

**UNIVERSIDAD DE OVIEDO**

E.T.S.I.I. e I.I.

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y TECNOLOGÍA  
DEL MEDIO AMBIENTE

**PRODUCCIÓN Y RECUPERACIÓN DEL  
BIOGÁS EN VERTEDEROS CONTROLADOS  
DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS:  
ANÁLISIS DE VARIABLES Y MODELIZACIÓN**

MEMORIA DE

TESIS DOCTORAL

*SANTIAGO MARTÍN GONZÁLEZ*

Gijón, Octubre de 1997



Universidad  
de Oviedo

Reservados todos los derechos  
© El autor

Edita: Universidad de Oviedo  
Biblioteca Universitaria, 2008  
Colección Tesis Doctoral-TDR nº 33

ISBN 978-84-691-6700-7  
D.L.: AS.05352-2008



A mi madre  
y a la memoria de mi padre

## AGRADECIMIENTOS

A Herminio Sastre, director de esta Tesis Doctoral, por su apoyo docente continuado durante estos años, por la confianza depositada en mi y por haber contagiado (y haberse dejado contagiar de) ilusión para el desarrollo de este trabajo.

A Santiago Fernández, gerente de COGERSA, por haber financiado este trabajo, y habernos exigido resultados cada vez más y más prácticos.

A Elena Fernández y Fernando Campos, compañeros directos durante algunas de las fases del proyecto, que derrocharon trabajo y amistad.

A Elena Marañón, a Leonor Castrillón, a Francisco Suárez, a Francisco J. Alonso, a Margarita Rodríguez, a Jesús Rodríguez y a Belén Coya, profesores, ayudantes y becarios del Área de Tecnología del Medio Ambiente, por haber luchado por crear un lugar donde trabajar sea una tarea grata.

A Manuel Cuervo, Faustino Álvarez, Rodrigo García y Manuel Andrés Bango, y a todo el personal de COGERSA, por sus ideas y por su ayuda como primer y más difícil test de la firmeza y utilidad de nuestras conclusiones, y por su trato humano.

A Alfonso Fernández Canteli, a Manolo Montenegro, a Eduardo Blanco y a Javier Suárez Quirós, todos ellos profesores de la ETSIIG que colaboraron de una u otra forma, pero siempre desinteresadamente, en el desarrollo de este trabajo.

A las empresas CSI, por facilitar los partes meteorológicos de la zona de Serín; VALT, por permitirnos conocer sus trabajos en distintos vertederos; FONOTEST, por la espléndida documentación remitida; y ZOREDA INTERNACIONAL, por haberme dado la posibilidad de aplicar una parte importante de los resultados obtenidos en proyectos concretos.

A todos los amigos colombianos, en especial a Germán Jaramillo, profesor de la Universidad de Antioquia (Medellín, Colombia), por la calurosa acogida que nos depararon en tierras tan lejanas.

A todos los amigos búlgaros del vertedero de Bratovo, de cuyo país guardamos el mejor recuerdo.

A mis amigos, a mi madre y hermanos y a Begoña, todos ellos ya expertos en esto del biogás y las basurillas, por no haberme dejado decaer en los momentos flojos y escuchar mis avances paso a paso, sin dejar asomar sombra de aburrimiento.

## RESUMEN

La materia orgánica contenida en los residuos sólidos urbanos depositados en un vertedero controlado con recubrimiento sufre un proceso de degradación anaerobia, generándose una mezcla gaseosa denominada biogás ó gas de vertedero, rica en metano.

La emisión incontrolada del biogás a la atmósfera conlleva importantes problemas medioambientales y de seguridad e higiene en el vertedero. Debido a ello, en todo vertedero controlado debe existir un sistema de desgasificación, que incluya una red de pozos de captación, un sistema de extracción controlada y un equipo de incineración del biogás. Sin embargo, dado el alto poder calorífico del metano y su elevada concentración en el biogás, es posible convertir este problema medioambiental en una fuente de energía alternativa.

Este trabajo estudia los factores que intervienen en la generación del biogás, así como aquellos que afectan a su extracción del vertedero. Para ello, se ha estudiado la red de captación de biogás del vertedero de **La Zoreda** (Asturias). Se ha analizado la composición del biogás, proponiendo métodos para la correcta interpretación de los resultados; se han medido otras variables de interés, como la presión o la temperatura del gas; y se ha recabado abundante información del vertedero, como datos de composición de los residuos, toneladas vertidas, planos topográficos, caudales de biogás recuperados, etc.

