encuentra completamente impermeabilizado y presenta la capa de drenaje y filtros, éste tanque representa los procesos que ocurren en la parte superior de la capa de drenaje. La entrada de agua D_1 corresponde al agua de precipitación que puede quedar retenida en la parte superficial de la capa de drenaje y puede salir por evaporación (Y_1).

Las ecuaciones para determinar las entradas y salidas de agua en éste tanque son las mismas planteadas para el tanque 1 de la etapa 0.

Sin embargo, los valores de los parámetros H_{i1} (para el primer día de modelación), H_U y de los coeficientes a y b , distan mucho de los establecidos para la etapa 0, ya que en ésta etapa, se encuentran presente una capa de drenaje y un sistema de filtros con unas características totalmente distintas al suelo del fondo del vaso. En el numeral 5.3 correspondiente al funcionamiento del modelo se explica como se dan los valores para estos parámetros de la etapa 1.

Tanque 2: Los procesos que ocurren en éste tanque durante esta etapa son los mismos de la etapa anterior. Las entradas D_2 , corresponden al agua de precipitación que logra infiltrar en la capa de drenaje y que posteriormente es drenada por el sistema de filtros centrales (Y_2). H_{i2} representa el agua que puede estar inicialmente almacenada en la capa de drenaje.

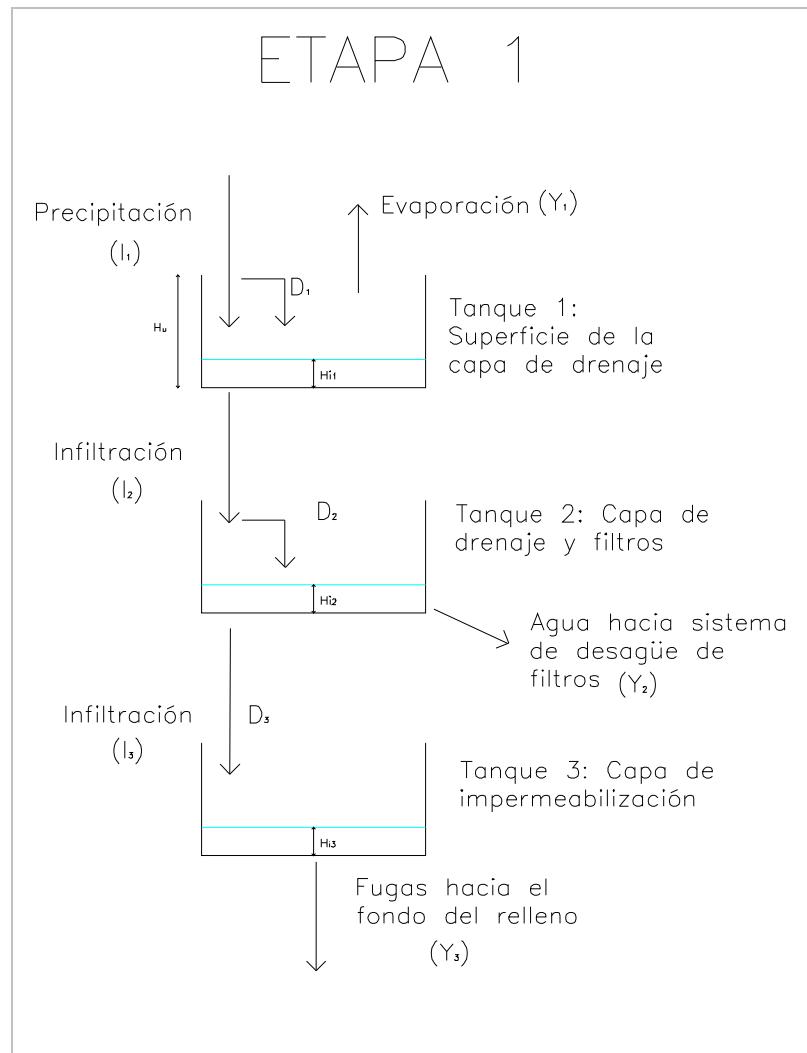


Figura 42. Esquema del modelo conceptual de balance hídrico para la Etapa 1

Para realizar el balance en éste tanque, se utilizan las ecuaciones 5.16, 5.17 y 5.18. Vale aclarar que para la ecuación 5.16, el parámetro Ks_2 se debe establecer de acuerdo a las características físicas de la capa de drenaje y es considerado si el esquema planteado en la Figura 42 se cumple; es decir, si es posible que ocurran fugas hacia el fondo natural del relleno sanitario, debido a que la capa de impermeabilización (geomembrana) presente fallas en su instalación o rupturas. De lo contrario, el balance hídrico para esta etapa llegará hasta el tanque 2 y las ecuaciones a utilizar serán las siguientes:

$$D_2 = I_1 - D_1 \quad (4.24)$$

Para esta ecuación I_1 corresponde a la precipitación, D_1 y D_2 son las entradas de agua en los tanques 1 y 2.

$$H_{2(Intermedio)} = D_2 + H_{i2} \quad (4.25)$$

$$Y_2 = \left(\frac{Ks_2}{h} \right) H_2 \quad (4.26)$$

Donde: H_2 corresponde al estado intermedio en el tanque 2, h corresponde a la altura del sistema de drenaje y filtros y Ks_2 corresponde a la conductividad hidráulica de la capa de drenaje. Si la relación de la conductividad hidráulica y la altura es mayor que 1, entonces se espera que la salida sea igual a H_2 .

Tanque 3: representa el agua de precipitación que entra en contacto con la capa de impermeabilización y que puede salir como fuga hacia el fondo del relleno sanitario.

$$D_3 = I_2 - D_2 \quad (4.27)$$

$$H_{3(Intermedio)} = D_3 + H_{i3} \quad (4.28)$$

$$Y_3 = \left(\frac{Ks_3}{h} \right) H_3 \quad (4.29)$$

Para éste tanque, Ks_3 será la conductividad hidráulica de la capa de impermeabilización que represente fugas hacia el fondo del vaso del relleno sanitario.

De la misma forma que en los otros tanques, se deben considerar unos estados de almacenamiento iniciales H_{i3} y uno estado intermedio H_3 , a partir del cual se van a determinar las salidas de agua (Y_3). Finalmente, se establecen unas condiciones finales de almacenamiento a partir de H_3 y Y_3 . Estas condiciones finales se estiman como en la ecuación 5.15.

Finalmente, en esta etapa el caudal para cada tiempo t_i se calcula como:

$$Q = Y_2 * Area_{celda} * Factor \ de \ conversi3n \ para \ unidades \ de \ caudal \quad (4.30)$$

■

▪ **Etapa 2**

En la Figura 43 se presenta el esquema conceptual del modelo de balance hídrico durante la etapa de conformación u operación del relleno del relleno.

Las ecuaciones planteadas consideran en primer lugar, el proceso constructivo del relleno, es decir, la conformación en altura de la celda de residuos sólidos; esta conformación esta en función de un área y de la cantidad de residuos sólidos que ingresa diariamente al relleno.

Tanque 1: éste tanque representa los procesos que ocurren a nivel de la parte superficial de la capa de residuos sólidos. Para estimar las salidas y entradas de agua en éste tanque, se define la capacidad máxima de almacenamiento de agua para evaporación por parte de la capa superficial de la celda de residuos, éste parámetro se establece como H_u , y se considera que será siempre fijo para la capa superficial de residuos sólidos independiente de la altura (h) que presente la celda en un tiempo t.

Igualmente, se tienen en cuenta las condiciones iniciales de humedad presente en esta capa (H_{i1}). D_1 representa el agua de precipitación que puede quedar almacenada temporalmente en esta capa y salir como evaporación (Y_1); visto así, las entradas a éste tanque se estiman de esta forma:

$$D_1 = \text{Min} \left\{ I_1 \left(1 - \left(\frac{H_1}{H_u} \right) \right)^a ; H_u - H_1 \right\} \quad (4.31)$$

El planteamiento de esta ecuación es presentado en Vélez (2001). Para el caso de la capa de residuos sólidos el coeficiente de evaporación a es diferente al del tanque 1 de la etapa 0 y el de la etapa 1.

Para éste tanque se genera un estado intermedio H_1 que es igual al de la ecuación 5.12. La salida de agua por evaporación (Y_1) para éste tanque, también se estima como en la ecuación 5.14.

Los estados finales de almacenamiento para un tiempo t_i , corresponden a lo establecido en la ecuación 5.15, y se consideran como estados iniciales para el tiempo t_{i+1} .

Tanque 2: representa casi toda la capa de residuos sólidos y los almacenamientos de agua presentes en la misma, los cuales provienen de la precipitación (I_1) y de la humedad que aportan los residuos sólidos (H_r).

Las entradas de agua se representan como D_1 y se estiman como:

$$D_2 = I_2 + Hr \quad (4.32)$$

$$I_2 = I_1 - D_1 \quad (4.33)$$

La ecuación 5.32 se utiliza siempre y cuando estén ingresando residuos sólidos al relleno o a la celda de disposición; en caso contrario D_2 es igual a:

$$D_2 = I_1 - D_1 \quad (4.34)$$

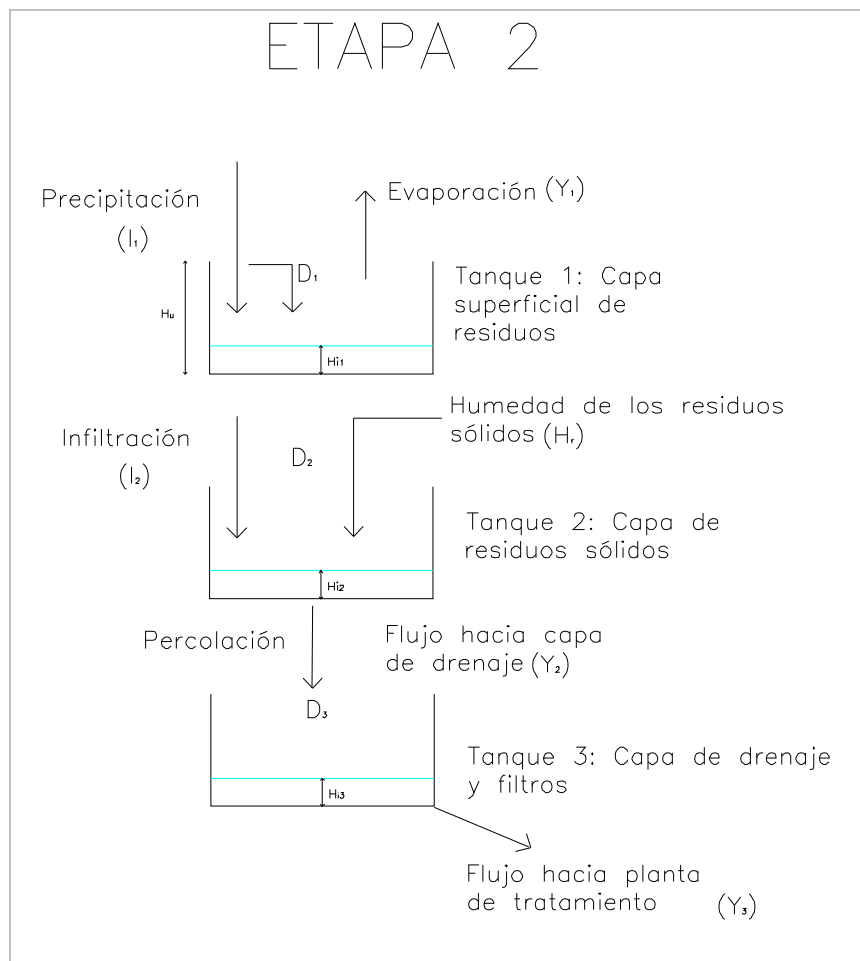


Figura 43. Esquema del modelo conceptual de balance hídrico para la Etapa 2

La salida de (Y_2) corresponde a los lixiviados que percolan a través de la capa de residuos y entran a la capa de drenaje y al sistema de filtros. La salida de lixiviados en éste tanque, depende de la conductividad hidráulica de los residuos sólidos bajo condiciones

de no saturación (K_u), es decir, se considera que el movimiento del fluido en el interior de la capa de residuos sólidos, se da en un medio con presencia de poros vacíos. Se establece además, que salida de los lixiviados está dada por la velocidad real (V_r) tal como se plantea en las ecuaciones 5.8, 5.9 y 5.10. En relación a lo anterior, Y_2 se estima como:

$$Y_2 = \left(\frac{V_r}{h} \right) H_2 \quad (4.35)$$

h es la altura de la capa de los residuos para cada tiempo t_i y H_2 corresponde al almacenamiento de agua (lixiviado) presente en la capa de residuos sólidos y es igual a:

$$H_2 = H_{i2} + D_2 \quad (4.36)$$

Siendo H_{i2} los estados iniciales de almacenamiento para cada tiempo t .

Si la relación de V_r y h da mayor igual que 1, entonces $Y_2 = H_2$, de lo contrario, la ecuación sigue siendo la misma.

Tanque 3: representa el lixiviado que ingresa al conjunto de filtros y que luego sale de los mismos para ser conducido hasta un sistema de almacenamiento para un posterior tratamiento.

D_3 es el lixiviado proveniente del tanque anterior que entra a los filtros; H_{i3} es el contenido de agua presente en el interior de los filtros; y Y_3 representa el lixiviado que sale de los filtros para ser conducido a un sistema de tratamiento. De acuerdo con lo anterior:

$$D_3 = Y_2 \quad (4.37)$$

$$H_3 = H_{i3} + D_3 \quad (4.38)$$

$$Y_3 = \left(\frac{K_{s3}}{h} \right) H_3 \quad (4.39)$$

Siendo K_{s3} la conductividad hidráulica de la capa de drenaje y filtros y h la altura de esta capa. Si la relación de estos parámetros da mayor igual que 1, entonces $Y_3 = H_3$, de lo contrario, la ecuación sigue siendo la misma.

Finalmente, el caudal de lixiviados para cada tiempo t_i se calcula como:

$$Q = Y_3 * Area_{celda} * Factor\ de\ conversi\ on\ para\ unidades\ de\ caudal \quad (4.40)$$

▪ **Etapas 3**

En la Figura 44 se presenta el esquema conceptual del modelo de balance hídrico durante la etapa de clausura y posclausura del relleno sanitario.

De acuerdo con el esquema y teniendo en cuenta que todos los tanques que hacen parte del balance hídrico de esta etapa ya fueron definidos en etapas anteriores; se establece que los tanques 1 y 2 de la etapa 3 se modelan de igual forma que los tanques 1 y 2 de la etapa 0, salvo, que la salida de agua en el tanque 1 se define como evapotranspiración, ya que el relleno esta clausurado y presenta una cobertura final con vegetación (paso).

Los tanques 3 y 4 de esta etapa, se modelan como los tanques 2 y 3 de la etapa 2.

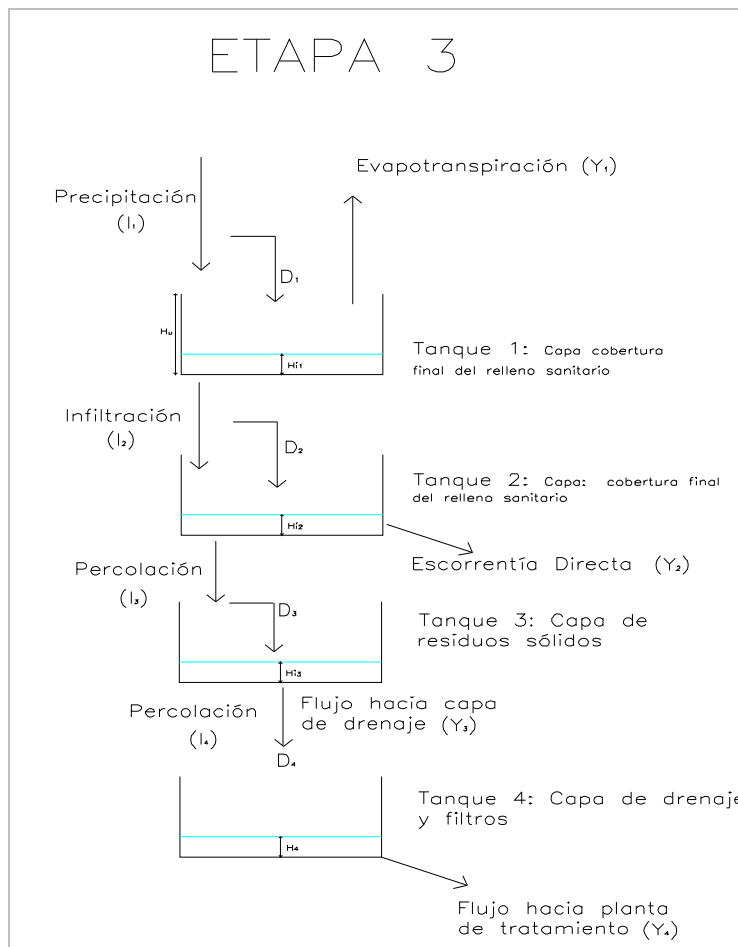


Figura 44. Esquema del modelo conceptual de balance hídrico para la Etapa 3

La entrada de agua en el tanque 3 de esta etapa, se considera como el agua de precipitación que logra atravesar la cubierta final del relleno sanitario e ingresar al interior del mismo, donde se encuentran los residuos sólidos que fueron depositados durante la operación del relleno (etapa 2). Se espera que el ingreso de agua se mínimo, si las condiciones de clausura del relleno sanitario fueron las apropiadas para reducir las infiltraciones.

De otra parte, en el tanque 3 se tienen en cuenta las condiciones finales de almacenamiento (H_3) para el último día de operación del relleno sanitario; además se redefine la conductividad hidráulica de los residuos sólidos presentes en el interior del relleno, teniendo en cuenta que los residuos sólidos con el tiempo sufren asentamientos y por ende las permeabilidades de los mismos varían.

5.3 FUNCIONAMIENTO DEL MODELO

El modelo de balance hídrico propuesto, funciona como una hoja de cálculo en la cual, inicialmente, se ingresa la información general del relleno sanitario: localización y radiación solar; para las etapas 0 y 1, es necesario establecer: el área del relleno y de su fondo; los espesores de cada una de las capas; los parámetros hidráulicos y las condiciones iniciales para cada uno de los tanques que representan las capas del relleno sanitario.

Utilizando columnas, se ingresan los datos de precipitación diaria, temperatura media mensual y caudales registrados (si se cuenta con esa información) y se establece una columna para el cálculo de la evaporación potencial.

Para el balance hídrico, primero se establecen columnas para ingresar los estados iniciales de almacenamiento, esto se realiza para todo el conjunto de tanques de cada etapa. Seguidamente, se ingresan las ecuaciones establecidas para determinar las entradas de agua en cada tanque (cada tanque en una columna correspondiente). Igualmente, se establecen las ecuaciones para los estados intermedios de almacenamiento, las salidas de agua y los estados finales. Finalmente, en una columna se calculan los caudales obtenidos por el balance hídrico de acuerdo a las ecuaciones 5.7 y 5.8.

Para la etapa 2 (operación del relleno sanitario), el modelo funciona de la siguiente forma: en una hoja de cálculo se ingresa inicialmente toda la información relacionada con el diseño del relleno sanitario: localización; área y altura del relleno; tipos de capas y espesor de las mismas, esta última se refiere a las capas de drenaje, de impermeabilización y filtros, ya que las mismas poseen espesores fijos dentro del relleno sanitario.

Para la parte operativa del relleno sanitario se deben ingresar los siguientes datos:

- Estimaciones de disposición diaria de residuos sólidos, las cuales pueden ser establecidas como un valor promedio, ó en base a las proyecciones para ingresos mensuales de residuos sólidos al relleno sanitario.
- Densidad de compactación de los residuos sólidos.
- Especificaciones para la operación del relleno sanitario: esta información se refiere al número y áreas de zonas de trabajo. Además de establecer como es el orden operacional en cada una de estas zonas con relación a la disposición de los residuos sólidos.
- Crecimiento del relleno sanitario; en área o en altura.
- Registros diarios de caudales de lixiviados. Esta información es necesaria para la calibración del modelo.

El modelo también requiere de valores para los parámetros hidráulicos de cada tanque: Capacidad máxima de almacenamiento y conductividades hidráulicas. Tal como se explico en el numeral 5.2.1, estos valores son establecidos inicialmente pero luego son validados durante la calibración del modelo. Se deben ingresar además, las condiciones iniciales de almacenamiento de agua en cada tanque y los valores adoptados para los exponentes de infiltración y evaporación.

Es necesario ingresar la información que caracteriza los residuos sólidos: porosidad, conductividad hidráulica saturada, capacidad de campo, punto de marchites, contenido de volumétrico de humedad, humedad residual e índice de distribución de tamaño de los poros. Con esta información el modelo calcula la conductividad hidráulica no saturada y la velocidad real del flujo; para esto utiliza las ecuaciones 5.7 y 5.8.

Para la información climática, se selecciona una columna para cada variable y se ingresan los datos de precipitación diaria y temperatura media mensual. Con esta información se calcula en una columna la evaporación potencial utilizando la ecuación 5.1.

En una columna se calculan las alturas diarias de residuos sólidos conforme a la ecuación 5.5. Teniendo esta información, el número de zonas y las especificaciones para el orden de operación de las mismas, la hoja de cálculo se programa para presentar en una columna el número de la zona en que se opera con relación a la fecha.

Además, se programa un número de columnas correspondiente al número de zonas de operación del relleno sanitario; en estas columnas se calculan las alturas diarias de la

capa de residuos sólidos que se presentan en cada zona. Estas alturas se plantean como crecientes o estáticas si la zona está operando o está inactiva.

Para el balance hídrico, la hoja de cálculo se subdivide en el número de zonas que se presentan en el relleno sanitario y se realizan los balances hídricos para cada una de estas. Se establecen en cada zona de operación un conjunto de columnas para: los almacenamientos iniciales en cada tanque, las entradas de agua, los estados intermedios, las salidas de agua y los almacenamientos finales. Las ecuaciones utilizadas para estimar estos estados son todas las presentadas en el modelo conceptual de la etapa 2.