También se han propuesto una serie de **ensayos** originales que permiten interpretar los fenómenos que tienen lugar en el vertedero. Estos ensayos han sido realizados en los vertederos de La Zoreda (Asturias) y **Bratovo** (Burgas, Bulgaria).

Los resultados obtenidos han permitido desarrollar, en primer lugar, un **modelo de cálculo de la producción de biogás** en un vertedero. Este modelo, junto con los ensayos de campo propuestos, son la base de una metodología para la **determinación de la producción de biogás en vertederos controlados**, aplicada en el vertedero de Bratovo. En segundo lugar, se ha desarrollado un **modelo de la migración de biogás en el interior del vertedero** que explica, por ejemplo, el funcionamiento de los pozos de captación o las fugas laterales de biogás. Finalmente, se ha desarrollado un tercer **modelo de la captación de biogás** que permite anticipar el método a seguir para una extracción del biogás controlada.

De esta forma, se ha definido un **método de control manual para la extracción de biogás**, el cual es utilizado actualmente en dos de las siete estaciones de extracción de biogás del vertedero de La Zoreda. Un desarrollo de este mismo método ha sido adoptado para la inminente ampliación de la red de captación de biogás en este vertedero. Está previsto que esta ampliación regule alrededor del 50% del caudal total de biogás recuperado en La Zoreda.

Como demuestran estas consideraciones, los resultados obtenidos tienen una utilidad inmediata en la determinación de la producción de biogás en nuevos vertederos así como en el diseño de sistemas de control para la extracción de biogás.

## ABSTRACT

The organic matter which is present in municipal solid waste of a landfill is degraded in an anaerobic process which generates a gas mixture called biogas or landfill gas. The main constituent of biogas is methane.

The emission of biogas into the atmosphere brings about major problems to the environment as well as safety and hygienic problems if it is not properly controlled. Therefore, an appropriate extraction system is needed in every sanitary landfill. This system must include a grid of extracting wells, a controlled extraction system and a flare. Nevertheless, due to the high calorific value of methane, and its high concentration in biogas, this environmental problem can be turned into an alternative energy source.

This work studies the factors which affect the biogas generation as well as its extraction from the landfill. The biogas extraction system of the **La Zoreda** landfill (Asturias) has been studied. The biogas composition has been analysed and several methods for the correct interpretation of the results have been proposed; other factors have been measured such as the biogas pressure and temperature; and, finally, a major amount of data has been collected in the landfill such as waste composition analyses, quantity of waste landfilled, topographic maps, recovered biogas flow rate, etc.

Moreover, new **tests** have been proposed in order to understand the internal processes that take place inside the landfill. These tests have been carried out in the landfills of La Zoreda (Asturias) and **Bratovo** (Burgas, Bulgaria).

The results obtained have allowed several developments. First, a **mathematical model for the calculation of biogas production** was achieved. This model, along with the proposed in field tests, is the base for **a method which is used to predict the biogas in landfills**. This method has been used in Bratovo landfill. Second, a **mathematical model of the biogas migration inside the landfill** was achieved. This model is useful, for example, to explain the way the biogas is recovered in the wells and the biogas lateral migration outwards the landfill. Finally, a third **mathematical model was developed to explain the biogas recovery**. This model allows to anticipate the methods of biogas controlled extraction.

After all this, a **biogas manually-controlled extraction method** has been defined. This method is used nowadays in two of the seven biogas extraction plants of the La Zoreda landfill. A revision of this method has been adopted for the enlargement of the La Zoreda extraction grid. This enlargement will control about 50% of the total biogas flow rate recovered in La Zoreda.

As it is shown by these facts, the results obtained have a useful application in the determination of biogas production rate in new landfills as well as in the design of new extraction control systems.