Finalmente, se calculan los caudales de lixiviados aportados por cada zona de operación (ecuación 5.40). El caudal para todo el relleno sanitario se obtiene sumando los caudales de todas las zonas. Estos valores son presentados por el modelo en unidades de L/s.

Para la etapa 3 (clausura del relleno sanitario), el modelo funciona con la misma hoja de cálculo planteada para la etapa 2, solo que: las salidas en el tanque 1 están dadas por evapotranspiración y se agrega un tanque 2 para estimar los procesos de escorrentía superficial e infiltración al relleno sanitario. El balance hídrico para los tanques 3 y 4 se plantea igual que para la etapa 1, salvo que en el modelo se fijan las alturas alcanzadas por las zonas de operación en el momento en que se da el cierre del relleno sanitario.

5.4 APLICACIÓN DEL MODELO

La aplicación del modelo hace referencia al método llevado a cabo para ensayar el modelo conceptual planteado, para realizar el proceso de calibración y para el planteamiento de los escenarios de modelación. Estos escenarios tienen el fin de representar el comportamiento de los caudales de lixiviados ante unas variables climáticas distintas y bajo otros criterios operativos del relleno sanitario El Guacal.

A continuación se presenta la información utilizada para la aplicación de éste modelo.

5.4.1 Información utilizada

A continuación se presenta toda la información requerida por el modelo para realizar los balances hídricos en cada etapa de modelación. De igual forma se presentan las fuentes de información que suministraron todos los datos necesarios.

▪ Climática

Para representar los aportes de agua y lixiviados que se generan durante las diferentes etapas de evolución del relleno sanitario (Etapa 0 – Etapa 3), el modelo utilizó datos de precipitación diaria, de temperatura y radiación global incidente.

Los datos de precipitación utilizados fueron los suministrados por la empresa operadora del relleno sanitario, ya que la misma instaló un pluviómetro cercano al vaso en el cual se depositan actualmente los residuos sólidos. Las coordenadas del pluviómetro corresponden a 1183466.293 N y 819271.01 E. El registro de datos utilizados para realizar las modelaciones, corresponde a mediciones diarias tomadas desde mayo 01 de 2006 hasta julio de 2008 (fecha de corte para recolección de información). En la Figura 45 se presenta la serie de precipitación diaria para el sitio de localización del relleno sanitario El Guacal. De acuerdo con estos registros la precipitación media anual para corresponde a 2800 mm/año.

Para los valores de temperatura, no se tenían registros diarios de esta variable, muy a pesar que la instrumentación del relleno sanitario incluía una estación meteorológica. Esta estación presentaba fallas en la toma de datos y muchos vacíos en la información. Sin embargo, se lograron tener en cuenta algunos datos de temperatura que permitieron obtener un valor de temperatura media anual, éste valor corresponde a 12.7 °C.

El valor de radiación global incidente fue tomado a partir de los registros de la estación meteorológica instalada en el CIS – El Guacal. El valor de esta variable corresponde 387.26 (cal/cm²)/día.

Los valores de evaporación potencial que requiere el modelo fueron estimados a partir de la ecuación 5.1. De acuerdo con los valores obtenidos se estima para el sitio de localización del relleno sanitario una evaporación potencial media diaria de 2.646 mm/día.

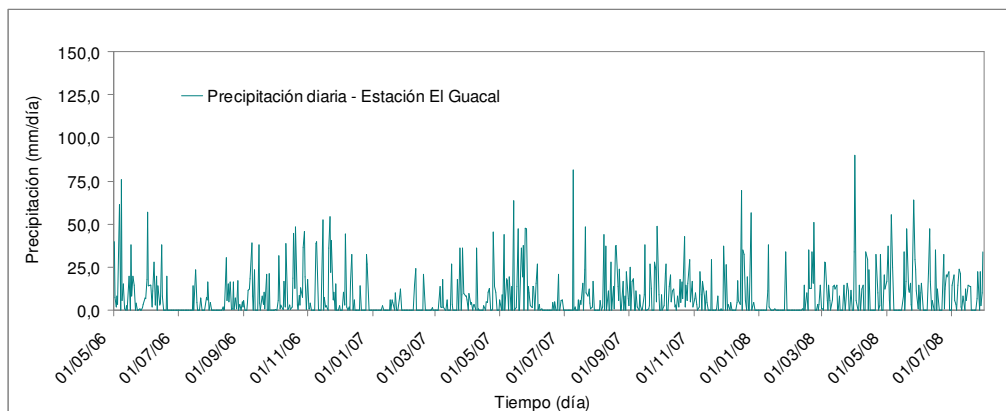


Figura 45. Serie de precipitación diaria
Mediciones estación pluviométrica relleno sanitario El Guacal. Periodo: 01/05/2006 – 31/07/2008

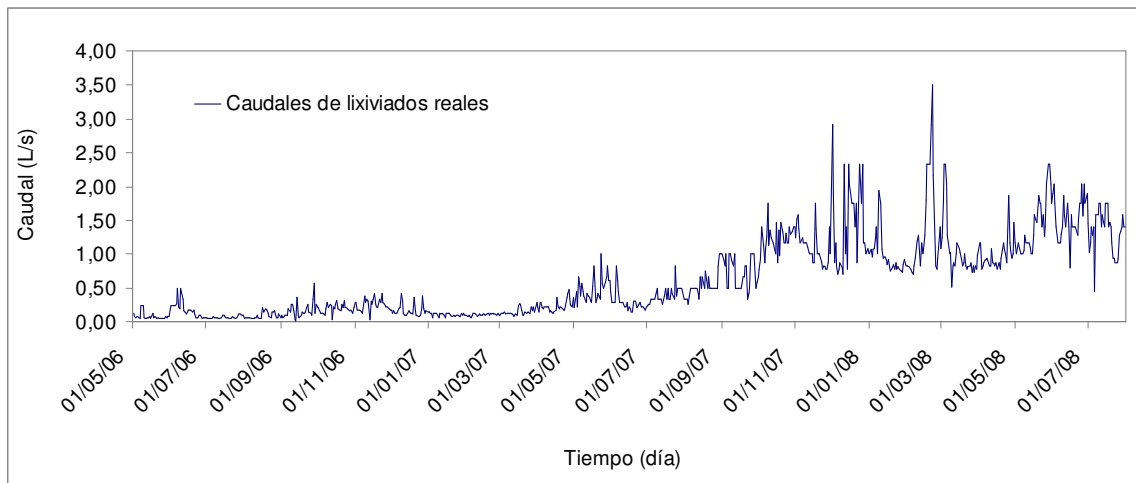


Figura 46. Serie de caudales de lixiviados reales
Mediciones realizadas en el relleno sanitario El Guacal. Periodo: 01/05/2006 – 31/07/2008

▪ Caudales de lixiviados

Los caudales diarios de lixiviados medidos en el relleno sanitario fueron necesarios para la prueba y calibración del modelo. En la Figura 46 se presenta la serie de caudales de lixiviados que se han producido durante el periodo de operación comprendido entre mayo 01 de 2006 hasta julio de 2008.

▪ Aspectos del diseño y operación del relleno sanitario

La información que el modelo requiere con relación al relleno sanitario, corresponde en primer lugar a los aspectos del diseño; es decir las especificaciones técnicas de construcción del relleno sanitario, tales como conformación del fondo, área de las celdas o plataformas de residuos sólidos, capas de impermeabilización, diseño de las capas de drenaje y filtros. En el Capítulo 3 de éste trabajo, se realizó una descripción de la forma constructiva y operativa del relleno sanitario El Guacal; sin embargo, la no uniformidad en la conformación de las plataformas de residuos sólidos, que se presentó por un largo periodo de tiempo durante la operación del relleno sanitario, impidieron tener un esquema secuencial uniforme de la disposición real de los residuos en el relleno.

Teniendo en cuenta lo anterior, se adopta un esquema operativo para el relleno sanitario El Guacal, el cual es aplicado en el modelo para establecer las variaciones diarias en las alturas de las plataformas de residuos sólidos. El esquema se presenta en la Figura 47, en esta figura también se muestran las medidas constructivas del relleno sanitario.

De acuerdo con la Figura 47, se plantea que el relleno sanitario o vaso de disposición, se divide en tres zonas de trabajo 1, 2 y 3; que cada zona tiene un orden de operación, el

cual se identifica con los números que aparecen en cada plataforma de residuos sólidos, estos números indican el paso de una zona a otra, teniendo como restricción que en cada zona la plataforma debe alcanzar una altura de 5 m para que se puede proceder a disponer residuos sólidos en la zona siguiente; el limitante para la formación de las plataformas lo da la altura máxima dentro del vaso, que para el presente caso se asume de 30m.

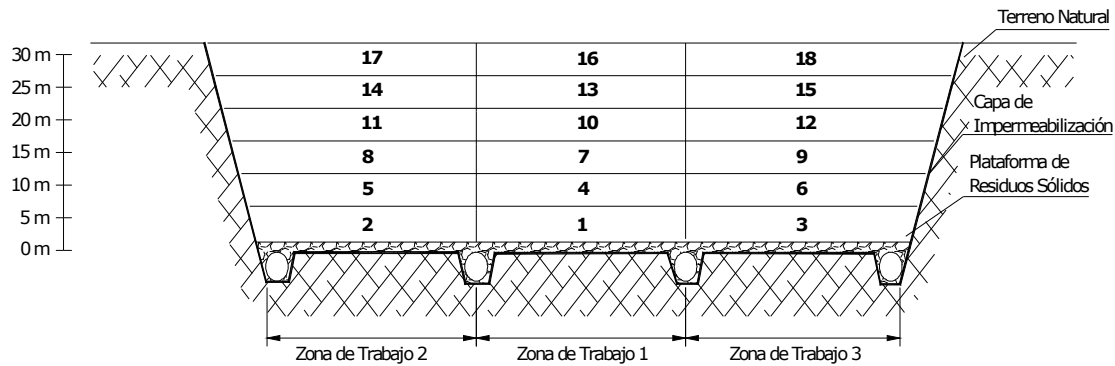


Figura 47. Esquema operativo planteado para el relleno sanitario del CIS El Guacal

▪ Diseño del relleno sanitario clausurado

Con el fin de modelar el relleno sanitario El Guacal, se tuvo en cuenta lo planteado por la firma encargada de la operación del relleno, para el cierre o clausura del vaso norte que se esta operando en éste momento.

De acuerdo con lo expuesto por esta firma, se realizó un esquema del diseño del vaso norte ya clausurado. El esquema se presenta en la Figura 40, y es el que se tuvo en cuenta para realizar la aplicación del modelo en la etapa 3.

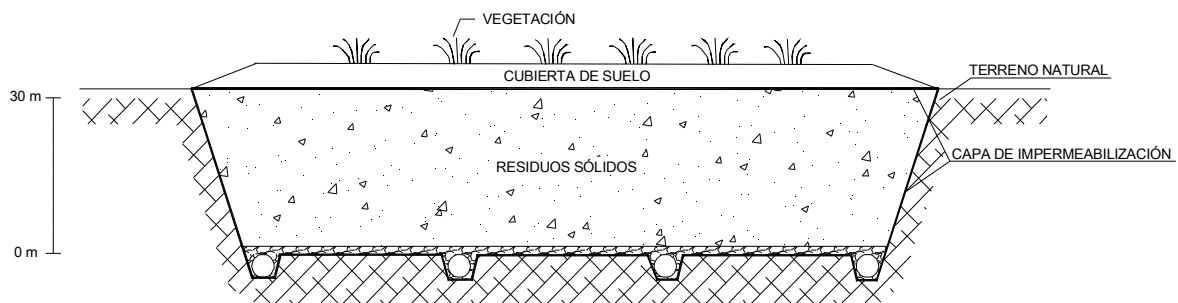


Figura 48. Esquema del vaso norte del relleno sanitario El Guacal - Clausura. Se supone para la clausura del vaso y fue usado para la aplicación del modelo.

▪ **Residuos sólidos depositados en el relleno sanitario**

Para poder calcular las alturas diarias de las celdas o plataformas de residuos sólidos, el modelo requiere tener los datos de cantidad de residuos sólidos dispuestos diariamente en el relleno sanitario. En la Tabla 21 se presentan los registros mensuales de residuos sólidos que han ingresado al relleno sanitario, a partir de estos valores se estimaron las cantidades diarias de residuos sólidos.

Tabla 21. Cantidades de residuos sólidos dispuestos en el relleno sanitario del CIS El Guacal

Residuos sólidos dispuestos en el relleno sanitario (ton/mes)			
Mes/Año	2006	2007	2008
Enero		5,251.92	12,541.37
Febrero		6,269.31	13,221.38
Marzo		6,630	12,438.92
Abril	495.73	5,792.97	12,277.93
Mayo	2,728.07	7,258.83	13,176.90
Junio	3,004.6	10,037.1	12,659.66
Julio	3,967.54	11,775.64	15,673.84
Agosto	4,241.71	12,296.54	
Septiembre	4,291.86	10,143.24	
Octubre	5,015.44	11,228.93	
Noviembre	5,047.31	11,424.81	
Diciembre	4,640.97	11,954.05	

Fuente de datos: ARES (2008).

Los resultados de los ensayos de densidad y permeabilidad realizados para los residuos sólidos, también fueron datos necesarios para que en el modelo se calcularan las variaciones diarias de altura de las celdas de residuos. La Tabla 22 y Tabla 23 se presenta la información de los residuos sólidos que se utilizó en el modelo.

Tabla 22. Datos de ensayos de densidad

Densidad de compactación de los residuos sólidos dispuestos en el relleno sanitario (kg/m³)			
Mes/Año	2006	2007	2008
Enero	-	1,094.70	1,061.11
Febrero	-	1,145.80	1,114.20

Densidad de compactación de los residuos sólidos dispuestos en el relleno sanitario (kg/m³)			
Mes/Año	2006	2007	2008
Marzo	-	1,056.98	997.41
Abril	-	1,143.40	1,1187.30
Mayo	1,227.00	1,264.35	1,238.04
Junio	1,161.00	1,205.56	1,067.38
Julio	981.48	981.48	1068.30
Agosto	1,116.85	1,056.98	-
Septiembre	1,003.36	962.61	-
Octubre	1,078.50	924.86	-
Noviembre	1,028.70	1,038.89	-
Diciembre	1,078.50	944.44	-

Fuente de datos: ARES (2008).

A partir de estos datos, se ingresa al modelo el valor promedio de la densidad de compactación de los residuos sólidos, el cual corresponde a 1068.34 kg/m³. De acuerdo con los valores presentados en la Tabla 20 la densidad obtenida en el relleno sanitario corresponde a una buena compactación.

Tabla 23. Datos de ensayos de permeabilidad

Conductividad hidráulica (cm/s)		
Mes/Año	2006	2007
Enero	-	-
Febrero	-	-
Marzo	-	-
Abril	-	-
Mayo	0.00870	-
Junio	1.03E-04	-
Julio	3.12E-04	-
Agosto	1.00E-03	9.00E-03
Septiembre	1.00E-03	7.40E-02
Octubre	9.00E-04	3.70E-02
Noviembre	7.00E-04	4.00E-02
Diciembre	-	3.90E-02

Fuente de datos: ARES (2008).

Los ensayos de permeabilidad no se realizaron de forma continua a nivel mensual; sin embargo los datos que se tenían se utilizaron para estimar una conductividad hidráulica promedio. El valor promedio corresponde a 0.0208 cm/s, éste valor fue utilizado para probar el modelo con una conductividad de éste orden; sin embargo, el modelo se ensayó con los valores de conductividad hidráulica presentados en Schroeder et al. (1994), y los calculados con la ecuación (5.7).

5.4.2 Ensayos del modelo

El modelo fue ensayado para cada una de las etapas consideradas en el modelo conceptual. A continuación se explica como se llevó a cabo la aplicación del modelo desde la etapa de construcción hasta la etapa de clausura. Los resultados de estos ensayos se presentan en el numeral 4.5.1.

▪ Ensayo 1

El ensayo se realizó para estimar caudales por escorrentía durante la etapa de construcción del relleno sanitario (etapa 0) y para caudales generados durante la impermeabilización y construcción del sistema de drenajes y filtros (etapa 1).

Para el ensayo no se contaba con información sobre registros de caudales de escorrentía, razón por la cual no fue posible realizar ningún tipo de calibración del modelo para las etapas 0 y 1; sin embargo, para aplicar el modelo se tuvo en cuenta el proceso constructivo del relleno sanitario El Guacal presentado en los informes mensuales de interventoría (ARES, 2006 – 2008).

En una hoja de cálculo se agrupó la modelación para la etapa 0 y 1. Primero, se ingresó la información climática correspondiente a la precipitación diaria y temperatura media; para esta información se utilizaron datos de la estación Astilleros (1183957 N, 823092 E), la cual es una de las estaciones más cercanas al relleno sanitario El Guacal. Se utilizó esta fuente de información, ya que durante la construcción del relleno no se realizaron mediciones de estas variables climáticas. Con esta información el modelo calculó la evaporación potencial.

Los balances hídricos se empezaron a realizar desde el día en que se inició la conformación del fondo del relleno sanitario, esta fecha fue tomada de los informes de interventoría. De acuerdo al periodo de construcción del relleno sanitario, se definió el tiempo de duración de la etapa 0 y de la etapa 1. Definidos estos periodos, se ingresó al modelo toda la información necesaria sobre el relleno sanitario, parámetros hidráulicos y condiciones iniciales de almacenamiento. Esta información se suministró para las dos etapas analizadas.

Conforme a lo presentado en el numeral 5.3 sobre funcionamiento del modelo, se organizó el conjunto de tanques de cada una de las etapas para realizar los balances hídricos respectivos. Los procesos que ocurren en cada tanque fueron estimados de acuerdo a las ecuaciones del modelo conceptual planteado para la etapa 0 y 1.

▪ **Ensayo 2**

El ensayo se realizó para estimar los caudales de lixiviados generados durante la operación del relleno sanitario El Guacal. Para esta etapa, el modelo primeramente se ensayó asumiendo que la operación del relleno sanitario se realiza conforme a lo establecido en la Figura 47. En una hoja de cálculo se colocó columna a columna la información de precipitación diaria, la de temperatura, evaporación potencial diaria y los caudales de lixiviados medidos en el relleno sanitario. Luego, se establecieron: la condición de almacenamiento máximo H_u , los almacenamientos iniciales para cada tanque del modelo; es decir los H_i ; además, se asignaron valores para los parámetros de infiltración y evaporación del tanque 1; y se definieron unos valores para las conductividades hidráulicas de la capa de residuos sólidos y la capa de drenaje y filtros.

Se calcularon en una columna las alturas diarias de residuos sólidos a partir de su cantidad, su densidad y del área de la celda o zona de disposición. A partir de las alturas acumuladas y teniendo en cuenta el planteamiento de la operación del relleno sanitario, se logró programar entonces la operación en cada zona de trabajo.

Otro dato que se estimó en el modelo fueron los contenidos de humedad presentes en las celdas diarias o zonas de disposición. El valor se obtuvo a partir de la altura diaria de la celda, del porcentaje de humedad y de la densidad de compactación de los residuos sólidos. El realizar el producto de estos parámetros, se obtuvieron los mm de agua presente en la celda por la humedad contenida en los residuos sólidos.

En la hoja de cálculo se realizó el montaje del modelo conceptual establecido para la etapa 3, es decir la etapa de operación. El montaje consistió en acoplar para cada zona de trabajo el balance hídrico diario de acuerdo al modelo conceptual establecido; para esto, se asignó una columna para cada “tanque”. En la hoja de cálculo se ordenaron sucesivamente el número de tanques para las condiciones iniciales, nuevamente para las entradas de agua, los estados intermedios, salidas de agua y estados finales.

Los balances se realizaron para cada zona de acuerdo a la operación programada. Ésta programación definió los condicionales para las ecuaciones de balance, es decir, las ecuaciones se amarraron al estado operativo presente para cada zona; por ejemplo, los aportes de humedad por parte de los residuos sólidos solo se tuvieron en cuenta en las ecuación de estimación de entrada de agua para el tanque 2, cuando se estaban disponiendo residuos sólidos en la zona de trabajo “x” (ecuación 5.32).

Finalmente, cada zona generaba unos caudales de lixiviados, los cuales se totalizaron para obtener una serie de caudal simulada para el relleno sanitario.

▪ **Ensayo 3**

Se realizó con el mismo método del ensayo 2 y utilizando la misma hoja de cálculo; sin embargo, la hoja de cálculo del modelo se programó para tener en cuenta la forma operativa real del relleno sanitario El Guacal.

Para éste ensayo se tuvo en cuenta el proceso operativo del relleno sanitario El Guacal llevado a cabo hasta el año 2007, ya que solo hasta ese año, fue posible determinar claramente a partir de los informes de interventoría, como fue el crecimiento del relleno sanitario con relación a la disposición de los residuos sólidos.

Para obtener una serie de caudales simuladas, en la hoja de cálculo se intento reproducir aproximadamente el crecimiento real del relleno sanitario de forma diaria; luego, se ingresaron al modelo los valores de los parámetros hidráulicos y condiciones iniciales utilizados en el ensayo 2. Finalmente, con la misma información climática e iguales ecuaciones de balance hídrico utilizadas en el ensayo anterior, se obtuvo una serie de caudales de lixiviados, la cual se comparó con la serie real para su respectivo análisis.

La programación del modelo para el ensayo 3 y los resultados del mismo, se utilizaron para realizar el proceso de calibración.

5.4.3 Proceso de calibración

La calibración del modelo se realizó para la etapa de operación del relleno sanitario (etapa 2), ya que para las demás etapas no se contaba con registros de caudales de lixiviados necesarios para comparar los caudales simulados y reales. Los resultados de la calibración se presentan en el numeral 5.5.2.

Al realizar los balances hídricos conforme al ensayo 2 y 3, se obtuvieron una serie de caudales simulados, los cuales se compararon con la serie real de caudales de lixiviados medidos en el relleno sanitario El Guacal. Las primeras evaluaciones del modelo se realizaron con los resultados del ensayo 2, validando los valores de los parámetros hidráulicos, las condiciones iniciales de almacenamiento y las características de los residuos sólidos. Luego de identificar los parámetros para los cuales el modelo era más sensible, se probó el modelo conforme al ensayo 3 y se analizó la serie de caudales simuladas por el modelo con los caudales reales.

La calibración del modelo consistió entonces, en validar los valores ingresados al modelo (parámetros hidráulicos) hasta lograr que la serie simulada adquiriera un comportamiento

parecido al de la serie de caudales reales. Vale aclarar, que los valores dados para estos parámetros se encuentran dentro de un rango establecido en diferentes bibliografías, como resultados de ensayos de campo y laboratorio.

5.4.4 Escenarios de modelación

Después de calibrado el modelo y haber identificado los factores que más inciden en la generación de los caudales de lixiviados de un relleno sanitario, se hizo uso del modelo para analizar el comportamiento de los caudales de lixiviados bajo diferentes escenarios de operación y bajo condiciones climáticas distintas. A continuación se explican los escenarios propuestos en éste trabajo.

- **Escenario 1: “Clausura y posclausura del relleno sanitario”**

Se planteó para evaluar la etapa 3 del relleno sanitario y estimar la producción de lixiviados del relleno sanitario El Guacal después de su clausura.

Para éste escenario ya todo el vaso norte del relleno sanitario se encuentra terminado y por consiguiente se ha instalado la cobertura final del relleno. Bajo estas condiciones el modelo se aplicó para observar como se comportaban los caudales de lixiviados.

Para simular el escenario, se tuvo en cuenta la base conceptual del modelo para la etapa 3 del relleno sanitario. Bajo las condiciones de esta etapa, se establecieron los valores que el modelo requiere, tales como parámetros hidráulicos y condiciones iniciales para cada uno de los tanques que hacen parte de esta etapa (tanque 1 y 2 representan la cobertura final del relleno sanitario; tanque 3 y 4, la capa de residuos sólidos y la capa de drenaje); estos valores fueron tomados del ensayo 1 y de la calibración del modelo.

Con relación al relleno sanitario, se asumió que para agosto de 2008 ya el vaso norte del relleno sanitario se encontraba clausurado; con esto, se fijaron las alturas alcanzadas por la capa de residuos sólidos en el ensayo 3 y se tuvo en cuenta el diseño del relleno sanitario clausurado planteado en la Figura 48.

El escenario de clausura se modeló desde agosto de 2008 hasta diciembre de 2011, utilizando información de tres años de lluvia continuos de la estación Astilleros por ser la más cercana al relleno sanitario El Guacal. Los años utilizados corresponden a registros pasados que obedecen a: año 2000 (año La Niña), año 2001 (año Normal) y año 2002 (año El niño).

▪ **Escenario 2: Variables climáticas distintas: “el relleno sanitario en otro sitio de localización”**

Teniendo en cuenta que la precipitación es uno de los factores climáticos que más incide en la cantidad de lixiviados que se producen durante la operación de un relleno sanitario, el Escenario 1 tiene como objetivo evaluar los caudales de lixiviados generados durante la operación del relleno sanitario El Guacal pero con unas condiciones de precipitación muy diferentes a las del sitio de localización del relleno.

Para modelar el escenario, se seleccionó un sitio para simular la operación del relleno sanitario bajo unas condiciones de menores precipitaciones a las del relleno sanitario El Guacal. La selección del sitio se realizó teniendo en cuenta lo siguiente:

Durante la realización de los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos – PGIRS de los municipios son competencia de Corantioquia, estos entes territoriales estuvieron en la obligación de identificar y proponer sitios potenciales para la disposición final de residuos sólidos; estos sitios después de ser previamente seleccionados fueron evaluados conforme a lo establecido en el Decreto 838 de 2005 sobre disposición final de residuos sólidos y otras disposiciones. En éste Decreto se establecen las reglamentaciones y restricciones de localización bajo criterios ambientales y sociales, que aunque desde el punto de vista ambiental, consideran muchos factores de carácter hidrológico, no establecen los regimenes de lluvia como un factor limitante en la localización de un relleno sanitario.

La aplicación de éste decreto para el componente de disposición final de los PGIRS, arrojó para los municipios bajo la competencia Corantioquia y los que conforman el Valle de Aburrá un conjunto de sitios potenciales. Sin embargo, durante la elaboración del Plan de ordenación y manejo de la Cuenca del río Aburrá – POMCA (Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín, 2007) estos sitios se redefinieron conforme al Decreto 838/2005 y bajo las herramientas de SIG, dando como resultados un mapa de identificación de sitios realmente potenciales. El mapa se presenta en la Figura 49 y en éste se ha localizado el relleno sanitario El Guacal.

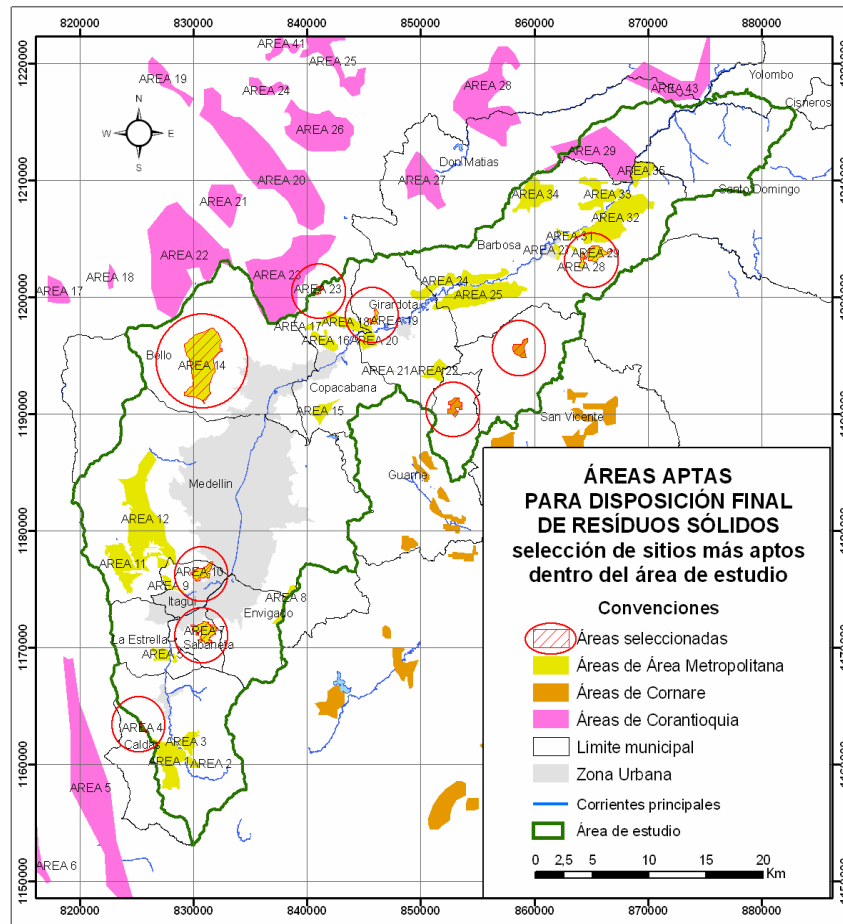


Figura 49. Sitios potenciales de disposición final para escenarios de localización
Fuente: Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín (2007).

De esta forma, teniendo en cuenta los sitios establecidos como potenciales para la disposición final de residuos sólidos y considerando las condiciones climáticas de los mismos, se propone simular los caudales de lixiviados para el relleno sanitario, localizando el relleno en uno de los sitios propuestos, y que a su vez, con una precipitación de un orden mucho menor a la del sitio de localización de éste relleno sanitario (2800 mm/año)

La selección del sitio para simular el escenario, tuvo en cuenta además del mapa presentado en la Figura 49, la caracterización de la precipitación para las zonas donde se encuentran estos sitios potenciales; para esto, se utilizó el mapa de precipitación medial anual elaborado en el proyecto POMCA, el cual se presenta en la Figura 50.

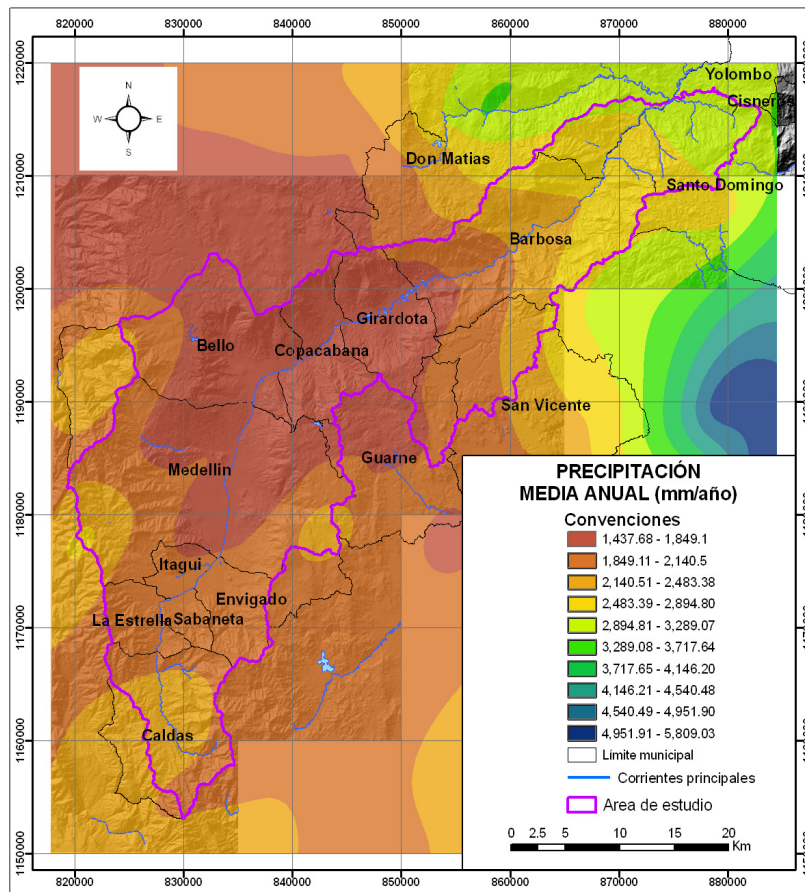


Figura 50. Mapa de precipitación media anual para los municipios donde se localizan los sitios potenciales de disposición final

Fuente: Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín (2007).

Teniendo en cuenta que se desean simular estos caudales con una serie de lluvia de una zona con menor precipitación, se seleccionó el sitio del Área 14 para localizar al relleno sanitario. El sitio se encuentra localizado en el Municipio de Bello donde la precipitación media anual es del orden de 1437.68 mm/año

La serie de precipitación utilizada para el escenario corresponde a la de la estación Fabricato (1195470 N y 831500 E) de la cual se tomaron registros de los años 2006, 2007 y 2008.

▪ **Escenario 3: “Optimización de la operación del relleno sanitario El Guacal”**

Los escenarios propuesto para optimizar la operación del relleno sanitario El Guacal y a su vez reducir la cantidad de lixiviados que se generan en su interior se presentan a continuación.

Reducción de humedad en los residuos sólidos: después de haber calibrado el modelo e identificar los parámetros ante los cuales la producción de lixiviados es más sensible, se proponen unos escenarios de operación para el relleno sanitario El Guacal, en los cuales se plantea mejorar algunas de las técnicas empleadas para la disposición final de los residuos sólidos.

Con relación a la humedad presente en los residuos sólidos, la calibración del modelo permitió identificar que esta variable incide notoriamente en el crecimiento de los caudales de lixiviados. En el modelo de balance hídrico la humedad de los residuos sólidos se comporta como una entrada o aporte de agua a los almacenamientos de lixiviados presentes en interior de la capa de residuos, y de esta forma incide en el aumento de la cantidad de líquido disponible para salir como lixiviado. Además, una gran cantidad de agua presente en los residuos sólidos puede acelerar la descomposición de los mismos y generar a su vez mayor cantidad de lixiviados. Teniendo en cuenta lo anterior, se plantea una modelación para unos residuos sólidos con bajo contenido de humedad; esta condición se puede lograr si se implementa de forma continua la técnica de enfardado y secado de los residuos sólidos que se ha llevado a cabo de forma eventual en algunos periodos cortos de operación eficiente en el relleno sanitario. La modelación de los caudales se realizó asumiendo un contenido en porcentaje de humedad del 2% por peso de residuo.

Uso de coberturas diarias no permanentes: para esta técnica, se plantea que en el relleno sanitario se utilicen de forma continua las coberturas diarias no permanentes (material sintético), las cuales están destinadas a mantener aisladas las áreas o zonas de trabajo de los efectos del medio ambiente, esto durante el tiempo en que las mismas no se están operando. Bajo estas condiciones se espera que las entradas de agua por precipitación al relleno sanitario, sean reducidas en un porcentaje considerable, logrando de esta forma disminuir cuantitativamente la producción de lixiviados.

El escenario se modela pensando que los contenidos de humedad en los residuos sólidos son menores y que el relleno sanitario siempre va a estar protegido de algunos efectos del medio ambiente (entrada de lluvia).

Para reducir las entradas de agua por precipitación al relleno sanitario, se estimó un porcentaje de agua que sale del relleno sanitario por escorrentía directa, debido al uso de coberturas impermeables y a la pendiente del talud de los residuos sólidos depositados en el relleno sanitario.

Qasim y Chiang (1994), argumentan que el método comúnmente más usado para estimar las escorrentías superficiales en un relleno sanitario es el método racional; sin embargo Schroeder et al. (1994), recomienda el método del número de curva propuesto por el Soil Conservation Service of the United States (SCS), éste método es el usado en el modelo

HELP. Para efectos del escenario y considerando los fines para el cual fue planteado el método del número de curva (SCS), las posibles escorrentías que se generarían con las coberturas sintéticas se estimaron con el método racional. Los valores del coeficiente de escorrentía para éste método se tomaron de Qian et al. (2002).

▪ **Escenario 4: “Variación de las características de los residuos sólidos”**

Con el paso del tiempo, los residuos sólidos que fueron depositados en un relleno sanitario, sufren muchos procesos de tipo físico, químico y biológico. De los tres tipos, los procesos biológicos son los más importantes en las variaciones de los residuos sólidos y en la producción de lixiviados; sin embargo, estos procesos están muy influenciados por los procesos físicos y químicos y viceversa.

Para fines prácticos, se analizó un escenario donde se presentan variaciones en las características de los residuos sólidos asociadas a los procesos físicos que se argumentan a continuación.

Dentro de los procesos físicos que ocurren en el interior de un relleno sanitario, se tuvo en cuenta los efectos de la compresión, asentamientos y reducción del tamaño de las partículas en la producción de los lixiviados.

La compresión y los asentamientos están estrechamente relacionados. La compresión de los residuos sólidos en un relleno sanitario es un proceso continuo que inicia con la disposición y compactación de los residuos sólidos durante la etapa operativa del relleno y continúa después en el tiempo, como una consecuencia de la degradación de los residuos y debido a la fuerza ejercida por el peso de la carga sobrepuesta de los residuos sólidos y la cobertura de tierra (Cheney, 1983).

El asentamiento de los residuos sólidos y del suelo debido a la fuerza de gravedad, también son responsables de parte de la consolidación de estos materiales. Los asentamientos, definidos como la disminución del volumen que tenía una masa determinada; son un resultado final de la compresión. Estos asentamientos también se pueden producir por otros procesos, tales como la pérdida de masa debido a la descomposición química y biológica de los residuos sólidos (EPA, 1994).

De otra parte Cheney (1993), expone que la reducción del tamaño de las partículas ocurre como consecuencia de algunos procesos físicos y bioquímicos que ocurren en el relleno sanitario, tales como la compactación diaria de los residuos sólidos y la actividad microbiana que ocurre de forma cambiante sobre la composición de los residuos.

Visto de esta forma, se puede pensar que bajo los efectos de estos procesos físicos, muchas de las características físicas de los residuos sólidos cambian considerablemente;

entre estas se pueden mencionar: la densidad de los residuos sólidos, la porosidad y la conductividad hidráulica; sin embargo, muchos de los cambios de estas características generan variaciones en muchas de los parámetros hidráulicos de los residuos sólidos, ó de forma contraria, se podría esperar que sus variaciones sean el efecto de otros cambios presentados en la constitución de los residuos sólidos.

Se consideraron las variaciones que pueden presentar las características mencionadas anteriormente, como resultado de la compresión y asentamientos que se dan en un relleno sanitario. Estas características fueron seleccionadas, teniendo en cuenta que durante la calibración del modelo, se pudo determinar que influyen notoriamente en la cantidad de lixiviados que se generaban durante la simulación de la etapa operativa del relleno sanitario.

Bajo estos argumentos, se asume una reducción en la permeabilidad de los residuos sólidos debido a la compactación y asentamientos de estos materiales, e igualmente, cambios en la porosidad y un aumento en la densidad de los residuos sólidos.

El escenario se modelo para la parte operativa del relleno sanitario y para el relleno sanitario clausurado. Los resultados se presentan en el numeral 5.5.3.

5.5 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DEL MODELO

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones generadas por el modelo propuesto. Las simulaciones corresponden a: ensayos de la modelación, calibración del modelo y escenarios propuestos para el relleno sanitario El Guacal.

5.5.1 Resultados de los ensayos de la modelación

En éste numeral se presentan los resultados de los cuatro ensayos realizados para probar el funcionamiento del modelo. Para cada ensayo se presentan los valores ingresados inicialmente en el modelo y la gráfica de los resultados del mismo para su respectivo análisis:

▪ Resultados: ensayo 1

Para el ensayo, los resultados corresponden a la aplicación del modelo para la etapa 0 y 1 del relleno sanitario. En la Tabla 24 se presentan los valores de los parámetros hidráulicos y condiciones iniciales de almacenamiento requeridos por el modelo.

La Figura 51 presenta la serie de caudales obtenidas. La serie es comparada con la precipitación.

Tabla 24. Valores ingresados inicialmente al modelo – Ensayo 1

VALORES PARA EL MODELO: ENSAYO 1		
Parámetros para el modelo:	Etapa 0	Etapa 1
Almacenamiento capilar capa sup. (mm) (Etapa 0: suelo, Etapa 1:capa de drenaje)	20.0	5.0
Conductividad capa sup. (mm/día)	5.0	-
Conductividad capa inf. (mm/día)	3.1	-
Perdidas subterráneas (mm)	0.0	-
Conductividad capa impermeable (mm/día)	-	1.72E-07
Conductividad capa de drenaje (mm/día)	-	2.6 E 05
Tiempo medio de residencia flujo superficial	2.0	-
Tiempo medio de residencia flujo subsuperficial	10.0	-
Tiempo medio de residencia flujo base	120.0	-
Condiciones iniciales (mm):		
Almacenamiento capilar capa sup. (mm) Etapa 0: suelo, Etapa 1:capa de drenaje)	5.0	1.0
Almacenamiento agua superficial capa sup. (mm)	0.0	0.0
Almacenamiento gravitacional Z sup. (mm)	0.0	0.0
Almacenamiento gravitacional Z inf. (mm)	150.0	-
Otros parámetros del modelo:		
Exponente infiltración	2.0	0.5
Exponente evaporación	0.7	0.7
Temperatura media °C	12.7	12.7
Radiación global incidente promedia (cal/cm ²)/día	387.26	387.26

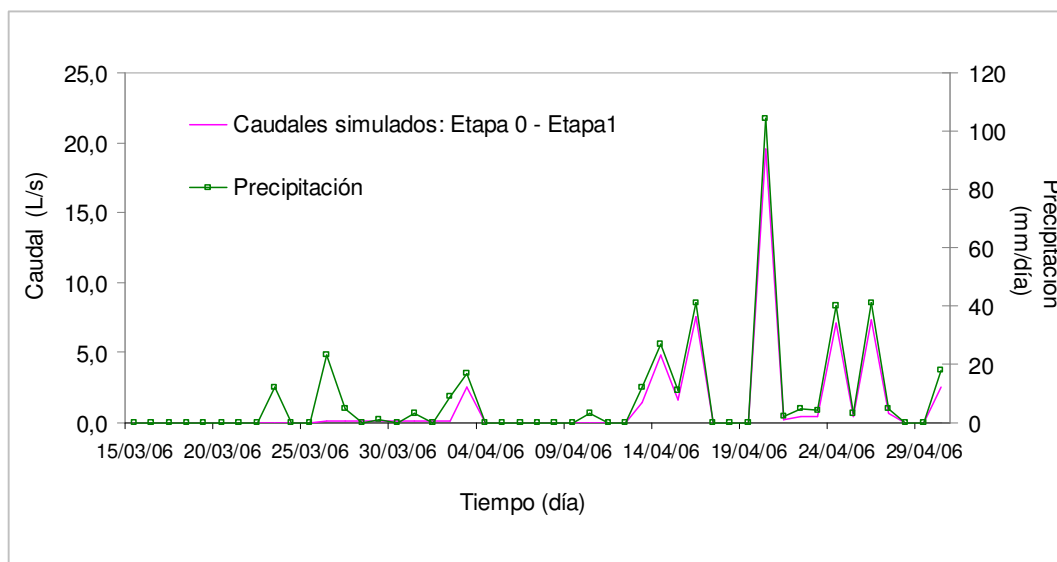


Figura 51. Serie de caudales Vs. Precipitación. Ensayo 1 (Etapa 0 y Etapa 1) Valores diarios de caudales aportados durante la construcción del relleno sanitario. Nota: caudales estimados sin calibración. Periodo de simulación del 15/03/2006 -30/04/2006.

Los caudales presentados en esta figura, obedecen a una estimación de caudales de escorrentía generados por el área que conforma toda la zona donde se van a depositar los residuos sólidos.