## ÍNDICE

	Página
<i>Agradecimientos</i>	i
<i>Resumen</i>	ii
<i>Abstract</i>	iii
<i>Índice</i>	iv
<i>Lista de Tablas</i>	viii
<i>Lista de Figuras</i>	x
<i>Lista de Fotografías</i>	xiii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. <u>Degradación anaerobia y generación de metano</u>	2
1.2. <u>Vertederos controlados de residuos sólidos urbanos</u>	3
1.3. <u>Importancia de la producción de biogás en los vertederos controlados de RSU</u>	5
1.4. <u>Génesis y objetivos del trabajo</u>	9
1.4.1. Génesis del trabajo	9
1.4.2. Objetivos del trabajo	11
2. GENERACIÓN DE BIOGÁS EN VERTEDEROS CONTROLADOS DE RSU: ANÁLISIS DE FACTORES Y MODELIZACIÓN	13
2.1. <u>Etapas de la degradación anaerobia</u>	14
2.2. <u>Relación entre el biogás y el lixiviado</u>	17
2.2.1. Origen de los lixiviados	17
2.2.2. Composición del lixiviado	18
2.2.3. Factores que afectan la producción de lixiviados	19
2.2.4. Interacción entre el lixiviado y la producción de biogás	19
2.3. <u>Impacto ambiental de la generación de biogás en los vertederos</u>	21
2.3.1. Efectos sobre la Seguridad e Higiene de los trabajadores y la población aledaña	21
2.3.2. Efectos sobre la vegetación	22
2.3.3. Efectos sobre el Medio Ambiente global	23
2.4. <u>Composición del biogás</u>	24
2.4.1. Evolución de la composición con el tiempo	24
2.4.2. Componentes mayoritarios del biogás	26
2.4.3. Componentes minoritarios	29
2.4.4. Medida de la composición del biogás	31
2.4.4.1. Ensayo Biogás/Gas de Vertedero	34
2.4.4.2. Medida del contenido en humedad	38
2.4.4.3. Componentes minoritarios	40

2.5. <u>Caudal generado de biogás. Análisis de los factores que influyen en la generación de biogás</u>	41
2.5.1. Factores ambientales	41
2.5.2. Residuos depositados	45
2.5.2.1. Cantidades vertidas	45
2.5.2.2. Composición de los RSU	47
2.5.2.3. Contenido en humedad de los RSU	49
2.5.2.4. Nutrientes	50
2.5.2.5. Inhibidores de la actividad metanogénica	50
2.5.3. Diseño del vertedero	51
2.5.3.1. Topografía	51
2.5.3.2. Acondicionamiento del vaso de vertido	53
2.5.4. Tratamiento de los residuos	53
2.5.4.1. Técnicas de vertido	54
2.5.4.2. Altura de las capas de residuos	58
2.5.4.3. Compactación	58
2.5.4.4. Trituración	63
2.5.4.5. Cobertura	64
2.5.4.6. Recirculación de lixiviados	65
2.5.5. Sistema de extracción de biogás	66
2.6. <u>Modelo de cálculo de la producción de biogás</u>	67
2.6.1. Volumen total de biogás generado y recuperado por la degradación de los RSU	67
2.6.1.1. Producción teórica de metano según la DQO	67
2.6.1.2. Influencia de la composición de los residuos urbanos	69
2.6.1.3. Caudal de biogás recuperable	71
2.6.2. Cálculo de la velocidad de generación de biogás en un vertedero	74
2.6.3. Modelización de la producción mensual de biogás recuperable en cada zona del vertedero	82
2.6.3.1. Datos experimentales	82
2.6.3.2. Modelización de la producción de biogás recuperable en cada zona del vertedero	82
3. MIGRACIONES DE BIOGÁS EN EL INTERIOR DEL VERTEDERO	87
3.1. <u>El problema de la migración de biogás</u>	88
3.2. <u>Explicación física del fenómeno</u>	89
3.3. <u>Modelo de la migración de biogás en un vertedero</u>	91
3.3.1. Planteamiento del fenómeno	91
3.3.2. Resolución del modelo propuesto	93
3.3.3. Adaptación del método a coordenadas cilíndricas	94
3.3.4. Valor de las distintas constantes	96