Los valores obtenidos en la modelación de las etapa 0 y 1 no corresponden a la realidad y, por consiguiente, son valores que no pudieron ser calibrados, además de no contar con aforos de caudales realizados durante la etapa constructiva del vaso norte. El área para calcular estos caudales, se asumió como el área total destinada para conformar todo el vaso norte del relleno sanitario El Guacal. En la realidad se piensa que la generación de estos caudales fue mucho menor que los simulados por el modelo, ya que la construcción de éste vaso fue una actividad que se fue realizando de forma progresiva a medida que aumentaba la cantidad de residuos sólidos que ingresaban al relleno sanitario; y es consecuente que el área del vaso norte, fuera creciendo conforme a los residuos sólidos.

Realizando la modelación de acuerdo al modelo conceptual planteado para estas dos etapas, se puede observar en la gráfica, que en los primeros días del periodo de modelación, no hay formación de caudales, debido a la ausencia de precipitación; sin embargo, cuando se registran días con precipitación, la construcción del vaso no reporta caudales considerables, ya que el fondo del relleno no se encontraba impermeabilizado, y gran parte del agua que caía sobre éste, pudo ser almacenada por el suelo y luego salir como escorrentía subsuperficial, o pudo infiltrarse en las capas más profundas del fondo del relleno sanitario.

Solo hasta cuando se asume una impermeabilización total del vaso, los caudales de escorrentía son proporcionales a la precipitación, ya que la línea de geomembrana instalada en todo el vaso evita que se den infiltraciones de agua lluvia. Éste comportamiento de los caudales se da en la etapa 1, para la cual se asumió que todo el vaso norte se había impermeabilizado. En la realidad, la impermeabilización no fue de forma completa e inmediata, si no, que también se realizaba conforme iba creciendo el área del vaso de disposición de los residuos sólidos.

Con esta modelación se quiso plantear una forma de estimar los efectos de la construcción del relleno sanitario sobre la red de drenaje natural; específicamente, la generación de caudales de escorrentía que van acompañados de sedimentos provenientes de los movimientos de tierra realizados durante la adecuación de la zona donde se van a depositar los residuos sólidos.

La estimación de estos caudales reviste de gran importancia para los estudios de impacto ambiental de un relleno sanitario durante su fase constructiva, igualmente, para estimar los caudales de diseño para la construcción de estructuras de encauzamiento de aguas lluvias para el relleno sanitario.

▪ **Resultados: ensayo 2**

Los resultados corresponden a la aplicación del modelo para la etapa 2 del relleno sanitario (etapa de operación). En la Tabla 25, Tabla 26 y Tabla 27, se presentan los valores de los parámetros hidráulicos y condiciones iniciales de almacenamiento requeridos por el modelo. En la Figura 52 se presentan las series de caudales de lixiviados reales y caudales simulados. A partir de ésta figura, se realizaron los análisis de los resultados de éste ensayo.

Tabla 25. Información climática ingresada al modelo

INFORMACIÓN CLIMÁTICA				
Precipitación:				
Estación	Nombre	x	y	Cota
Pluviómetro	El Guacal	819271.01	1183466.293	2692.161
Otras variables:				
Radiación global incidente promedia (cal/cm ²)/día				387.26
Temperatura media °C				12.7

Tabla 26. Características para la capa de residuos sólidos - Ensayo 2

VALORES DE RESIDUOS SÓLIDOS EN EL MODELO: ENSAYO 2 Y 3	
Porosidad	0.67
Conductividad hidráulica saturada (mm/día) (0,001 cm/s)	864
Capacidad de campo	0.292
Punto de marchitez	0.077
Contenido de humedad	0.29
Contenido de humedad residual	0.046

Fuente: Schroeder et al. (1994).

Tabla 27. Valores ingresados inicialmente al modelo – Ensayo 2

VALORES PARA EL MODELO: ENSAYO 2 Y 3	
Parámetros para el modelo:	Etap 2
Almacenamiento de humedad para evaporación - RSU (mm)	20.0
Conductividad hidráulica de RSU (mm/día)	8.64E02
Conductividad capa drenaje (mm/día) (Schroeder et al., 1994)	2.6E05

VALORES PARA EL MODELO: ENSAYO 2 Y 3	
Condiciones iniciales (mm):	
Almacenamiento de agua para evaporación en RSU (H_{i1}) (mm)	5.0
Almacenamiento gravitacional Z inf. capa de RSU (H_{i2}) (mm)	0.0
Almacenamiento capa de drenaje (H_{i3}) (mm)	0.0
Otros parámetros del modelo:	
Exponente infiltración	2.0
Exponente evaporación	0.7

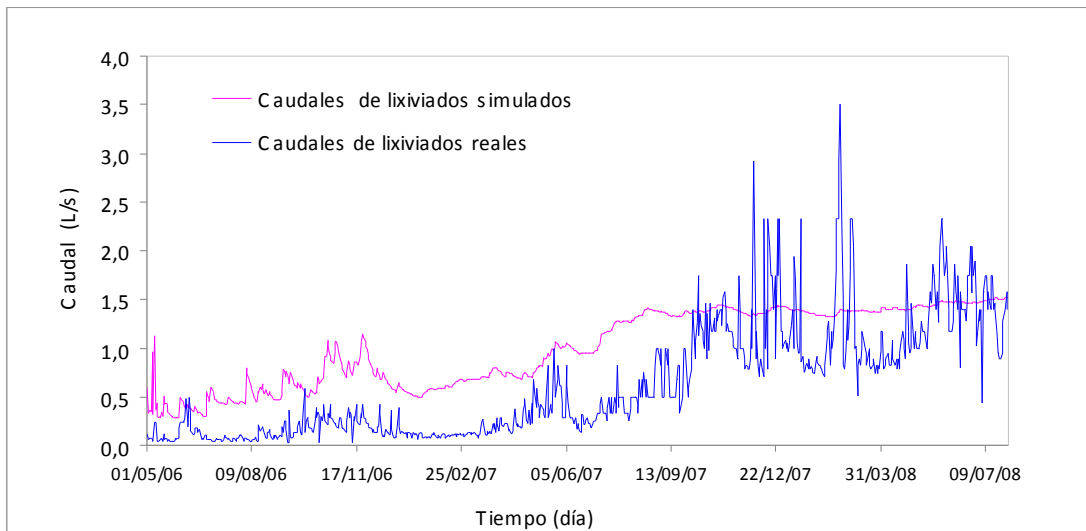


Figura 52. Serie de caudales simulados Vs. caudales reales. Ensayo 2 (Etapa 2) Valores diarios de caudales de lixiviados. Periodo de simulación del 01/05/2006 -31/07/2008

Los caudales simulados por el modelo se alejan en magnitud y comportamiento de los caudales reales, esto es consecuente con la modelación, ya que para éste caso, se asumió el proceso operativo presentado en la Figura 47, el cual, se aleja del método utilizado para disponer los residuos sólidos en el relleno sanitario El Guacal. Aunque el esquema operativo fue asumido, se propuso para la programación del modelo, ya que fue considerado como un proceso ordenado y coherente para una buena disposición de los residuos, además de tener un buen manejo de las alturas en el crecimiento de las plataformas de los residuos sólidos.

En la Figura 52 se observa que la serie de caudales simulados hasta el mes de marzo de 2007, presenta un comportamiento muy parecido al de la serie de caudales reales; sin embargo, se aleja mucho en cuanto a la cantidad de lixiviados que se producen en éste tiempo. Esta similitud se asocia al hecho de que durante éste periodo, el relleno sanitario El Guacal se operó de forma muy parecida al proceso operativo asumido. La diferencia

entre las magnitudes, se deduce que pueden estar asociadas a los valores de los parámetros ingresados al modelo, en especial al contenido de humedad estimado para los residuos sólidos; muestra de esto son los caudales que simula el modelo para los primeros días del mes de mayo de 2006, en los cuales, la cantidad de agua que entra al relleno sanitario para convertirse en lixiviados es mucho mayor para los aportes de humedad por parte de los residuos sólidos que por precipitación.

Los caudales simulados por el modelo presentan variaciones dentro del rango de 0.3 – 1.15 L/s para el primer año de operación (2006). Los picos y bajos de la serie obedecen a los efectos de la precipitación y el crecimiento de los valores de caudal se relaciona con el aumento en la cantidad de los residuos sólidos depositados diariamente en el relleno sanitario.

A partir del segundo año de operación, la serie caudales simulados alcanza un valor máximo de 1.52 L/s, conservando un comportamiento muy por debajo de las magnitudes de los caudales reales, manteniéndose dentro del rango de los 1.30 – 1.52 L/s. Éste comportamiento responde al proceso operativo que se programó en el modelo, para el cual, cuando el relleno sanitario alcanza alturas considerables por encima de los 25 m, en el interior del relleno, se establece una capacidad de almacenamiento suficiente como para solo permitir que la cantidad de líquido que salga como lixiviado, se determine por el coeficiente de descarga, el cual a su vez depende de la velocidad real del flujo que se presenta en el interior de la capa de residuos sólidos.

De acuerdo con lo anterior, se cree que si un relleno sanitario se opera de la forma en que se asumió el proceso operativo para éste ensayo, los caudales de lixiviados generados por ese relleno sanitario presentarían un comportamiento creciente durante el primer año de su operación y luego, alcanzarían un estado estable por los años siguientes, siempre y cuando el patrón operacional sea tan ordenado como el asumido en éste ensayo. Visto de esta forma, un sistema de tratamiento para estos lixiviados puede ser diseñado para los caudales máximos alcanzados con esta operación y asegurar una capacidad permanente durante un gran tiempo de operación, que es la etapa donde se espera que el sistema de tratamiento maneje los mayores caudales.

Lo mencionado anteriormente, es una apreciación que se hace de acuerdo a los resultados del ensayo; sin embargo, dista de ser una conclusión, ya que para esto, sería necesario tener y analizar una serie de caudales de lixiviados de un relleno sanitario que haya sido o sea operado de una forma muy sincronizada y con un seguimiento muy continuo; y posteriormente aplicar el modelo y programarlo para el relleno, de forma tal que se puedan correlacionar los caudales de lixiviados simulados y los caudales reales.

Con relación a los caudales reales presentados en la Figura 52, el aumento de estos caudales en el tiempo, estaría relacionado con el crecimiento de las áreas de disposición

final de los residuos sólidos para el vaso norte. Los informes mensuales sobre la operación del relleno sanitario El Guacal, dejaban ver que a medida que ingresaban más toneladas mensuales de residuos sólidos al vaso norte, se iba ampliando el área de disposición final y se aumentaban las longitudes de la red de recolección de lixiviados. De esta forma, entre mayor fuera el área de las plataformas de residuos sólidos que estaba en contacto con la lluvia, mayor eran los caudales de lixiviados registrados para el relleno sanitario.

Aunque los resultados obtenidos con el ensayo, mostraron estar muy distante de la realidad; el planteamiento y programación del modelo quedaron como una herramienta útil para realizar evaluaciones en cuanto al comportamiento de los caudales de lixiviados y la forma operativa de un relleno sanitario.

▪ Resultados: ensayo 3

Los resultados corresponden a la aplicación del modelo para la etapa 2 del relleno sanitario (etapa de operación) pero programando el modelo con la operación real del relleno sanitario El Guacal. Los valores ingresados al modelo fueron los utilizados en el ensayo 2. En la Figura 53 se presentan los resultados de éste ensayo.

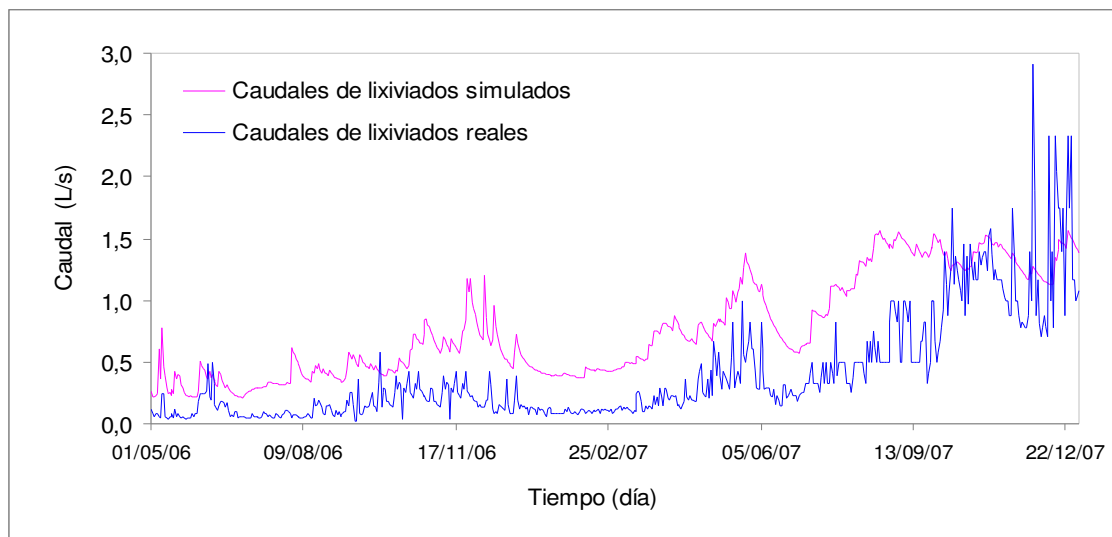


Figura 53. Serie de caudales simulados Vs. caudales reales. Ensayo 3 (Etapa 2) Valores diarios de caudales de lixiviados. Periodo de simulación del 01/05/2006 -31/12/2007 para operación real del relleno sanitario El Guacal.

Para el ensayo, el modelo se programó de acuerdo a la forma en que se operaba el relleno sanitario El Guacal; sin embargo, los caudales simulados a pesar de que habían adquirido un comportamiento bastante parecido al de los caudales reales, seguían estando muy por encima de estos con relación a la magnitud.

De acuerdo con la Figura 53, para el año 2006 y parte del año 2007 (primer semestre) la respuesta de los caudales simulados es muy parecida a la de los caudales reales; aunque son notorias algunas diferencias en el comportamiento de la serie simulada con relación a la serie real; esto se puede asociar a lo siguiente: durante el análisis de los caudales lixiviados registrados en la operación del relleno sanitario, se encontraron muchos datos que no eran coherentes con los eventos de precipitación y con los de una serie normal de caudales; por ejemplo, se hallaron muchos periodos de tiempo en que los caudales tomaban un mismo valor por más de cinco días a pesar de registrarse eventos de lluvia considerables; como también fue común, encontrar picos muy altos de caudales en periodos donde las precipitaciones eran demasiado bajas e incluso nulas. De acuerdo con lo anterior, las diferencias fueron despreciables y el análisis se centro en encontrar las posibles causas de las diferencias en magnitud entre estas dos series.

Para el segundo semestre del año 2007, los caudales simulados toman un comportamiento creciente hasta alcanzar un valor de 1.5 L/s; a partir de éste momento la serie oscila dentro de un rango muy parecido de 1.3 – 1.5 L/s hasta terminar el periodo de modelación. Los valores y la manera en que la serie se simula durante éste tiempo, siguen estando muy alejados de la serie real de caudales de lixiviado. Se piensa que una de las razones por las cuales se presenta éste comportamiento, es que los caudales reales son una respuesta total a la forma como se ha venido operando el relleno sanitario. Para el ensayo, fue completamente difícil que el modelo simulara éste proceso de forma similar, ya que no se tenía un seguimiento continuo y ordenado de la operación del relleno sanitario.

Finalmente, para abrir paso al proceso de calibración, los resultados del ensayo se analizaron, teniendo en cuenta, que, varias de las razones por las cuales la serie simulada era mucho mayor que la real, podrían ser las siguientes: que el modelo asumía que toda la precipitación entraba al relleno sanitario; sin tener en cuenta, que en la realidad, una pequeña parte de la precipitación es evacuada por un sistema de drenaje de aguas lluvias. Que el contenido de humedad asumido para los residuos sólidos podría ser muy alto. Que los valores asumidos como condiciones de almacenamientos máximos e iniciales, estarían generando un gran aumento en la formación de los caudales simulados. Por último, que el valor tomado para la conductividad hidráulica de la capa de residuos sólidos tal vez era muy alto y por consiguiente, es mucho mayor la cantidad de lixiviados que el modelo simula como salida.

5.5.2 Resultados de la calibración del modelo

El modelo se calibró con los resultados del ensayo 3, ya que los resultados de esta simulación se asimilaban a la serie de caudales reales. Con relación a los valores y parámetros que el modelo requiere, se validaron las condiciones de almacenamiento H_u y

H_i (condiciones iniciales), la conductividad hidráulica de los residuos sólidos y velocidad real para estimar el coeficiente de descarga del “Tanque 3 – Etapa 2” (parámetros descritos en la ecuación 5.8 y 5.10).

En las siguientes tablas se presentan los valores de los parámetros y de las características de los residuos sólidos para los cuales fue posible calibrar el modelo. En la Figura 54 se muestran los resultados de la simulación generada por la calibración del modelo.

Tabla 28. Características para la capa de residuos sólidos – Calibración del modelo

VALORES DE RESIDUOS SÓLIDOS EN EL MODELO	
Porosidad	0.67
Conductividad hidráulica saturada (mm/día) (0,0014 cm/s)	1.21E03
Capacidad de campo	0.292
Punto de marchites	0.077
Contenido de humedad	0.05
Velocidad real del flujo	1.81E03

Tabla 29. Valores ingresados inicialmente al modelo – Calibración del modelo

VALORES PARA EL MODELO	
Parámetros para el modelo:	Etapa 2
Almacenamiento de humedad para evaporación - RSU (mm)	30.0
Velocidad real del flujo en los RSU (mm/día)	1.81E03
Conductividad capa drenaje (mm/día) (Schroeder et al., 1994)	2.6E05
Condiciones iniciales (mm):	
Almacenamiento de agua para evaporación en RSU (H_{i1}) (mm)	5.0
Almacenamiento Gravitacional Z inf. capa de RSU (H_{i2}) (mm)	0.0
Almacenamiento capa de drenaje (H_{i3}) (mm)	0.0
Otros parámetros del modelo:	
Exponente infiltración	2.0
Exponente evaporación	0.7

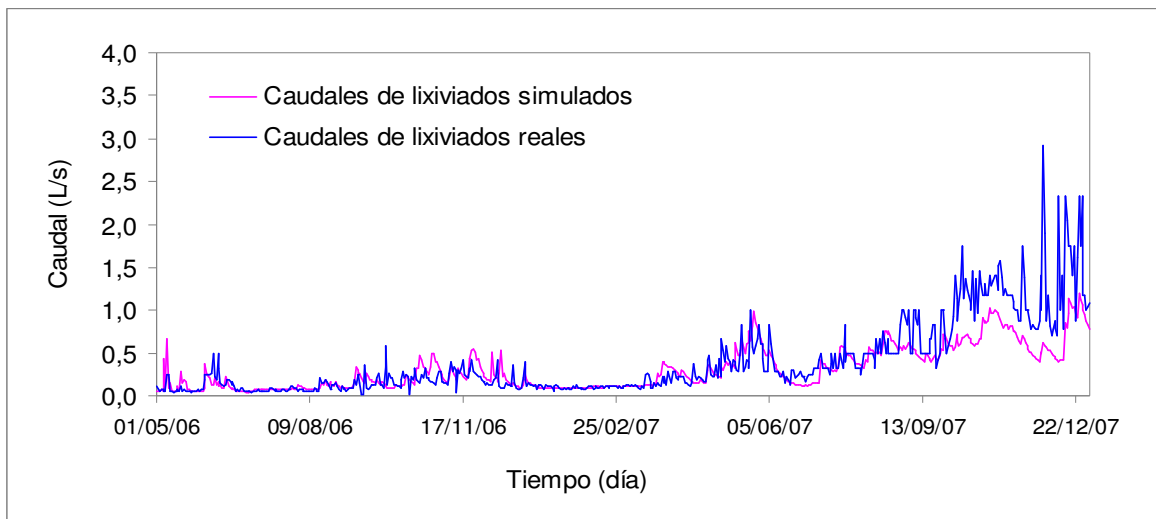


Figura 54. Resultado de la calibración del modelo
Valores diarios de caudales de lixiviados durante la operación real del relleno sanitario El Guacal.
Periodo calibrado: 01/05/2006 -31/12/2007.

De acuerdo con los resultados de la calibración, se pudo comprobar que el modelo es completamente sensible a los siguientes parámetros: contenido de humedad asumido para los residuos sólidos, capacidad de almacenamiento de la capa de residuos sólidos, la conductividad hidráulica y la velocidad real. De otra parte, se observó una gran regulación en el comportamiento de la serie simulada, al estimar la precipitación que realmente estaba entrando al relleno sanitario.

En la figura se puede observar que la calibración obtenida del 11 de mayo de 2006 al 30 de agosto de 2007, es considerada como aceptable, ya que para éste periodo, la serie simulada logra alcanzar valores bastante cercanos a los de la serie real. Las diferencias en magnitud siguen presentándose para el segundo semestre del año 2007 en adelante; aunque para la calibración, los valores de los caudales simulados logran estar por debajo de los valores de los caudales reales.

La serie simulada fue imposible calibrarla para el periodo correspondiente a septiembre de 2007 – diciembre de 2007 (período en el cual se registran los mayores caudales de lixiviados). Aunque se validaron muchas veces los valores ingresados al modelo para los parámetros que éste considera, sólo fue posible, lograr ajustar la serie para un poco más del primer año de simulación. Se sigue considerando que las diferencias entre los caudales reales y simulados, que lograron persistir después del proceso de calibración, están relacionadas con la operación real del relleno sanitario, la cual no pudo ser completamente reproducida por el modelo.

Para analizar aún más el proceso de calibración, se construyó la curva de duración, en la cual se observa en que porcentaje de tiempo los caudales simulados se alejan de los caudales reales, En la Figura 55 se presenta el gráfico de la curva de duración.