3.4. <u>Aplicación a distintas situaciones en vertederos</u>	98
3.4.1. Vertedero sin captación de biogás	99
3.4.2. Vertedero con chimeneas de venteo	100
3.4.3. Vertedero controlado (con captaciones de extracción forzada)	102
3.5. <u>Discusión de resultados</u>	109
4. ANÁLISIS DE LA CAPTACIÓN DEL BIOGÁS	110
4.1. <u>Tipos de captaciones de biogás</u>	111
4.2. <u>Análisis y medida de las variables que intervienen en la captación del biogás</u>	116
4.2.1. Descripción de los equipos de medida	116
4.2.1.1. Presión relativa en el pozo de extracción	116
4.2.1.2. Caudal de biogás: Extractor Portátil de Biogás	117
4.2.2. Ensayo Presión/Tiempo	119
4.2.2.1. Descripción del ensayo	119
4.2.2.2. Resultados experimentales	119
4.2.2.3. Interpretación de resultados experimentales	123
4.2.3. Ensayo Caudal Aire/Caudal Gas	125
4.2.3.1. Descripción del ensayo	125
4.2.3.2. Resultados experimentales	126
4.2.3.3. Interpretación de resultados experimentales	133
4.2.4. Ensayo "Régimen Permanente"	133
4.2.4.1. Descripción del ensayo	133
4.2.4.2. Resultados experimentales	133
4.2.4.3. Interpretación de resultados experimentales	134
4.2.5. Ensayo de Emisiones Superficiales	134
4.2.5.1. Descripción del ensayo	134
4.2.5.2. Resultados experimentales	135
4.2.5.3. Interpretación de resultados experimentales	137
4.3. <u>Validación del modelo de migración del biogás mediante el Ensayo Caudal Aire/Caudal Gas</u>	138
4.4. <u>Modelo de la captación del biogás</u>	140
4.5. <u>Diseño de la red de captación de biogás. Radio de Influencia</u>	147
5. DETERMINACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN UN VERTEDERO CONTROLADO	151
5.1. <u>Propuesta de una metodología de estudio</u>	153
5.2. <u>Ensayos y medidas en campo</u>	155
5.2.1. Descripción de los equipos necesarios	155
5.2.2. Ubicación y número de sondas de muestreo	156
5.2.2.1. Selección del emplazamiento de los pozos	156
5.2.2.2. Número de sondas de muestreo	157

5.2.3. Duración de los trabajos de campo	158
5.2.4. Técnicas experimentales	160
5.2.4.1. Medida de la Temperatura	162
5.3. <u>Interpretación y alcance de los resultados</u>	169
6. SISTEMAS DE RECUPERACIÓN DEL BIOGÁS. MÉTODO DE CONTROL MANUAL DE EXTRACCIÓN	171
6.1. <u>Descripción general de los sistemas de recuperación del biogás</u>	172
6.1.1. Red de captación de biogás	173
6.1.2. Estación de control de extracción	176
6.1.3. Estación de aspiración e impulsión del biogás	176
6.2. <u>Regulación de la extracción del biogás</u>	178
6.2.1. Definición de las variables de control	178
6.2.2. Tipos de sistemas de control	179
6.2.3. Definición de un plan de control manual	180
6.2.4. Aplicación del plan de control manual y discusión de resultados	182
7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	192
7.1. <u>Conclusiones</u>	193
7.2. <u>Posibles desarrollos futuros de la investigación</u>	196
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	197
8.1. <u>Actas de Congresos y Seminarios</u>	198
8.2. <u>Documentos de empresas e instituciones públicas</u>	199
8.3. <u>Legislación</u>	200
8.3.1. Disposiciones relativas a los residuos	200
8.3.2. Disposiciones energéticas españolas de apoyo a la autogeneración eléctrica	201
8.4. <u>Artículos y libros</u>	202
9. ANEXOS	210
A. APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS	211
A-1. <u>Propiedades del biogás como combustible</u>	211
A-2. <u>Ejemplos de usos del biogás en Asturias</u>	214
A-2.1. Uso del biogás en quemadores: Hornos y Calderas	214
A-2.2. Uso del biogás en motores de combustión interna para la generación de electricidad	217
A-3. <u>Otras instalaciones de aprovechamiento del biogás en España</u>	220
A-3.1. Vertedero de Artigas (Bilbao)	220
A-3.2. Vertedero de San Marcos (Mancomunidad de San Marcos, Vizcaya)	220
A-3.3. Vertedero de Góngora (Mancomunidad de Pamplona)	220

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Producción mundial de Residuos Sólidos Urbanos	5
<b>Tabla 2.</b> Sistemas de tratamiento de los residuos municipales en países occidentales	6
<b>Tabla 3.</b> Estimación de las emisiones mundiales de metano de vertederos	7
<b>Tabla 4.</b> Producción de metano y recuperación de energía en vertederos con sistemas de revalorización	8
<b>Tabla 5.</b> Principales reacciones de conversión en el ecosistema anaerobio	16
<b>Tabla 6.</b> Características del lixiviado del vertedero de La Zoreda	18
<b>Tabla 7.</b> Contribución relativa al Efecto Invernadero de distintos gases antropogénicos	23
<b>Tabla 8.</b> Concentraciones habituales de distintos componentes del biogás recuperado en un vertedero	26
<b>Tabla 9.</b> Efectos tóxicos del sulfuro de hidrógeno	31
<b>Tabla 10.</b> Resultados del Ensayo Biogás / Gas de Vertedero en los pozos F11 y F9 del vertedero de La Zoreda (Asturias)	36
<b>Tabla 11.</b> Composición del Gas de Vertedero (La Zoreda)	37
<b>Tabla 12.</b> Composición del Gas de Vertedero (Bratovo)	37
<b>Tabla 13.</b> Componentes minoritarios del gas de vertedero de La Zoreda	40
<b>Tabla 14.</b> Contenido en H <sub>2</sub> S del gas de vertedero de Bratovo	40
<b>Tabla 15.</b> Datos meteorológicos del vertedero de La Zoreda	43
<b>Tabla 16.</b> Datos meteorológicos del vertedero de Bratovo	44
<b>Tabla 17.</b> Vertido anual de RSU en el vertedero de La Zoreda	46
<b>Tabla 18.</b> Vertido anual de RSU en el vertedero de Bratovo	47
<b>Tabla 19.</b> Composición de los RSU en Europa y EE.UU.	48
<b>Tabla 20.</b> Comparación de la composición media de los RSU en los vertederos de Bratovo y La Zoreda	49
<b>Tabla 21.</b> Compuestos orgánicos inhibidores de la metanogénesis	51
<b>Tabla 22.</b> Tiempos necesarios para la degradación del 50% de una muestra según su composición	69
<b>Tabla 23.</b> Producción teórica máxima de biogás a partir de distintos compuestos orgánicos	70
<b>Tabla 24.</b> Producción de biogás por tonelada de RSU según distintos autores	73
<b>Tabla 25.</b> Producción de biogás de cada uno de los componentes de los RSU	74
<b>Tabla 26.</b> Valor de tiempo de degradación, $d$ (años)	75
<b>Tabla 27.</b> Producción de biogás por tonelada de residuo según su grado de degradabilidad	76
<b>Tabla 28.</b> Caudal de biogás generado por tonelada de materia orgánica	77
<b>Tabla 29.</b> Producción de biogás recuperable en el vertedero de La Zoreda	79
<b>Tabla 30.</b> Producción de biogás recuperable en el vertedero de Bratovo	80
<b>Tabla 31.</b> Valores de las constantes $G(i,j)$ y $K$ del modelo de migración del biogás	99
<b>Tabla 32.</b> Resultados modelo de migración para vertedero sin captación de biogás	99
<b>Tabla 33.</b> Resultados modelo de migración para captación de venteo abierta	101
<b>Tabla 34.</b> Resultados modelo de migración para captación de venteo cerrada	102
<b>Tabla 35.</b> Resultados modelo de migración para captación, $P_{\text{pozo}}=-10$ mmca	103

<b>Tabla 36.</b> Resultados modelo de migración para captación, $P_{\text{pozo}}=-20$ mmca	104
<b>Tabla 37.</b> Resultados modelo de migración para captación, $P_{\text{pozo}}=-30$ mmca	105
<b>Tabla 38.</b> Resultados modelo de migración para captación, $P_{\text{pozo}}=-40$ mmca	106
<b>Tabla 39.</b> Resultados modelo de migración para captación, $P_{\text{pozo}}=-50$ mmca	107
<b>Tabla 40.</b> Resultados modelo de migración para captación, $P_{\text{pozo}}=-60$ mmca	108
<b>Tabla 41.</b> Ensayos Presión/Tiempo (vertedero de La Zoreda)	120
<b>Tabla 42.</b> Presión del biogás en el interior del vertedero según distintos autores	120
<b>Tabla 43.</b> Resultados obtenidos en Ensayos Caudal Aire/Caudal Gas en el vertedero de La Zoreda	126
<b>Tabla 44.</b> Resultados obtenidos en Ensayos Caudal Aire/Caudal Gas en el vertedero de Bratovo	127
<b>Tabla 45.</b> Ensayos Régimen Permanente, pozos I y II, vertedero de Bratovo	134
<b>Tabla 46.</b> Resultados Ensayos de Emisiones Superficiales, pozo B5, 12/5/94, (La Zoreda)	136
<b>Tabla 47.</b> Resultados Ensayos de Emisiones Superficiales, pozo B8-II, (La Zoreda)	136
<b>Tabla 48.</b> Resultados Ensayos de Emisiones Superficiales, pozos B7-I y B11-II (La Zoreda)	136
<b>Tabla 49.</b> Simulación del Ensayo Caudal Aire/Caudal Gas mediante el modelo de migración	138
<b>Tabla 50.</b> Definición de los parámetros del modelo de captación de biogás	141
<b>Tabla 51.</b> Valores de las constantes del modelo de captación de biogás	142
<b>Tabla 52.</b> Registro de temperaturas en los pozos A2, A4 y A10 (La Zoreda)	163
<b>Tabla 53.</b> Registro de temperaturas en pozos de la Caseta F (La Zoreda)	167
<b>Tabla 54.</b> Registro de temperaturas en las sondas del vertedero de Bratovo	168
<b>Tabla 55.</b> Control Manual. Temperaturas y presiones pozo A4	183
<b>Tabla 56.</b> Control Manual. Temperaturas y presiones pozo A10	183
<b>Tabla 57.</b> Control Manual. Contenidos en metano y oxígeno, posición de la válvula de regulación y acciones de control	184
<b>Tabla A1.</b> Emisiones por chimenea del Horno Incinerador de Residuos Hospitalarios	215