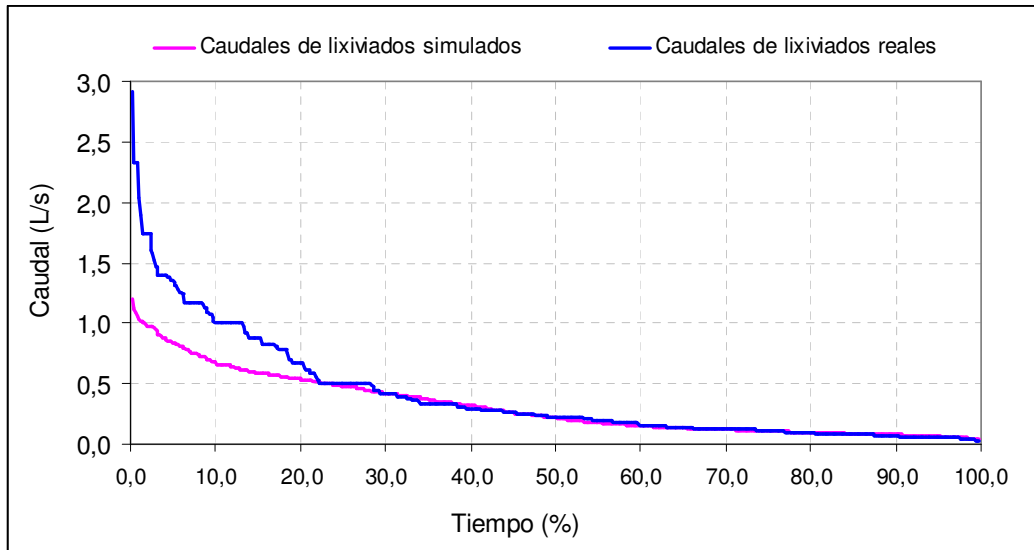


Figura 55. Curva de duración – Series de caudales de lixiviados

De acuerdo con la gráfica anterior, se puede decir que en un 23% del tiempo los caudales con mayores magnitudes son los que el modelo no logra representar en su simulación; sin embargo, esto es justificable desde el punto de vista, que el modelo para finales del período de simulación, no logró representar el crecimiento de las áreas y alturas del relleno sanitario, debido a la poca claridad en la forma en que se operaba el relleno sanitario para ese tiempo. Vale aclarar, que la generación de caudales de lixiviados está en función del área que esta en contacto con la lluvia y de la altura de las capas de residuos sólidos. En La Figura 56, se gráfica el ajuste de los caudales simulados con los caudales reales.

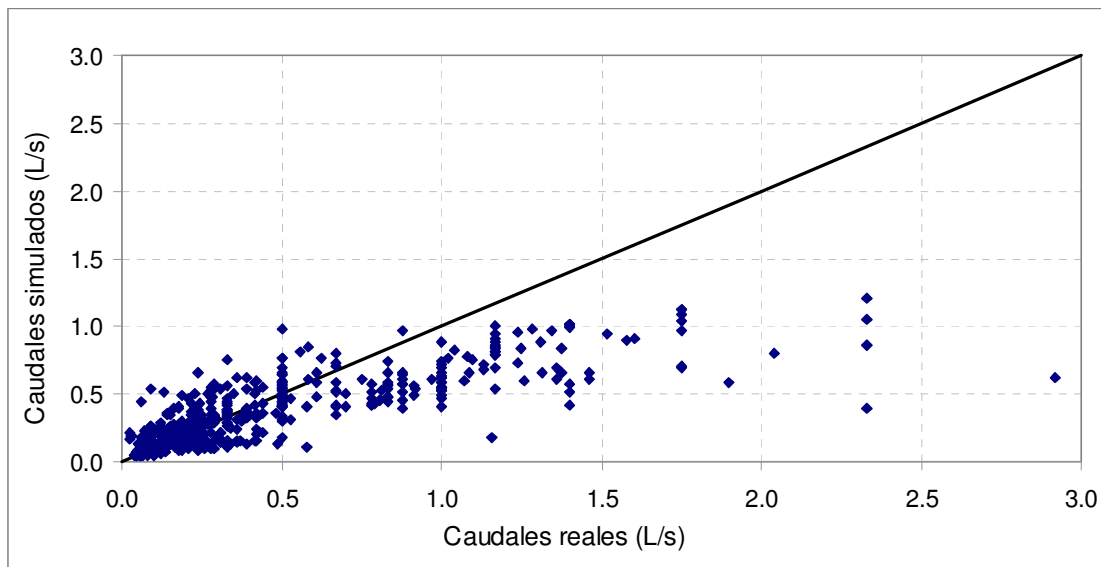


Figura 56. Ajustes de los caudales simulados con los caudales reales

En relación a la Figura 56, se puede observar que para valores de caudales entre 0 y 0.7 L/s, los caudales simulados se asemejan muy bien a los caudales reales; sin embargo, para caudales mayores a éste rango, el modelo no logra simular la realidad; esto nuevamente se relaciona con las dificultades para reproducir la operación del relleno sanitario para finales del período de simulación.

De otra parte, al analizar las series de caudales simulada y la serie real, se encontró que existe una correlación de 0.83, con una significancia estadística evaluada para un nivel de confianza del 95%. Esto es un buen indicador de la calibración del modelo y por consiguiente lo califica como confiable.

5.5.3 Resultados de los escenarios de modelación

En éste numeral, se presentan los resultados de los tres escenarios, para los cuales se analizaron los caudales de lixiviados producidos en el relleno sanitario El Guacal. Para cada escenario, se presentan los valores ingresados al modelo, la gráfica de los resultados y su respectivo análisis:

- **Resultados: escenario 1**

Los resultados corresponden a la simulación de los caudales de lixiviados para el vaso norte del relleno sanitario clausurado; es decir la modelación de la etapa 3. En la Tabla 30 Tabla 31 y Tabla 32 se presenta la información climática, las características de los residuos sólidos, los valores de los parámetros hidráulicos y condiciones de almacenamiento requeridos por el modelo.

La Figura 57 presenta la serie de caudales de lixiviados obtenida.

Tabla 30. Información climática ingresada al modelo

INFORMACIÓN CLIMÁTICA				
Precipitación:				
Estación	Nombre	x	y	Cota
Pluviométrica	Astilleros	823092	1183957	2450
Otras variables:				
Radiación global incidente promedio (cal/cm ²)/día				387.26
Temperatura media °C				12.7

Tabla 31. Valores ingresados en el modelo: cobertura del relleno sanitario – Escenario 1

VALORES PARA EL MODELO	
Parámetros Hidráulicos	
Almacenamiento capilar (mm)	50.0
Conductividad capa final (mm/día)	8.5
Conductividad capa inf. (mm/día)	3.1
Perdidas subterráneas (mm)	0.0
Tiempo medio de residencia flujo superficial (días)	2.0
Tiempo medio de residencia flujo subsuperficial (días)	10.0
Condiciones Iniciales	
Almacenamiento Capilar	10.0
Almacenamiento Agua superficial	0.0
Otros parámetros del modelo	
Exponente infiltración	2.0
Exponente evaporación	0,7

Tabla 32. Valores ingresados al modelo: capa de residuos sólidos y drenaje – Escenario 1

VALORES PARA EL MODELO	
Parámetros Hidráulicos	
Velocidad real mm/día)	1,805
Conductividad capa drenaje (mm/día)	260,000
Conductividad capa de RSU (mm/día)	1,209.6

VALORES PARA EL MODELO	
Porosidad	0.67
Condiciones Iniciales	
Almacenamiento capa de residuos sólidos	240.71
Almacenamiento capa de drenaje	0.0

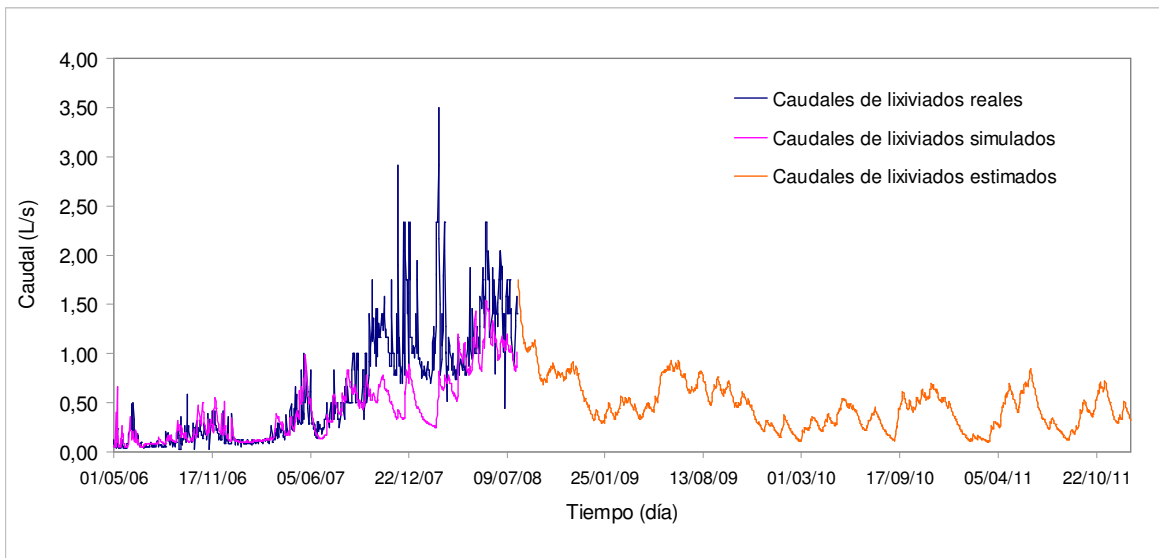


Figura 57. Caudales de lixiviados para el vaso norte del relleno sanitario El Guacal clausurado Simulación del escenario 1. Periodo de simulación: 01/05/2006 -31/07/2008. Periodo de estimación: 01/08/2008 – 31/12/2011.

Después de calibrar el modelo, se asumió que el vaso norte del relleno sanitario El Guacal llegaba a su fin a partir del mes de agosto de 2008. Para esta fecha se hizo el supuesto de que la conformación final de éste vaso corresponde a la planteada en la Figura 48. De acuerdo con lo anterior, se obtuvo una serie de caudales simulados en la Figura 57, donde se completa la serie de caudales reales y simulados con la serie proyectada al año 2011 (serie color naranja).

Los caudales simulados para el periodo: agosto de 2008 – diciembre de 2011, obedecen al balance hídrico que ocurre en el interior del relleno sanitario bajo los efectos de una poca cantidad de agua de precipitación, que se asumió, podría infiltrarse hasta la capa de residuos sólidos.

El valor máximo alcanzado en ésta serie, corresponde a 1.76 L/s, valor que se registra para el primer día de simulación del escenario de clausura. Éste valor es muy cercano al último valor registrado para la serie real (1.56 L/s), antes de iniciar la supuesta clausura del vaso norte.

Después de iniciar la simulación en éste periodo, la serie simulada varia entre un rango de 1.10 L/s – 0.14 L/s, para el cual la serie crece durante cierto periodo de tiempo con valores máximos de 1.10 L/s y mínimos de 0.57 L/s; para los menores valores la serie oscila entre los 0.50 y 0.14 L/s. Esta variaciones pueden estar dadas por la cantidad de agua que logra infiltrarse en el relleno sanitario, ya que los contenidos de humedad que quedaron presentes en el interior del relleno saldrían como lixiviado en cantidades que podrían considerarse constantes, ya que esta salida esta dada por un coeficiente de descarga que a su vez, varía con la altura del relleno sanitario; sin embargo, para el escenario de clausura ya no hay crecimientos de la capa de residuos sólidos.

En el numeral 5.5.4, se analiza esta serie de caudal con la precipitación que cae sobre el relleno sanitario, a manera de evaluar si el comportamiento de la serie obedece a la influencia de esta variable climática.

▪ **Resultados: escenario 2**

Para realizar la simulación de éste escenario, inicialmente se comparó, la serie de precipitación generada por los registros tomados en el relleno sanitario El Guacal, con la serie de precipitación de la estación Fabricato. En la Figura 58, se presenta el comportamiento de las dos series de precipitación dentro del periodo de modelación utilizado (Mayo 01 de 2006 – Julio 31 de 2008). La estación Fabricato mide la precipitación a una cota de 2422 m y la estación el Guacal a una cota de 2692 m. Dado que ambas están situadas en la zona andina, tienen una cota semejante y características topográficas semejantes, los valores son diferentes tanto en los meses como en la tendencia.

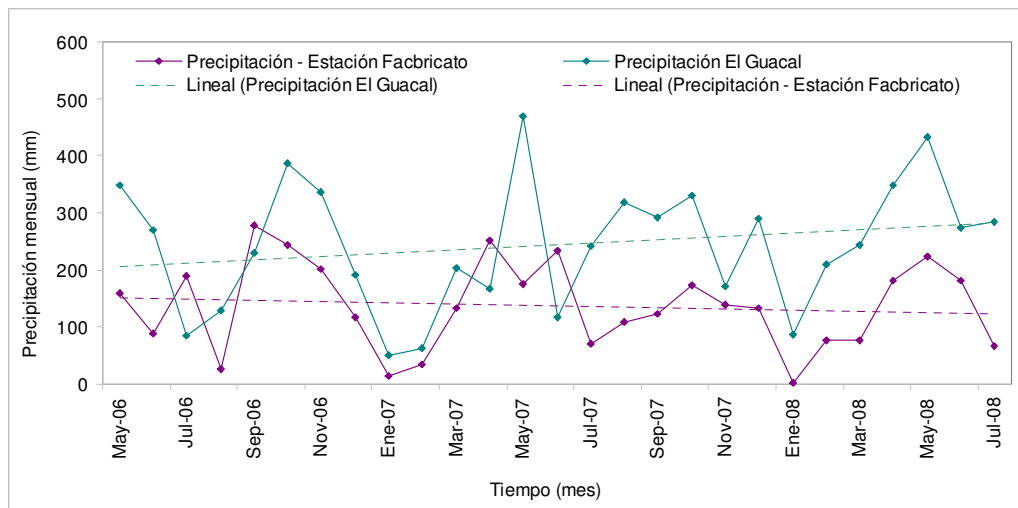


Figura 58. Comparación de series de precipitación
Comportamiento de la serie de precipitación de la estación Fabricato y estación el Guacal
Periodo analizado 01/05/2006 -31/07/2008.

Es notoria la diferencia entre la serie de precipitación del relleno sanitario El Guacal y la serie de la estación Fabricato. Las magnitudes registradas por esta última estación están muy por debajo de las presentadas por la lluvia características del sitio de localización del éste relleno sanitario, lo cual permite evaluar si para unas condiciones climáticas distintas, los caudales de lixiviados que se producen en la operación del relleno, logran disminuir notoriamente.

Después de tener la serie de precipitación del sitio donde se deseaba analizar el comportamiento de los caudales de lixiviados del relleno sanitario El Guacal, esta serie se incorporo al modelo ya calibrado y se obtuvo una nueva serie de caudal que se comparo con los caudales reales del relleno. En la Figura 59 se presentan los resultados de la modelación bajo el escenario de variables climáticas distintas. Los valores ingresados al modelo fueron los presentados en la Tabla 28 y Tabla 29

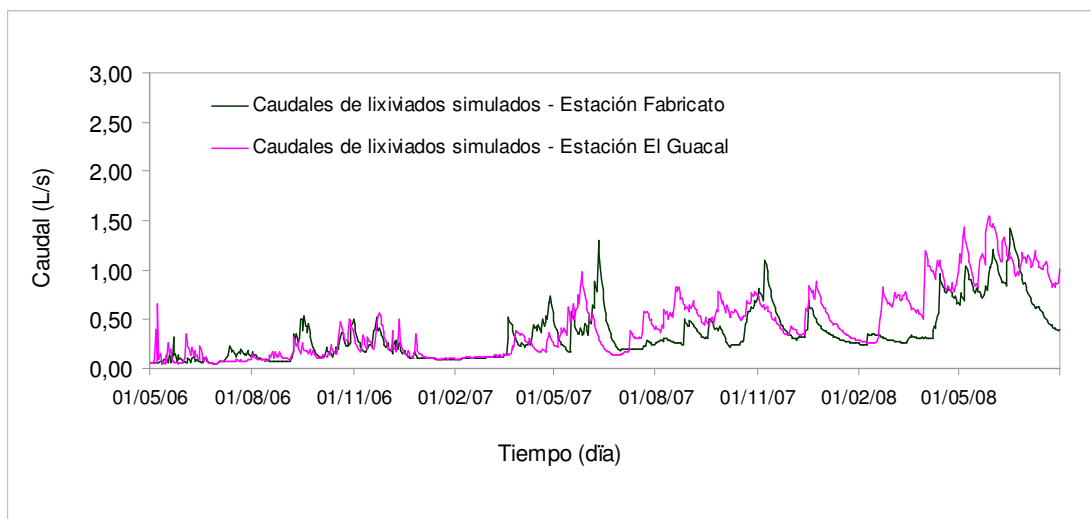


Figura 59. Caudales de lixiviados para un escenario de variables climáticas distintas Simulación del escenario 2. Periodo de simulación: 01/05/2006 -31/07/2008.

Como se observa, se presentan variaciones con las dos series de lluvia. Para los primeros meses de simulación del año 2006, se observa que la serie de caudal con información de lluvia de la estación Fabricato esta algunas veces por encima de la serie que posee la lluvia de la estación El Guacal, éstas diferencias se asocian a eventos particulares en que la precipitación registrada para la primera estación presentaba magnitudes mayores; sin embargo, en la mayoría de los meses del año 2007, los caudales de lixiviados simulados con la estación Fabricato presentan en general una diferencia promedio del 37%, valor que se considera representativo desde el punto de vista de la cantidad de lixiviados que se puede disminuir en un relleno sanitario con la características de El Guacal, pero localizado en un sitio con precipitaciones medias anuales como la registrada por la estación Fabricato (1438 mm/año).

De acuerdo con estos resultados, se puede establecer que las variables climáticas presentes en un sitio con posibilidades de ser utilizado para la operación de un relleno sanitario, son un factor determinante en la potencialidad del mismo; de esta forma, si se selecciona un sitio con precipitaciones moderadas, los caudales esperados durante la operación del relleno, van a ser de un orden mucho menor que para un relleno localizado en un sitio con predominio de precipitaciones altas.

▪ **Resultados: escenario 3**

El escenario incluyó, modelar los caudales de lixiviados con un contenido mínimo de humedad en los residuos sólidos; además de simular los balances hídricos en el relleno sanitario asumiendo el uso de coberturas sintéticas no permanentes en todo el relleno sanitario.

Para el primer caso, se utilizaron los valores presentados en la Tabla 28 y Tabla 29, pero estableciendo un contenido de humedad del 10% para los residuos sólidos. Los caudales simulados con esta condición se compararon con los caudales reales generados durante la operación del relleno sanitario; estos resultados se presentan en la Figura 60 (a) y se analizan a continuación.

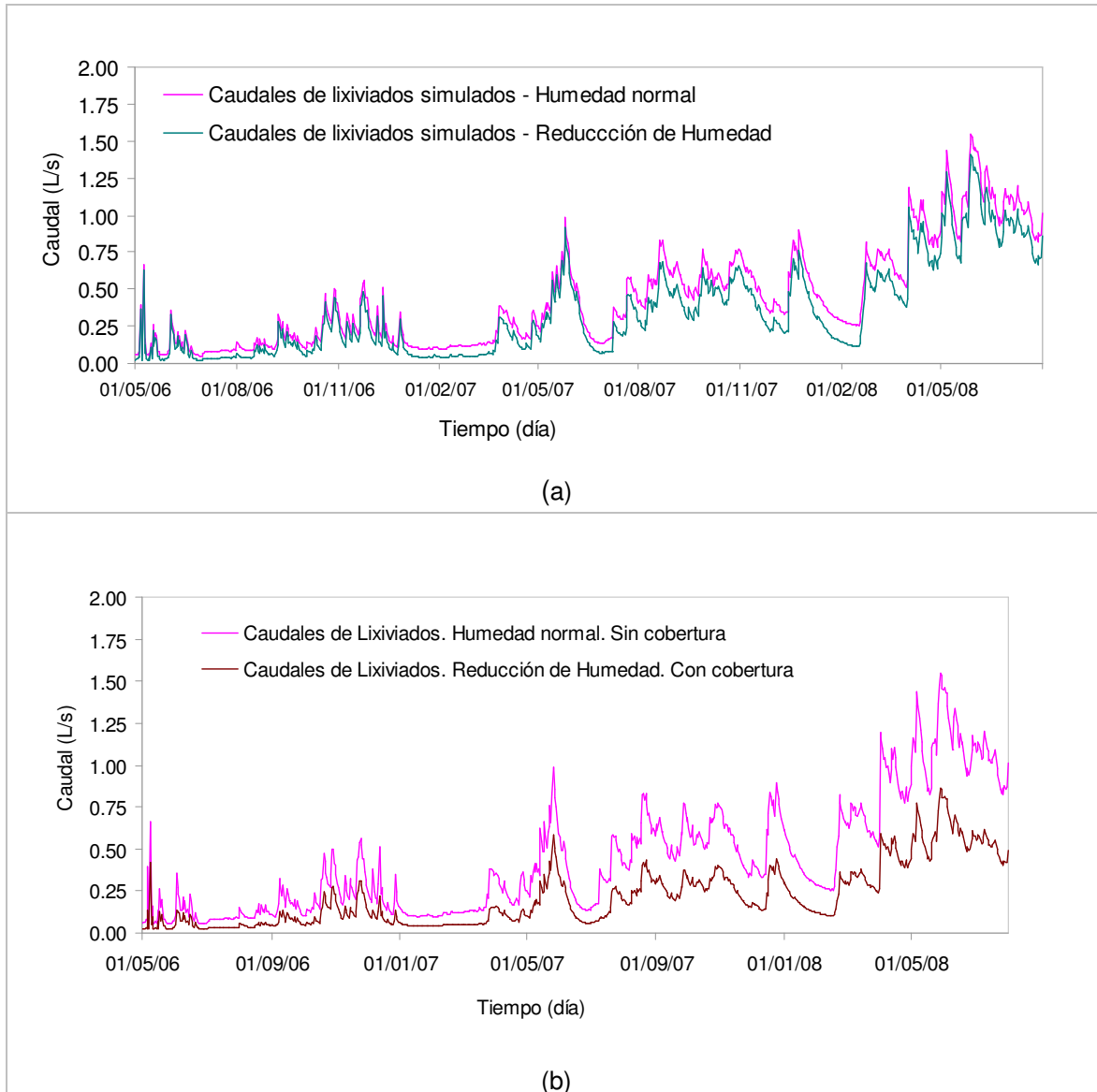


Figura 60. Caudales de lixiviados simulados para el escenario 3
(a). Simulación con un bajo contenido de humedad en los residuos sólidos. (b). Simulación con bajo contenido de humedad y uso de coberturas diarias. Periodo de simulación: 01/05/2006 - 31/07/2008.