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Etapas de la degradación anaerobia de los RSU	15
<b>Figura 2.</b> Entradas y salidas de agua en un vertedero	17
<b>Figura 3.</b> Evolución con el tiempo de la composición del biogás generado por una misma tongada de residuos	25
<b>Figura 4.</b> Límites explosivos de la mezcla metano-oxígeno	27
<b>Figura 5.</b> Flujos de gas y aire en una captación de biogás	35
<b>Figura 6.</b> Conceptos de <i>Gas de Vertedero</i> y <i>Biogás</i>	35
<b>Figura 7.</b> Riqueza en metano del Gas de Vertedero en La Zoreda	37
<b>Figura 8.</b> Riqueza en metano del Gas de Vertedero en Bratovo	38
<b>Figura 9.</b> Equipo de medida del contenido en humedad	39
<b>Figura 10.</b> División en zonas de distinta profundidad, vertedero de La Zoreda	52
<b>Figura 11.</b> División en zonas de distinta profundidad, vertedero de Bratovo	53
<b>Figura 12.</b> Técnica de vertido por área	54
<b>Figura 13.</b> Caudal de biogás recuperable en el vertedero de La Zoreda	81
<b>Figura 14.</b> Caudal de biogás recuperable en el vertedero de Bratovo	81
<b>Figura 15.</b> Histórico de caudales, Caseta A (La Zoreda)	83
<b>Figura 16.</b> Histórico de caudales, Caseta B (La Zoreda)	83
<b>Figura 17.</b> Histórico de caudales, Caseta C (La Zoreda)	83
<b>Figura 18.</b> Histórico de caudales, Caseta D (La Zoreda)	84
<b>Figura 19.</b> Histórico de caudales, Caseta E (La Zoreda)	84
<b>Figura 20.</b> Histórico de caudales, Caudal Total (La Zoreda)	84
<b>Figura 21.</b> Modelización del caudal de biogás mensual recuperado por caseta	85
<b>Figura 22.</b> Modelización del caudal total de biogás recuperado	86
<b>Figura 23.</b> Representación simbólica de las variables y constantes que integran la superficie de control (i,j) del modelo de migración del biogás	92
<b>Figura 24.</b> Adaptación del problema a coordenadas cilíndricas para el modelo de migración del biogás	95
<b>Figura 25.</b> Retícula utilizada para la modelización de una captación de biogás	98
<b>Figura 26.</b> Resultados modelo migración para vertedero sin captación de biogás	100
<b>Figura 27.</b> Resultados modelo migración para captación de venteo abierta	101
<b>Figura 28.</b> Resultados modelo migración para captación de venteo cerrada	102
<b>Figura 29.</b> Resultados modelo migración con captación, $P_{\text{pozo}} = -10$ mmca	103
<b>Figura 30.</b> Resultados modelo migración con captación, $P_{\text{pozo}} = -20$ mmca	104
<b>Figura 31.</b> Resultados modelo migración con captación, $P_{\text{pozo}} = -30$ mmca	105
<b>Figura 32.</b> Resultados modelo migración con captación, $P_{\text{pozo}} = -40$ mmca	106
<b>Figura 33.</b> Resultados modelo migración con captación, $P_{\text{pozo}} = -50$ mmca	107
<b>Figura 34.</b> Resultados modelo migración con captación, $P_{\text{pozo}} = -60$ mmca	108
<b>Figura 35.</b> Drenaje conjunto de biogás y lixiviados	111
<b>Figura 36.</b> Corte esquemático de una captación vertical de biogás	112
<b>Figura 37.</b> Captación radial de biogás	115
<b>Figura 38.</b> Captación superficial de biogás en un vertedero controlado	116
<b>Figura 39.</b> Extractor Portátil de Biogás	118
<b>Figura 40.</b> Ensayo Presión/Tiempo, pozo F5, 9/12/93	121
<b>Figura 41.</b> Ensayo Presión/Tiempo, pozo F5, 13/12/93	121