Fue recomendable evaluar, si además de aplicar la técnica para reducir el contenido de humedad en los residuos, el uso de coberturas diarias no permanentes sobre los residuos sólidos lograba reducir notoriamente los caudales de lixiviados que se producen en el interior del relleno sanitario. Para esto, se realizó una corrida del modelo asumiendo que en la operación del relleno sanitario, se utilizaba una cobertura total diaria no permanente; es decir, el uso de cubiertas plásticas de fácil manejo, cuyo fin es aislar los

residuos de los efectos de la lluvia. Esta simulación se muestra en la Figura 60 (b). Los valores ingresados al modelo fueron los utilizados en la simulación anterior.

De acuerdo con la Figura 60 (a), los caudales simulados con contenidos mínimos de humedad en los residuos sólidos, logran mostrar una disminución en sus magnitudes con relación a los caudales de lixiviados simulados con contenidos de humedad del orden del 5%. El comportamiento de la serie simulada para éste escenario, es muy parecido al de la serie simulada inicialmente por el modelo. Se espera que los aumentos en los caudales de lixiviados para la serie simulada estén estrechamente relacionados con la precipitación.

Teniendo en cuenta los efectos de la precipitación en la producción de lixiviados, es importante considerar los cambios que muestra la serie cuando se reducen al máximo los contenidos de humedad en los residuos sólidos, razón por la cual es necesario que el mecanismo de enfardado que se realiza con eventualidad en el Centro Industrial del Sur El Guacal, sea establecido de forma permanente en la operación del relleno sanitario.

En la Figura 60 (b), se grafica el comportamiento de la serie de caudales de lixiviados para la operación del relleno sanitario con disminución en el contenido de humedad de los residuos sólidos y uso de coberturas diarias sintéticas. Los resultados de esta simulación, demuestran que éste tipo de operación disminuye considerablemente la cantidad de lixiviados producidos durante la etapa operativa, esto justifica la necesidad de optimizar el manejo del relleno sanitario mediante el uso de coberturas diarias para los residuos sólidos.

▪ **Resultados: escenario 4**

Los resultados corresponden a la modelación del balance hídrico para la producción de lixiviados, teniendo en cuenta cambios en los parámetros hidráulicos que requiere el modelo. Estos cambios fueron asociados a los efectos de los procesos físicos que ocurren en un relleno sanitario sobre las características de los residuos sólidos.

Vale recordar, que el escenario 4 se refiere a la simulación de los caudales de lixiviados asumiendo una reducción en la permeabilidad de los residuos sólidos debido a la compactación y asentamientos de estos materiales, e igualmente, cambios en la porosidad y un aumento en la densidad de los residuos sólidos.

La modelación se realizó para la etapa operativa y etapa de clausura. Los resultados son ilustrados en la Figura 61, y los valores de los parámetros hidráulicos ingresados al modelo se presentan en las Tabla 33 y Tabla 34

Teniendo en cuenta los resultados de los caudales de lixiviados cuando se mejoraban las condiciones operativas del relleno sanitario El Guacal. Se planteó una simulación para la “operación ideal” del relleno; la cual, incluyó, además de la reducción de la humedad de los residuos sólidos, y el uso de coberturas diarias no permanentes, optimizar los procesos de compactación de los residuos sólidos, mejorando de esta forma la densidad de compactación de estos materiales. En la Figura 62 se presenta el resultado de esta simulación y se compara esta serie de caudales con los resultados obtenidos en otras simulaciones relacionadas con la operación del relleno sanitario.

Tabla 33. Características para la capa de residuos sólidos

VALORES DE RESIDUOS SÓLIDOS EN EL MODELO	ETAPA OPERATIVA	ETAPA DE CLAUSURA
Densidad (Kg/m ³)	1,388.84	1,388.84
Porosidad (Vol/Vol)	0.51	0.51
Conductividad hidráulica saturada (mm/día)	432.00	432.00
Contenido de humedad	10%	10%
Velocidad real del flujo	864.00	864.00

Tabla 34. Valores ingresados inicialmente al modelo

VALORES INGRESADOS AL MODELO	ETAPA OPERATIVA	ETAPA DE CLAUSURA
Parámetros para el modelo:		
Almacenamiento de humedad para evaporación - RSU (mm)	30	-
Velocidad real del flujo en los RSU (mm/día)	864.00	864.00
Conductividad capa drenaje (mm/día) (Schroeder et al., 1994)	260,000	260,000
Condiciones iniciales (mm):		
Almacenamiento de agua para evaporación en RSU (H _{i1}) (mm)	5.0	209.99
Almacenamiento Gravitacional Z inf. capa de RSU (H _{i2}) (mm)	0.0	-
Almacenamiento capa de drenaje (H _{i3}) (mm)	0.0	0.00
Otros parámetros del modelo:		
Exponente infiltración	2.0	-
Exponente evaporación	0.7	-

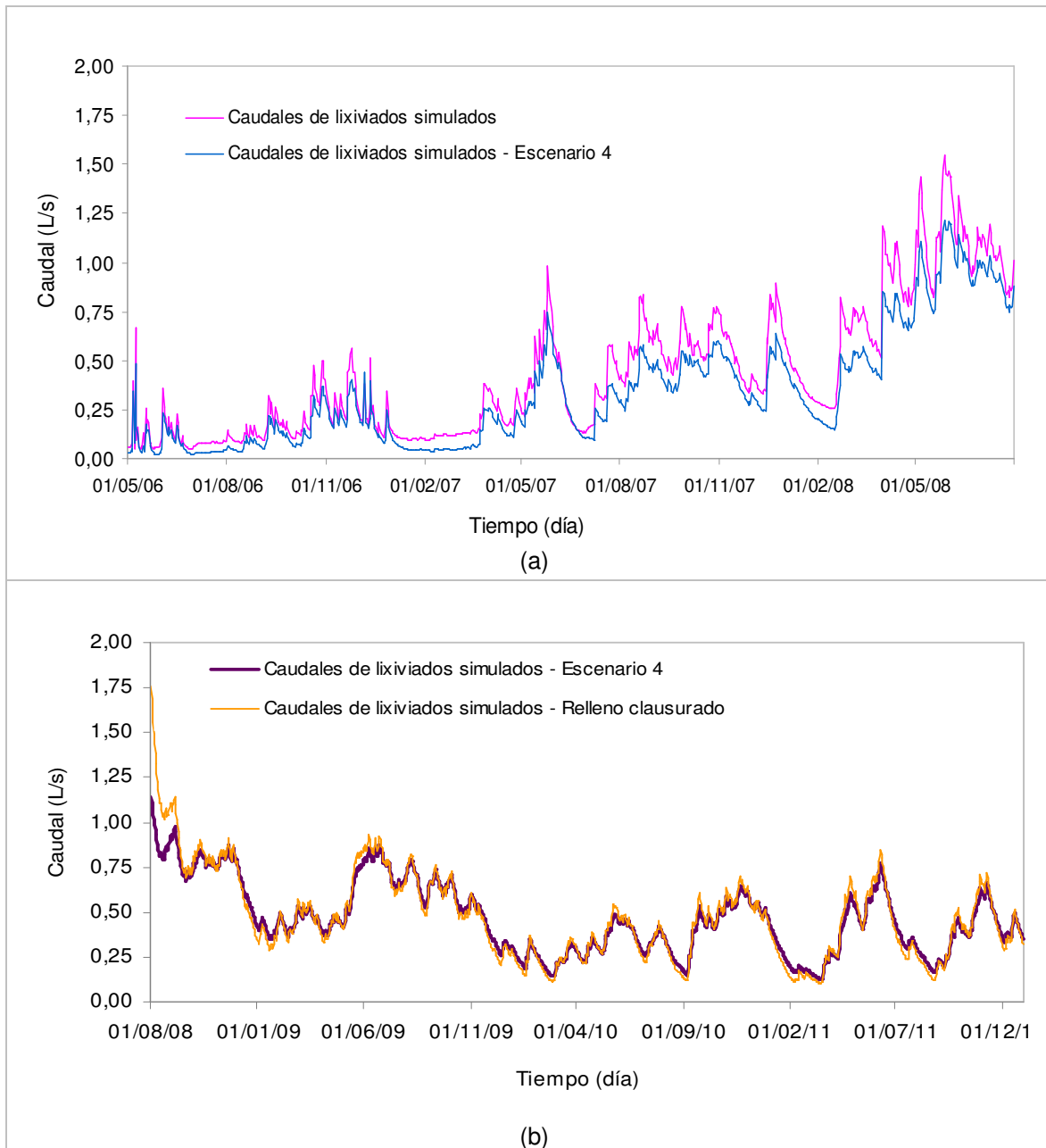


Figura 61. Caudales de lixiviados simulados para el escenario 4

(a). Simulación del escenario 4. Etapa operativa. Periodo de simulación: 01/05/2006 -31/07/2008.

(b). Simulación del escenario 4. Etapa clausura. Periodo de simulación: 01/08/2008 – 31/12/2011.

La Figura 61 (a) presenta los resultados de la modelación del escenario 4 para la etapa operativa del relleno sanitario El Guacal, asumiendo cambios en las características de los residuos sólidos debido a la compactación de los mismos. Para éste caso, es apreciable

como la variación de características físicas, como la permeabilidad, densidad de compactación y porosidad de los residuos sólidos, regulan las magnitudes de los caudales de lixiviados que se producen durante la operación de un relleno sanitario.

La diferencia promedio que se obtiene con la simulación de los caudales de lixiviados para el escenario 4 es de un 30% en magnitud. El comportamiento de la serie simulada sigue siendo el mismo.

Para el caso en que el relleno sanitario se encuentra clausurado (Figura 61 (b)), las diferencias en magnitud no son tan notorias; solo en los primeros días del periodo de modelación, se logra apreciar una diferencia existente entre, la serie de caudales simulados para condiciones normales de clausura y la serie de caudales simuladas para el escenario 4. La diferencia promedio entre estas series es del 7.5%; se puede deducir que éste valor, está dado por la siguiente condición: cuando el relleno sanitario llega a su vida útil, la generación de caudales de lixiviados es el resultado de los balances hídricos que ocurren en el interior del mismo. Estos balances están regulados por los contenidos de humedad presentes en el relleno, y no por variaciones moderadas en las características físicas de los residuos sólidos, es decir, los coeficientes de descarga de los lixiviados no responden de forma considerada a estas variaciones, caso contrario, a la generación de lixiviados cuando el relleno sanitario se encuentra en operación.

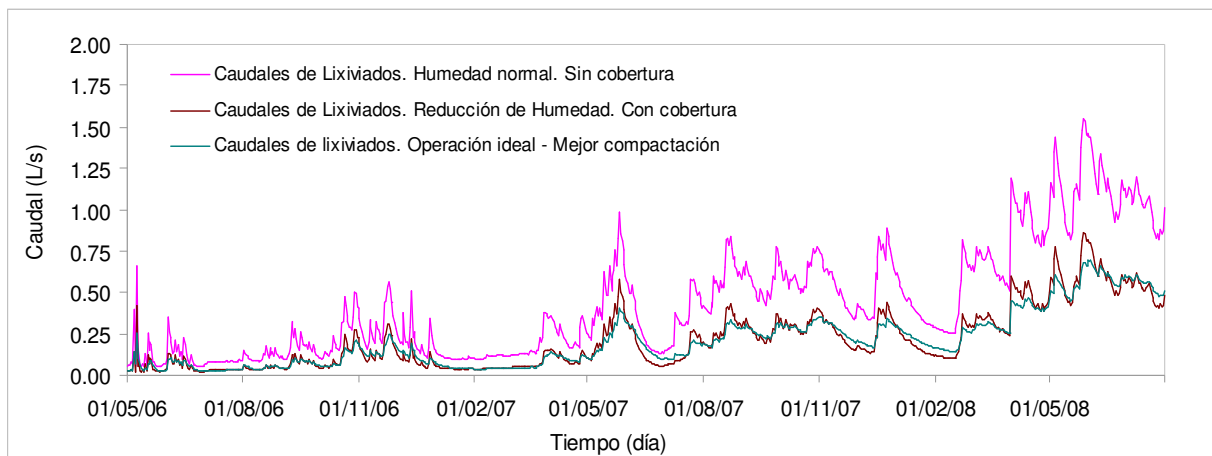


Figura 62. Caudales de lixiviados simulados para una operación ideal
Periodo de simulación: 01/05/2006 -31/07/2008.

En esta figura (Figura 62), se puede observar como los caudales de lixiviados simulados para unas condiciones ideales de operación, son completamente bajos en relación a los caudales simulados bajo condiciones reales y a los simulados con contenidos de humedad del 2%. Esto justifica que es necesario para una buena operación del relleno sanitario: mejorar los mecanismos de compactación, reducir los contenidos de humedad

en los residuos sólidos antes de ser depositados en el relleno sanitario e implementar el uso de coberturas diarias sintéticas no permanentes.

5.5.4 Análisis de la influencia de las variables climáticas en los caudales de lixiviados

En el numeral 2.2.2, del Capítulo 2 de éste trabajo, se argumentó la importancia de las variables climáticas (en especial la precipitación), en muchos de los procesos físicos y bioquímicos que ocurren en un relleno sanitario, en especial los que dan origen a la producción de lixiviados. De acuerdo con lo anterior, éste tema se incluyó como uno de los objetivos específicos, e hizo parte del análisis de los resultados obtenidos con la aplicación del modelo propuesto.

Para éste caso, se analizaron los caudales de lixiviados con relación a la variable climática que incide directamente en el comportamiento de estos caudales en el tiempo; es decir la precipitación; para esto fue necesario observar si los caudales reales y simulados respondieran a los efectos de la precipitación.

Finalmente, con el fin de evaluar las respuestas de los caudales de lixiviados ante los eventos de precipitación, se volvieron a comparar los resultados de la calibración con las series de precipitación; y se compararon las simulaciones de los escenarios con esta variable.

▪ Caudales reales y simulados vs. precipitación

A continuación, se presentan en la Figura 63, la influencia de la precipitación en la generación de los caudales de lixiviados. Esta relación se hace para los caudales reales que fueron registrados durante la operación del relleno sanitario El Guacal y para los caudales de lixiviados simulados por el modelo ya calibrado.

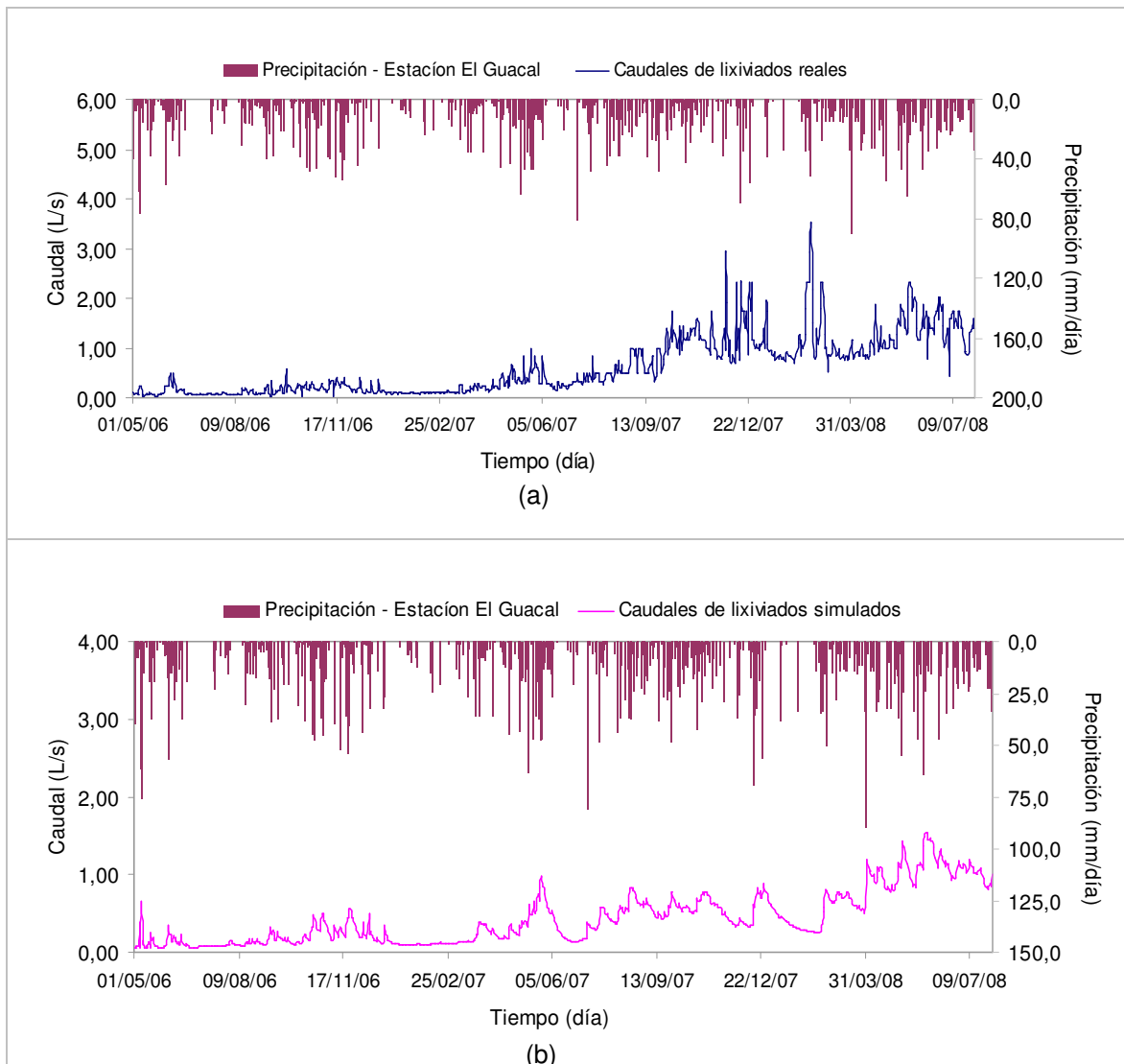


Figura 63. Relación de los caudales de lixiviados con la precipitación

(a) Caudales de lixiviados reales con la precipitación diaria registrada por la estación El Guacal. Periodo de análisis 01/05/2006 -31/07/2008. (b). Caudales de lixiviados simulados con la precipitación diaria registrada por la estación El Guacal. Periodo de análisis 01/05/2006 - 31/07/2008.

En la Figura 63 (a), se puede observar que la precipitación en el segundo semestre del año 2006, presentó eventos de gran consideración, lluvias hasta de 76 mm/día; sin embargo, los caudales reales para éste tiempo no superaban los 0.58 L/s. Esto fue debido a que a inicios del segundo semestre del año 2006, el área utilizada para la disposición de los residuos sólidos era muy pequeña; por lo cual, entre menor sea el área que está en contacto con la lluvia, menores van a ser los caudales de lixiviados que se van a producir. De otra parte, las respuestas de la serie en cuanto a valores máximos y

mínimos dentro del rango de 0.08 – 0.58 L/s (de mayo de 2006 – diciembre de 2006) se ven que están estrechamente relacionadas con los registros de precipitación.

Para el año 2007, los caudales de lixiviados reales presentan valores máximos en los meses de mayo, octubre y noviembre, siendo éstos, los meses en que se dan los mayores eventos de precipitación; sin embargo, en los meses de abril y mayo del año 2008, se registraron dos eventos de precipitación considerables, 90.21 mm/día y 64.28 mm/día de precipitación, eventos para los cuales, los caudales de lixiviados reales no responden a los efectos de estas precipitaciones. Además de esta anomalía, son varios los registros de caudales reales de lixiviados que no están en correlación con el comportamiento de la precipitación; pero, por el hecho de no contar con un buen número de mediciones de caudales y precipitación en un mismo día, es imposible validar la calidad de la información o detectar las razones por las cuales se presentan éste tipo de divergencias.

De acuerdo con lo anterior, se recomienda tener una mayor y mejor toma de datos de caudales y precipitación diarios, los cuales permitan analizar de forma más tangible las correlaciones existentes entre estas dos variables.

Para los caudales simulados (Figura 63 (b)), la serie en el segundo semestre del año 2006 y los primeros meses del año 2007, con relación a la precipitación, se comporta igual que la serie de caudales reales; nuevamente, se piensa que éste comportamiento de los caudales de lixiviados, a pesar, de que se registran eventos de precipitación bastante altos, es razonable, con relación a la magnitud de las áreas de disposición final.

A mediados y finales del año 2007, los caudales simulados aunque presentan periodos de valores picos y valores relativamente bajos, se aprecia que estos comportamientos no presentan una estrecha correlación con las magnitudes de la precipitación. Analizando éste tipo de eventos, se podría pensar entonces, que las capacidades de almacenamiento de humedad que presenta el relleno sanitario durante su operación, logra regular las cantidades de agua provenientes de la precipitación; y por consiguiente las respuestas de los caudales de lixiviados no son inmediatas a los eventos de precipitación, y sólo hasta cuando se superan de forma considerada esas capacidades de almacenamiento, se pueden presentar los valores más altos en caudales de lixiviados.

▪ **Caudales simulados vs. precipitación - Escenario 2**

Para el análisis, se tomaron los resultados del escenario 2, el cual, se centró en evaluar los caudales de lixiviados producidos en el relleno sanitario El Guacal bajo unas condiciones climáticas distintas. A continuación se presenta en la Figura 64, la comparación entre los caudales simulados y la precipitación registrada por la estación

Fabricato (localizada en un lugar con precipitación más baja que la del sitio de localización del relleno sanitario).

▪ **Caudales simulados vs. precipitación – Relleno sanitario clausurado**

Para el análisis, se graficaron los caudales de lixiviados que fueron estimados para el escenario de clausura del relleno sanitario Guacal, y se relacionaron con la serie de precipitación utilizada para modelar éste escenario. Vale aclarar nuevamente que la estación pluviométrica de la cual se tomaron tres años de registros climáticos, fue la estación Astilleros, por ser la más cercana al relleno sanitario El Guacal.

Además de relacionar la precipitación, el análisis incluyó, graficar los caudales de escorrentía que se producirá durante la clausura del relleno sanitario.

En la Figura 65, se presenta la serie de caudales de lixiviados y de escorrentía para la clausura del relleno sanitario en relación con la precipitación.

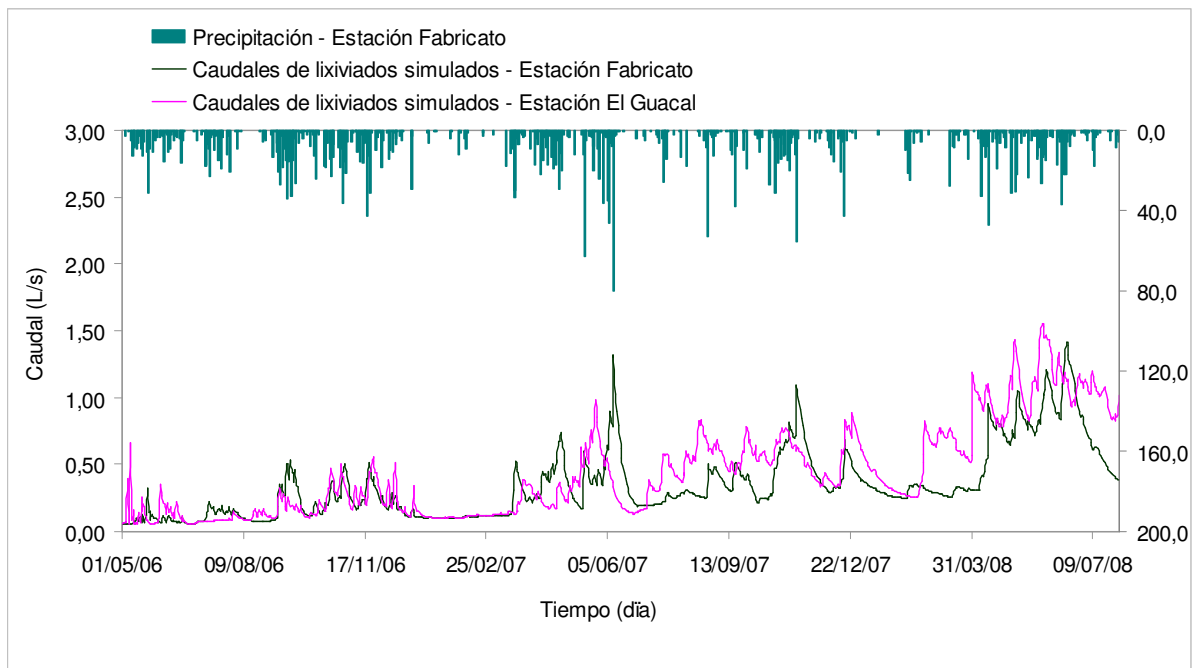


Figura 64. Relación de los caudales de lixiviados simulados con la precipitación. Los caudales de lixiviados corresponden a los simulados inicialmente por el modelo y a los obtenidos con la modelación del escenario 2. Periodo de simulación: 01/05/2006 -31/07/2008.

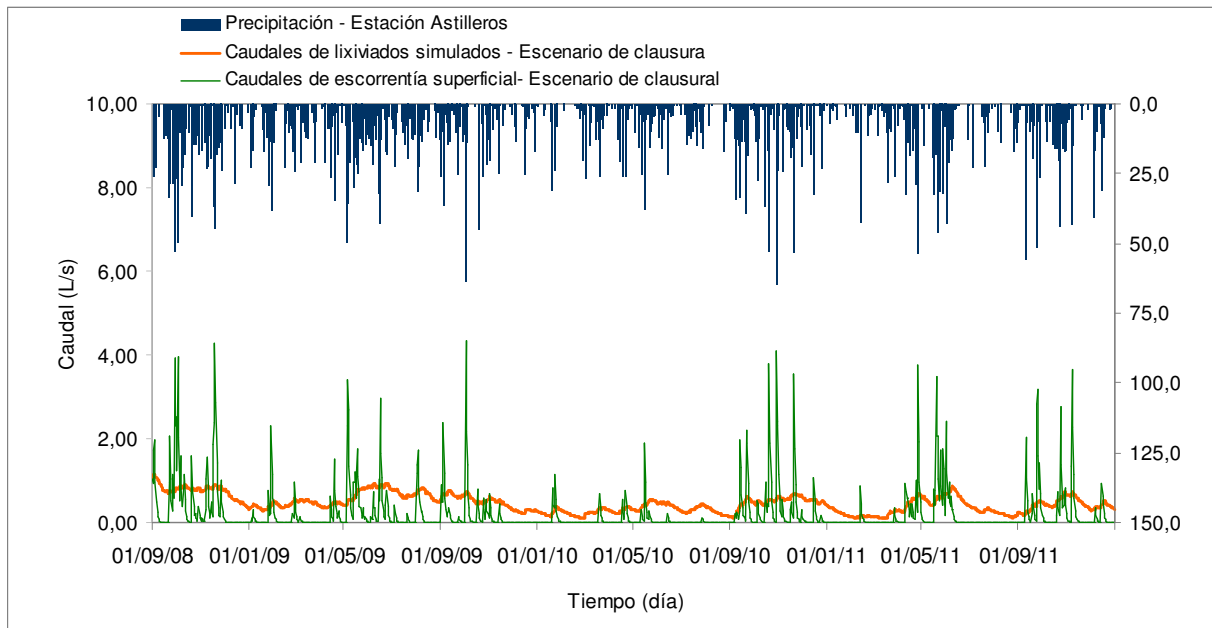


Figura 65. Relación de caudales de lixiviados y de escorrentía simulados vs. precipitación. Los caudales de lixiviados y escorrentía superficial, corresponden a los simulados i por el modelo y para el escenario 1. Periodo de simulación: 01/09/2008 -31/07/2008

Para los resultados de la Figura 64, los caudales simulados con la serie de precipitación de la estación Fabricato, presentan una correlación apreciable con el comportamiento de la serie de lluvia; cuando se dan los eventos de mayores precipitaciones, meses de abril, mayo, junio, octubre y noviembre; los caudales de lixiviados registran sus mayores valores de forma relativa y coherente con el estado de avance operativo del relleno sanitario.

Analizando las dos series de caudales de lixiviados, se puede observar, que para el segundo semestre del año 2006 y los dos primeros meses del año 2008, las dos series tienen una apreciable similitud a pesar de estar modeladas con registros de precipitación diferentes, de acuerdo con lo anterior, se comprobó que a pesar de que las estaciones utilizadas para esta modelación distan mucho en distancia (localización), para los meses correspondientes a éste periodo, ambas estaciones registraron eventos de precipitación muy parecidos.

De acuerdo con la Figura 65, es totalmente evidente que los eventos de precipitación después de la clausura del relleno sanitario, no ejercen ningún tipo de efecto perceptible; esto corrobora, que el diseño asumido para la cobertura final del vaso norte del relleno sanitario El Guacal, es muy eficiente con relación a la producción de lixiviados que se pueden presentar después de la vida útil del relleno.

Los caudales de escorrentía por el contrario, son una respuesta inmediata y coherente a los eventos de precipitación asumidos para el escenario de clausura. El comportamiento de estos caudales, esta asociado al tipo de cobertura propuesta para el relleno sanitario; una cubierta con una permeabilidad muy baja, la cual evita al máximo las infiltraciones de agua lluvia al interior del relleno sanitario y permite que gran parte de la lluvia que cae sobre el relleno se convierta en escorrentía superficial directa.

6. CONCLUSIONES

Los esfuerzos principales de este trabajo, se centraron en estimar la generación de caudales de lixiviados para prevenir la contaminación del recurso agua y suelo, durante las diferentes etapas evolutivas de un relleno sanitario; por lo cual se profundizó en el desarrollo de una herramienta de fácil uso para ser aplicada al relleno sanitario El Guacal u otro relleno sanitario.

Son numerosos los trabajos que se han realizado en el campo de la modelación hidrológica para rellenos sanitarios; algunos con aplicaciones limitadas y otros con un gran número de herramientas de modelación, las cuales permiten además de estimar caudales de lixiviados, probar el comportamiento de estos caudales bajo diferentes opciones de diseño ó de construcción del relleno.

Además de los modelos de carácter hidrológico, en la actualidad existen varios modelos cuyos alcances van mas allá de la estimación de caudales de lixiviados, tales como modelos de biodegradación de residuos sólidos en un relleno sanitario. Con relación a este tipo de herramienta, se puede establecer que estos modelos, son de gran utilidad para estimar muchos de los efectos ambientales de la puesta en marcha de los rellenos sanitarios, como la generación de biogases y la producción de sustancias contaminantes presentes en los lixiviados.

Durante la revisión del estado del arte sobre el tema de modelación en rellenos sanitarios, se logró encontrar que modelos como el HELP y MODUELO II, son una buena alternativa a la hora de evaluar desde un punto de vista hidrológico un relleno sanitario clausurado ó analizar la generación de contaminantes en el mismo, respectivamente. Esta apreciación se fundamenta en que el modelo HELP ha sido de gran utilidad a nivel de países como Estados Unidos, lugar para el cual fue desarrollado, sin limitar su uso a otras localidades; y que MODUELO II ha sido el resultado de muchos trabajos de investigación y profundización sobre el proceso de biodegradación de los residuos sólidos en un relleno sanitario y los efectos asociados al mismo.

Mediante un análisis detallado del funcionamiento de estos modelos, se lograron identificar las limitaciones a las cuales se debe enfrentar el usuario con relación a: la considerable información requerida por los modelos y la disponibilidad de la misma; el amplio número de corridas que se deben realizar para lograr una posible calibración; la

poca precisión de los modelos, debido a las condiciones y lugares para los cuales fueron desarrollados; las limitaciones de los modelos para ser aplicados para un relleno sanitario abierto; los valores para las variables propias de los residuos sólidos, los cuales, para una buena obtención de resultados, deben ser estimados a nivel de laboratorio, actividad que puede demandar un tiempo considerable. Además de las anteriores anotaciones, se pudo encontrar que la mayoría de estos modelos han sido desarrollados para rellenos sanitarios con una conformación muy típica a las establecidas en las bibliografías, situación que es completamente distinta a nivel de nuestro país o región, donde la gran mayoría de los rellenos sanitarios no sigue los estándares técnicos para su construcción y operación.

Se pudo encontrar que a nivel de Colombia son completamente escasos los trabajos que se han realizado con relación a la aplicación y calibración de estos modelos; este hecho, hizo más difícil el uso de modelos como el HELP, puesto que la única aplicación en nuestro país reportada de este modelo fue para un relleno sanitario ya clausurado. A nivel mundial, por el contrario, han sido muy diversos los trabajos de aplicación de este modelo; sin embargo, estos documentos mostraron que el modelo fue aplicado para evaluar diseños de rellenos sanitarios clausurados y el proceso para una buena calibración requirió de ensayos de campo y medidas en laboratorio para las diferentes capas que conforman un relleno sanitario. Esto reitera la importancia de progresar mucho más en la investigación empírica del modelo HELP, mediante su aplicación y calibración para rellenos sanitarios abiertos y clausurados, localizados en distintas zonas de nuestro país.

Con la aplicación del modelo HELP, se logró encontrar que este programa fue fundamentalmente diseñado para la simulación de rellenos sanitarios clausurados, suponiendo la existencia de coberturas vegetales; razón por la cual, para el modelo, la simulación de la producción de lixiviados está totalmente influenciada por la cantidad de agua que se infiltra en el relleno, luego de presentarse los procesos de evapotranspiración y escorrentía superficial. Bajo estas condiciones, se encontró que los índices o parámetros asociados a las coberturas vegetales son muy influyentes en la calibración del modelo, y que, para el caso de rellenos sanitarios abiertos, en los cuales no existe ningún tipo de vegetación, la calibración se convierte en un trabajo extenso y arduo, que, para efectos de precisión, requiere toma de datos de campo.

El trabajo realizado con este modelo presentó las mayores restricciones a la hora de trabajar con las áreas del relleno sanitario y las alturas de las capas de residuos sólidos, puesto que las áreas y alturas en el relleno sanitario El Guacal eran crecientes en el tiempo, y el modelo considera siempre un área fija expuesta a los efectos climatológicos durante todo el período de simulación. Por esta razón, se requirió tocó establecer una relación entre el área superficial y la altura de la capa, donde fue visto que, si se adoptaba

el área final del relleno para un tiempo determinado, la altura media correspondiente al volumen de lleno del relleno para esa superficie era menor que la existente, lo cual modificaba las capacidades de almacenamiento de humedad reales para la capa de residuos sólidos. En base a lo anterior, se concluyó que el modelo no puede reproducir la secuencia del crecimiento del relleno sanitario, caso para el cual, es necesario partir de una condición fija que represente el tamaño medio del relleno durante el período estudiado; esto logra reiterar más las dificultades de este modelo para ser aplicado a rellenos sanitarios con áreas y alturas dinámicas.

Muchos de los planteamientos del modelo HELP están dados para suelos con características homogéneas, suponiendo un flujo vertical no saturado, cuando en la realidad lo que se está modelando, principalmente, son capas de residuos sólidos con una constitución no uniforme, donde el flujo busca caminos preferenciales. Esta simplificación de la realidad, al momento de modelar el relleno sanitario hace que se sobreestimen las capacidades de almacenamiento y, por consiguiente, que se retenga el lixiviado; de otra parte, hace que las salidas de este líquido sean muy uniformes, crecientes y puntuales en el tiempo, lo cual suaviza la serie de caudal, cuando en realidad tiene picos.

Respecto a este modelo, finalmente se pudo establecer que las predicciones del HELP para esta aplicación no fueron exactas, y aunque se piensa que se requerían más detalles de las características del relleno sanitario, muchos de los trabajos de aplicación de este modelo argumentan que, aunque simula con buena precisión las salidas de agua por evaporación, la escorrentía superficial generalmente está por debajo de las reales y los caudales de lixiviados siempre son sobreestimados.

Con relación al modelo que se propuso en este trabajo, se pudo establecer que este modelo por su programación, logra estimar una capacidad de almacenamiento y una superficie de contacto ó de infiltración de la lluvia, real, ya que está en función del crecimiento en área y altura de las capas de residuos sólidos dentro del relleno sanitario. Además, presenta una buena confiabilidad para ser usado en la estimación de caudales de lixiviados durante la etapa operativa de un relleno sanitario. Vale aclarar, que para la fase de clausura no se logró precisar la confiabilidad del modelo, debido a que el relleno aún se encuentra abierto. Por ello, se deja abierta la posibilidad de aplicar a la realidad este modelo en todas las fases evolutivas de un relleno sanitario, con el fin de mejorar las bondades del mismo.

La mayoría de los modelos hidrológicos para rellenos sanitarios considerados en este trabajo realiza la estimación de caudales de lixiviados mediante balances en cada capa presente en el vertedero clausurado ó con una mayor dificultad, en rellenos sanitarios abiertos; sin embargo, la fase constructiva del relleno sanitario, que es durante la cual se adecúa la cavidad y fondo del relleno, no se tiene en cuenta por parte de estos modelos,

para estimar el flujo que entra y sale del relleno en dicha fase (agua proveniente de la precipitación, escurrimientos de los taludes o laderas del relleno).

Es importante considerar que todas las fases del relleno son importantes para realizar la estimación de los volúmenes de lixiviados que se generan en cada una de la etapas, ya que, técnicamente, los sistemas de tratamiento de estos líquidos deben estar adecuados para manejar, en cuanto a cantidad y composición, los aportes de lixiviados que se producen, desde y durante la construcción, operación y clausura del relleno.

Los sistemas de control para los impactos ambientales de un relleno sanitario, han sido tradicionalmente diseñados mediante criterios empíricos ó con la ayuda de modelos simplificados basados en balances hidrológicos a gran escala, dejando de lado el estudio del efecto de los sistemas instalados en el relleno en sus distintas etapas de actividad, o la optimización del diseño, en función de los cambios a lo largo del tiempo.

Es de mucha utilidad, para la mayoría de los operadores de los rellenos sanitarios, contar con una herramienta de fácil operación y aplicación para estimar, de acuerdo a la evolución del mismo, los caudales de lixiviados generados, su variación en el tiempo y la influencia de las variables climáticas y características físicas de los residuos en los rellenos. Y que además, analice las condiciones de caudales extremos, medios y bajos para los lixiviados, a fin de realizar de forma adecuada los diseños de las estructuras hidráulicas necesarias para la recolección, transporte y almacenamiento de los lixiviados. En base a lo anterior, el modelo propuesto en este trabajo, aunque requiere de un mejor proceso de calibración, muestra ser una herramienta con las características anteriormente mencionadas.

Con la aplicación de los modelos de balance hídrico para rellenos sanitarios, se pudo comprobar, mediante las simulaciones de diferentes escenarios, que la producción de lixiviados está totalmente influenciada por las condiciones de operación del relleno, los factores climatológicos de la zona de localización y las medidas de control para la generación de los mismos.

7. RECOMENDACIONES

En primer lugar, es necesario para crear un mejor modelo de balance hídrico en rellenos sanitario, contar con la suficiente información necesaria para simular las condiciones reales del entorno y características del relleno. Esto se logra con una mejor y mayor toma de datos relacionados con: características de los residuos, meteorología, configuración del relleno sanitario, técnicas de construcción y operación, manejo de la escorrentía, y entradas de aguas exteriores.

Específicamente para el relleno sanitario en estudio, se recomienda:

- Hacer un mejor uso de la estación meteorológica instalada en el relleno sanitario, ya que la misma a pesar de ser una gran herramienta para la toma de datos de clima y de generar un mayor número de información; no presenta un buen manejo técnico, puesto que por falta de personal permanente con una capacitación en el manejo de este tipo de aparatos, ha sido mucha la información que no ha sido tomada con en este instrumento.
- Aforar los caudales de lixiviados con un mayor frecuencia diaria y diseñar una estructura hidráulica de aforo calibrada, para mayor precisión de los datos.
- Optimizar las técnicas de impermeabilización del relleno sanitario durante su adecuación, con el fin de reducir el riesgo de contaminación al cual se encuentran expuestos el suelo y los cuerpos de agua, cuando existen áreas adyacentes a las zonas de disposición de residuos sólidos sin ningún tipo de protección.
- Planear e implementar un mecanismo más ordenado para la disposición diaria de los residuos sólidos, el cual se desarrolle durante toda la operación del relleno sanitario.
- Usar las coberturas diarias sintéticas, en toda el área del relleno sanitario, salvo las zonas en que se esté realizando la disposición de los residuos sólidos. Esta técnica se recomienda en base a los resultados obtenidos simulando el relleno sanitario bajo estas condiciones.
- Implementar de forma permanente el uso de la técnica de enfardado, ya que la misma logra reducir considerablemente la generación de lixiviados, además de proporcionar una mayor estabilidad geotécnica al relleno y reducir las magnitudes de asentamientos de los residuos sólidos en un futuro.

- Utilizar el modelo planteado en este trabajo, para la estimación de caudales de lixiviados en los diseños de los vasos que operaran a futuro en este relleno sanitario.
- Evaluar el funcionamiento posterior del sistema de tratamiento de lixiviados existente, estimando la generación de caudales de estos líquidos haciendo uso del modelo propuesto.
- Permitir el acceso a la información de caudales de lixiviados y de precipitación, más adelante, para la calibración del modelo durante la etapa de clausura del vaso norte de este relleno sanitario.
- Desde otro enfoque del tema de rellenos sanitarios, la mayoría de las políticas de gestión de residuos sólidos ha dado mayor prioridad y exigencia a las fases de generación y aprovechamiento de los residuos sólidos, dejando en segundo lugar el problema de los rellenos sanitarios con relación a su localización, construcción y operación, en estrecha relación con la generación de caudales de lixiviados. Para lo cual, se considera que las entidades ambientales deben exigir el uso de modelos para evaluar la localización del relleno sanitario, su construcción, operación y clausura, bajo los efectos de la generación de estos líquidos como agentes contaminantes.
- Por otro lado, en regiones donde no existe tanta presión sobre la disponibilidad del suelo, los rellenos sanitarios son y seguirán siendo la única alternativa para la disposición final de los residuos sólidos; entonces, bajo estas circunstancias, es necesario priorizar en el buen manejo de estos sitios; sobre todo en las técnicas constructivas y operativas empleadas para controlar los efectos adversos de esta alternativa, además de los controles y seguimientos del relleno sanitario después de su clausura. De esta forma, es importante fomentar los métodos que permitan mejorar la gestión medioambiental de los rellenos desde su exploración hasta un período más allá de su terminación.

8. BIBLIOGRAFÍA

ADANI, F., CALCATERRA, E., Y MALAGUTTI, L., (2001). "Preparation of a test for estimating biogas production from pretreated urban waste", Actas del congreso "Sardinia 2001, Eight International Waste Management and Landfill Symposium". 1 – 5 de octubre de 2001. CISA, Centro de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Cagliari, Italia. pp. 571-578.

AGUA Y RESIDUOS – ARES, (2006 – 2008). "Informes técnicos de la fase de operación del vaso norte del relleno sanitario ubicado en el del Centro Industrial del Sur - CIS El Guacal".

AGUDELO G. R., (1998). "Tratamiento de lixiviados producidos en el relleno sanitario Curva de Rodas de la ciudad de Medellín utilizando reactores UASB y filtros anaerobios FAFA". En: Memorias IV Seminario Taller Latinoamericano sobre Tratamientos de Aguas Residuales. Bucaramanga, Colombia. pp. 580 -590.

AL-JOBEH, Z.Y., (1994). "Finite element model of overburden induced flow in unsaturated hydraulic barriers", Dissertation, The University of Toledo.

ALLENDE, T., (2001). "Evaluación geológico-ambiental en la determinación de la factibilidad de un área para relleno sanitario", Revista del Instituto de Investigación de FGMMCG, Vol. 4, No.7, pp. 7 – 8.

ANDERSON, E., (1973). "National weather service river forecast system—snow accumulation and ablation model," Hydrologic Research Laboratory, National Oceanic and Atmospheric Administration, Silver Spring, MD.

ARNOLD, J. G., WILLIAMS, J. R., NICKS, A. D., Y SAMMONS, N. B., (1989). "SWRRB, a simulator for water resources in rural basins," Agricultural Research Service, USDA, Texas A&M University Press, College Station, TX.

BAGCHI, A., Y GANGULI, A., (1990). "Leachate apportionment in active landfills". Actas del congreso "13th Madison Waste Conference", septiembre de 1990, University of Wisconsin-Madison, Estados Unidos. pp.14 – 27.

BARINA, G., BUDKA, A., GISBERT, T., GUYONNET, D., Y CIRINO, N., (2001). "Identification and assessment of leachate recirculation effects at real-scale landfill", Actas del congreso "Sardinia 2001, Eighth International Waste Management and Landfill

Symposium”. 1 – 5 de octubre de 2001, CISA, Centro de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Cagliari, Italia. pp. 95 – 104.

BENGTSSON, L., BENDZ, D., HOGLAND, W., ROSQVIST, H., Y AKESSON, M., (1994). “Water balance for landfills of different age”, Journal of Hydrology, 158, pp. 203-217.

BOU-ZEID, E., Y EL-FADEL, M., (2004). “Parametric sensitivity analysis of leachate transportsimulations at landfills”. Waste Management, 24, pp. 681-689.

BOZKURT, S., MORENO, L., Y NERETSSON, I., (1999). “Long-term fate of organics in waste deposits and its effect on metal release”, Sci. Total Environ. 228, pp.135–152.

BROWN, K. W., THOMAS, J. C., LYTTON, R. L., JAYAWIKRAMA, P., Y BAHRT, S. C., (1987). "Quantification of leak rates through holes in landfill liners", Technical Resource Document EPA/600/S2-87-062, US Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH.

BUTLER, A. P., ZACHAROF, A. I., Y SOLLARS, J., (1999). “A stochastic flow and transport model for landfill leachate production”, Actas del congreso “Sardinia 1999, Seventh International Waste Management and Landfill Symposium”. 4 – 8 octubre de 1999, CISA, Centro de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Cagliari, Italia. pp. 25 – 32.

CAMPBELL, G. S., (1974). "A simple method for determining unsaturated hydraulic conductivity from moisture retention data", Soil Science, 117 (6), pp 311-314.

CAMPBELL, J. V., (1983). “Understanding water balance in landfill sites”, Wastes management, Noviembre 1983, pp. 594 – 605.

CHENEY, A.C., (1993). “Sttlement of landfill”, Hawell Landfill Completion Symposium, Cockcoft Hall, HMSO, Londres Inglaterra, Mayo de 1983.

CHYNOWETH, D. P., GHOSH, S., Y PACKER, M. L., (1979). “Anaerobic processes”. Journal WPCF, 51(6), pp. 1200-1215.

COATES, A.L. (1987) “Hydrologic Performance of Multilayer Landfill Covers: A Field Verification and Modeling Assessment of HELP and SOILINER”, M.S. Thesis, University of Kentucky.

COSANDEY, C., Y ROBINSON, M., (2000). “Hydrologie continentale”, Armand Colin, Paris.

COSSU, R., LARAIA, R., ADANI, F., Y RAGA, R., (2001). “Test methods for the characterization of the biological stability of pretreated municipal solid waste in compliance with EU Directive”, Actas del congreso “Sardinia 2001, Eight International Waste

Management and Landfill Symposium”. 1 – 5 de octubre de 2001, CISA, Centro de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Cagliari, Italia. pp. 545 – 554.

CROOKS, V. E., Y QUIGLEY, R. M., (1984). “Saline leachate migration through clay: A comparative laboratory and field investigation”, Canadian geotechnical journal, Vol. 21, pp. 349 – 361.

CORTÉS, L. H., (2004), “Estudio de impacto ambiental del proyecto Centro Industrial del Sur CIS”.

CRUZ, R., ORTA-DE VELÁSQUEZ M. A., SÁNCHEZ, J., Y ROJAS-VALENCIA M. A., (1997). “Estimación de la generación de lixiviados en rellenos sanitarios mediante un balance de agua en serie”, Universidad Autónoma de México, 10 p.

DANIEL, D.E., SHACKELFORD, C. D., LIAO, W.D. Y LILJESTRAND, H. M., (1991). “Rate of flow of leachate through clay soil liners”, EPA - U.S. Environmental Protection Agency, Risk Reduction Engineering Laboratory, pp. 2 – 91.

DARCY, H., (1856). “Les fontaines publique de la ville de Dijon”. Dalmont, Paris. Citado por HILLEL, D., (1982). Introduction to soil physics. Academic Press, New York.

DEMETRACOPOULOS, A., Y KORFIATIS, G., (1984). “Design considerations for landfill bottom collection systems”, Civil engineering for practicing and design engineers, 3 (10), pp. 967 – 984.

DEMETRACOPOULOS, A. C., SEHAYEC, L., Y ERDOGAN, H., (1986). “Modeling leachate production from municipal landfills”, Journal of Environmental Engineering, 112(5), pp. 849-866.

DEMETRACOPOULOS, A. C., (1988). “Overview of landfill bottom liner hydraulics”, Water Resources Bulletin, 24 (1), pp. 49 – 56.

DEMIREKLER, E., ROWE, R. K., Y UNLU, K., (1999). “Modeling leachate production from municipal solid waste landfills”, Actas del congreso “Sardinia 99, Seventh International Waste Management and Landfill Symposium”. 4 – 8 de octubre de 1999, CISA, Centro de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Cagliari, Italia. pp. 17 – 24.

DEVAURS, M., Y SPRINGER, E., (1988). “Representing soil moisture in experimental trench cover designs for waste burial with the CREAMS model”, Journal of the Hazardous Waste and Hazardous Materials, vol 5. pp. 295 -311.

DIRECTIVA DEL CONSEJO DE LA UNIÓN EUROPEA., (2001). “Real Decreto 1481/2001 del 27 de diciembre - Por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero”.

EL-FADEL, M., FINDIKAKIS, A. N., Y LECKIE, J. O., (1997). “Modeling leachate generation and transport in solid waste landfills”. *Environmental Technology*, 18, pp. 669-686.

EL-FADEL, M., FINDIKAKIS, A. N., Y LECKIE, J. O., (1997a). “Modeling leachate generation and transport in solid waste landfills”, *Environmental Technology*, 18, pp. 669-686.

EL-FADEL, M., FINDIKAKIS, A. N., Y LECKIE, J. O., (1996b). “Transport of gas and heat in sanitary landfills I. Model Formulation”, *Waste Management and Research*, 14(6), pp. 483 - 504.

EMPRESAS VARIAS DE MEDELLIN EEVVM., (2006). “Informe mensual de caracterización de los lixiviados generados en el relleno sanitario del Parque Ambiental La Pradera”. Informe de Diciembre de 2006.

ENVIROMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA., (1984). “HELP (Hydrology Evaluation Leachate Performance)”.

FENN D.G., HANLEY K. I., Y DEGEARE T.V., (1975). “Use of the Water Balance Method for Predicting Leachate Generation From Solid Waste Disposal Sites”, U.S. Environmental Protection Agency, EPA 530/SW-168, pp. 1-10.

FINDIKAKIS, A. N., Y LECKIE, J. O., (1979). “Numerical simulation of gas flow in Sanitary Landfills”, *Journal of the environmental engineering division*, 105, pp. 927-945.

FLEENOR, B., (1993). "Examination of vertical water movement HELP Beta Version 3 versus RMA42," M.S. thesis, University of California, Davis, CA.

FORCHHEIMER, P., (1930). “Hydraulik. 3rd ed., Teuber, Leipzig and Berlin. Citado por HILLEL, D., (1982). *Introduction to soil physics*. Academic Press, New York.

GILLHAM, R. W., ROBIN, M. J., Y DYTNYSHYN, D. J., (1984). “Diffusion of non-reactive and reactive solutes through fine grained barrier materials”, *Canadian geotechnical journal*, Vol. 21, pp. 541 – 550.

GIRALDO, S., (2005). “Aplicación del modelo HELP para la predicción de la producción de lixiviados en el relleno sanitario “La Esmeralda”, Ciudad de Manizales - Fase III”.

GIROUD, J. P., Y BONAPARTE, R., (1989). "Leakage through liners constructed with geomembrane liners I, II", *Geotextiles and geomembranes* 8(1), pp.27-67, 8(2), pp.71-111, 8(4), pp.337-340.

GONZÁLEZ, A. J., Y ESPINOSA, A., (2001). "La acumulación de basuras como material geotécnico", Universidad de los Andes, *Revista de Ingeniería* N°14, pp. 56-70.

GUYONNET, D., DIDIER-GUELORGET, B., PROVOST, G. Y FEUILLET, C., (1998). "Accounting for water storage effects in landfill leachate modelling", *Waste Management and Research*, 16(3), pp. 285-295.

HAARSTRICK, A., HEMPEL, D. C., OSTERMANN, L., AHRENS, H., Y DINKLER, D., (2001). "Modelling of the biodegradation of organic matter in municipal landfills", *Waste Management and Research*, 19, pp. 320-331.

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"*. 1 – 5 de octubre de 2001, CISA, Centro de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Cagliari, Italia. pp. 129 – 138.

HARGREAVES, G. H., Y SAMANI, Z. A., (1982). "Estimating potential evapotranspiration". *Journal of Irrigation and drainage Engineering*. ASCE. 108 (3). pp. 225 – 230.

HARRIES, C. R., CROSS, C. J. Y SMITH, R., (2001a). "Development of a biochemical methane potential (BMP) test and application to testing of municipal solid waste samples", *Actas del congreso "Sardinia 2001, Eight International Waste Management and Landfill Symposium"*. 1 – 5 de octubre de 2001, CISA, Centro de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Cagliari, Italia. Vol. I, pp. 579 – 588.

HARRIES, C. R., CROSS, C. J., Y SMITH, R., (2001b). "Application of Biochemical Methane Potential (BMP) testing to the study of MSW decomposition in a municipal waste lysimeter", *Actas del congreso "Sardinia 2001, Eight International Waste Management and Landfill Symposium"*. 1 – 5 de octubre de 2001, CISA, Centro de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Cagliari, Italia. Vol. I, pp. 589 – 598.

HEERENKLAGE, J., Y STEGMANN, R., (2001). "Comparison of test systems for the determination of the gas potential from waste", *Actas del congreso "Sardinia 2001, Eight International Waste Management and Landfill Symposium"*. 1 – 5 de octubre de 2001, CISA, Centro de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Cagliari, Italia. Vol. I, pp. 563 – 570.

HILLEL, D., (1982). *Introduction to soil physics*. Academic Press, New York.

HOLMES, R., (1980). "The water balance method of estimating leachate production from landfill sites", *Solid wastes*, LXX (1), pp. 20 – 30.

HORTON, R. E., (1919). "Rainfall interception," *Monthly Weather Review* 47(9), 603-623.

HUITRIC, R. L., RAKSIT, S., Y HAUG, R. T., (1980). "Moisture retention of landfilled solid waste", County Sanitation Districts of Los Angeles County, Los Angeles, Estados Unidos.

HUBER, W. C., Y DICKINSON, R. E., (1988). "Storm water management model, version 4". Environmental Protection Agency, Estados Unidos.

JENSEN, M. E., (1973). *Consumptive use of water and irrigation water requirements*. American Society of Civil Engineers, New York.

JOHNSON, R.A., (1986). "SOILINER Model - Documentation and User's Guide, U.S. Environmental Protection Agency, Hazardous Waste Engineering Research Lab. EPA - 530-SW-86-006A.

KHANBILVARDI R.M., SHABBIR A., Y GLEASON P.J., (1995). "Flow investigation for Landfill Leachate (FILL)", *Journal Environmental Engineering*, Vol. 121, January, pp. 45-57.

KNISEL, W. G., (1980). "CREAMS, a field scale model for chemical runoff and erosion from agricultural management systems. Vols. I, II, y III" *Conservation Report 26*, USDA-SEA. 643 pp.

KODA, E., Y ZAKOWICZ S., (1998). "Physical and hydraulic properties of the MSW for water balance of the landfill", En *Environmental Geotechnics*, Sêco e Pinto Ed., Balkema, Rotterdam, Holanda.

KORFIATIS, G. P., DEMETRACOPOULOS, A. C., BOURODIMOS, E., Y NAWY, E. G., (1984). "Moisture transport in a solid waste column", *Journal of Environmental Engineering*, 110 (4), pp.780 - 796.

KORFIATIS, G. P., Y DEMETRACOPOULOS, A. C., (1986). "Flow characteristics of landfill leachate collection systems and liners", *Journal of environmental engineering*, 112(3), pp. 538 – 550.

LAQUIDARA, M. J., LEUSCHNER, A. P., Y WISE D. L., (1986). "Procedure for determining potential gas quantities in an existing sanitary landfill", *Water Science and Research*, 18(12), pp. 151 – 162.

LOBO A., (2003). "Desarrollo de MODUELO 2: herramienta para la evaluación de la contaminación producida en vertederos de residuos sólidos urbanos", Universidad de Cantabria, 58 p.

LOBO, A., HERRERO, J., MONTERO, O., 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.

MARTIN, D. J. y POTTS, L. G. A., (2001). "A micro-reactor model of solid-state digestion". Actas del congreso "Sardinia 2001, Eighth International Waste Management and Landfill Symposium". 1 – 5 de octubre de 2001, CISA, Centro de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Cagliari, Italia. pp. 140 – 148.

McBEAN, E. A., POHLAND, R., ROVERS, F., Y CRUTCHER, A., (1982). "Leachate collection design for containment landfills", Journal of the Environmental engineering division, ASCE, 108, pp. 204 -209.

MEIMA, J., HAARSTRICK, A., MORA-NARANJO, N., Y HEMPEL, D. C., (2007). "Modelling Anaerobic Degradation in Municipal Landfills". Department of Biochemical Engineering, Technical University of Braunschweig.

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL – MAVDT, (2005). "Decreto 838 de 2005 - Por el cual se modifica el Decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones".

MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO - MINDESARROLLO, (2000). "Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS 2000".

MURPHY, R.J., Y GARWELL J. E., (1998). "Infiltration Rates Through Landfill Liners", Florida center for solid and hazardous waste management, 106p.

MUSGRAVE, G. W., (1955). "How much water enter the soils". Departamento de Agricultura de Estados Unidos, Washington DC, pp. 151 – 159.

NOBLE, J. J., Y ARNOLD, A. E., (1991). "Experimental and mathematical modeling of moisture transport in landfill", Department of Chemical Engineering, Tufts University, Vol. 100, pp. 95-111.

NOBLE J.J. Y ARNOLD A.E., (1992). "Experimental and Mathematical Modeling of Moisture Transport in Landfill", Department of Chemical Engineering, Tufts University, Vol. 100, pp. 95-111.

NOTAS DEL CURSO DE GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS (2002), Postgrado de Recursos Naturales, Universidad Sergio Robledo.

NYHAN, J. W., (1990). "Calibration of the CREAMS model for landfill cover designs limiting infiltration of precipitation at waste repositories", *Journal of the Hazardous waste and hazardous materials*, Vol. 7, n2, pp. 169 - 184.

OWENS, J. M., Y CHYNOWETH, D. P., (1993). "Biochemical methane potential of municipal solid waste (MSW) components", *Water Science and Technology*, 27(2), pp. 1-14.

PALMA, J. H., ESPINACE, R., Y VALENZUELA, P., (2004). "Análisis de la estabilidad de rellenos sanitarios". Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, U. de Cantabria, Santander, España.

PENMAN, H. L., (1963). "Vegetation and hydrology", Comentario técnico N° 53, Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, Gran Bretaña.

PERRIER, E. R. Y GIBSON, A. C., (1980). "Hydrologic simulation on solid wastes disposal sites" (HSSWDS), EPA/SW-868.US, Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, Estados Unidos.

PHILIP, J. R., (1969). "Theory of Infiltration," *Advances in Hydroscience*: V.T. Chow, Ed., Academic Press, New York, pp 215-296.

POHLAND, F. G., Y AL-YOUSFI, B., (1995). "Design and operation of landfills for optimum stabilization and biogas production", *Water Science and Technology*, 30(2) pp. 117-124.

QASIM, S. R., Y CHIANG, W., (1994). "Sanitary landfill leachate: generation, control and treatment", *Dallas, Texas: CRC Press*, pp. 1 – 176. ISBN 1-56676 -129 - 8.

QUIAN, X., KOERNER, R. M., Y GRAY, D. H., (2002). "Geotechnical aspects of landfill design and construction", *New Jersey: Prentice Hall*, pp. 1 – 25. ISBN 0-13-12506-7.

RAVEH, A., Y AVNIMELECH, Y., (1979). "Leaching of pollutants from sanitary landfill models", *Journal WPCF*, 51(11), pp. 2705 – 2716.

RENOU, S., GIVAUDAN, J. G., POULAIN, S., DIRASSOUYAN, F., Y MOULIN, P., (2007). "Landfill leachate treatment: Review and opportunity", *Journal of Hazardous Materials* 150, pp. 468 – 493.

RICHARDSON, C. W., (1981). "Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation," *Water Resources Research* 17(1), pp. 182-190.

RICHARDSON, C. W., Y WRIGHT, D. A., (1984). "WGEN: A model for generating daily weather variables," ARS-8, Agricultural Research Service, USDA. 83 pp.

RITCHIE, J. T., (1972). "A model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover", Water Resources Research, 8(5), pp. 1204 – 1213.

SAXTON, K. E., JOHNSON, H. P., Y SHAW, R. H., (1971). "Modeling evapotranspiration and soil moisture." Proceedings of american society of agricultural engineers 1971 winter meeting, St. Joseph, MI. No. 71-7636.

SHACKELFORD, C. D., (1988). "Diffusion as a transport process in fine grained materials", Getechnical news, Vol.6, No. 2, pp. 24 – 27.

SHAW, E. M., (1994). Hydrology in Practice. Chapman & Hall, Londres.

SCHROEDER, P. R., MORGAN, J. M., WALSKI, T. M., Y GIBSON, A. C., (1984a). "The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model, volume I, user's guide for 114 version 1," Technical Resource Document EPA/530-SW-84-009, US Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH. 120 pp.

SCHROEDER, P. R., GIBSON, A. C., Y SMOLEN, M. D., (1984b). "The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model, volume II, documentation for version 1," Technical Resource Document EPA/530-SW-84-010, US Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH. 256 pp.

SCHROEDER, P. R., PEYTON, R. L., MCENROE, B. M., Y SJOSTROM, J. W., (1988a). "The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model: Volume III. User's guide for version 2," Internal Working Document EL-92-1, Report 1, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS. 87 pp.

SCHROEDER, P. R., MCENROE, B. M., PEYTON, R. L., Y SJOSTROM, J. W., (1988b). "The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model: Volume IV. Documentation for version 2," Internal Working Document EL-92-1, Report 2, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS. 72 pp.

SCHROEDER, P. R., DOZIER, TAMSEN 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.

TCHOBANOGLIOUS, G., THEISEN, H., Y VIGIL, S., (1994). "Gestión Integral de Residuos Sólidos". McGraw Hill, Madrid. ISBN 84-81-1778-6 Vol I.

THOMPSON, F. L., Y TYLER, S. W., (1984). "Comparison of Two Groundwater Flow Models--UNSAT1D and HELP," EPRI CS-3695, Topical Report, October, Prepared by Battelle, Pacific Northwest Laboratories, for Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, 71 pp.

UGUCCIONI, M., Y ZEISS C., (1997). "Improvement of leachate prediction trough municipal solid waste layers", Journal of the American Water Resources Association, Vol. 33, No. 6, pp. 1265-1278.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA – SEDE MEDELLÍN, (2006). "Plan de ordenamiento y manejo de la microcuenca de la Quebrada Doña María – Componente Agua.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA – SEDE MEDELLÍN, (2006). "Plan de ordenación y manejo de la Cuenca del Río Aburrá – Componente Agua.

VÉLEZ, J. I., (2001). "Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual y distribuido orientado a la simulación de las crecidas". Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

VÉLEZ, M. V., (1999). "Hidráulica de aguas subterráneas", Universidad Nacional de Colombia, 2ª Edición, 313 p.

WHITE, J., ROBINSON, J., Y REN, Q., (2003). "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". 1 – 5 de octubre de 2001, CISA, Centro de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Cagliari, Italia. pp. 109 –118.

WONG, J., (1977). "The design of a system for collecting leachate from a lined landfill site". Water Resources Research, 13(2), pp. 404 – 410.

ZACHAROF, A. I., Y BUTLER, A. P., (1999). "Modelling biodegradation processes in heterogeneous landfill waste". Actas del congreso "Sardinia 1999, Seventh International Waste Management and Landfill Symposium", 4 – 8 octubre de 1999, CISA, Centro de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Cagliari, Italia. pp. 99 – 102.