<b>Figura 42.</b> Ensayo Presión/Tiempo, pozo F7, 9/12/93	121
<b>Figura 43.</b> Ensayo Presión/Tiempo, pozo F7, 13/12/93	122
<b>Figura 44.</b> Ensayo Presión/Tiempo, pozo F11, 9/12/93	122
<b>Figura 45.</b> Ensayo Presión/Tiempo, pozo F11, 13/12/93	122
<b>Figura 46.</b> Superposición entre los datos experimentales del pozo F5 (9/12/93) y una función exponencial	125
<b>Figura 47.</b> Ensayo Caudal Aire/Caudal Gas, presiones, pozo B5-II, 23/05/94 (La Zoreda)	128
<b>Figura 48.</b> Ensayo Caudal Aire/Caudal Gas, apertura de válvula, pozo B5-II, 23/05/94 (La Zoreda)	128
<b>Figura 49.</b> Ensayo Caudal Aire/Caudal Gas, presiones, pozo B5-II, 16/05/94 (La Zoreda)	129
<b>Figura 50.</b> Ensayo Caudal Aire/Caudal Gas, apertura de válvula, pozo B5-II, 16/05/94 (La Zoreda)	129
<b>Figura 51.</b> Ensayo Caudal Aire/Caudal Gas, presiones, pozo A2-II, 22/02/94 (La Zoreda)	130
<b>Figura 52.</b> Ensayo Caudal Aire/Caudal Gas, apertura de válvula, pozo A2-II, 22/02/94 (La Zoreda)	130
<b>Figura 53.</b> Ensayo Caudal Aire/Caudal Gas, apertura de válvula, pozo I, 2/11/95 (Bratovo)	131
<b>Figura 54.</b> Ensayo Caudal Aire/Caudal Gas, apertura de válvula, pozo II, 3/11/95 (Bratovo)	131
<b>Figura 55.</b> Ensayo Caudal Aire/Caudal Gas, apertura de válvula, pozo III, 7/11/95 (Bratovo)	132
<b>Figura 56.</b> Ensayo Caudal Aire/Caudal Gas, apertura de válvula, pozo IV, 8/11/95 (Bratovo)	132
<b>Figura 57.</b> Posición de los bidones en los Ensayos de Emisiones Superficiales	137
<b>Figura 58.</b> Simulación del Ensayo Caudal Aire/Caudal Gas mediante el modelo de migración	139
<b>Figura 59.</b> Circuito hidráulico equivalente de una captación de biogás	140
<b>Figura 60.</b> Determinación de las constantes del modelo de captación: (a) Caudales y presiones; (b) Composición del Biogás; (c) Ensayo Caudal Aire/Caudal Gas	143
<b>Figura 61.</b> Modelo de captación. Incremento en la generación de gas	144
<b>Figura 62.</b> Modelo de captación. Decremento en la generación de gas	145
<b>Figura 63.</b> Representación esquemática de una red de captación de biogás	148
<b>Figura 64.</b> Vectores unitarios del caudal según el modelo de migración del biogás para una presión del pozo de -30 mmca	149
<b>Figura 65.</b> Volumen de influencia de un pozo de captación aislado en venteo	149
<b>Figura 66.</b> Volumen de influencia de un pozo de captación aislado en extracción forzada	150
<b>Figura 67.</b> Zona de Influencia de un pozo de captación dentro de una red isométrica	150
<b>Figura 68.</b> Parámetros que definen la Zona de Influencia de un pozo	161
<b>Figura 69.</b> Temperaturas pozo A2, febrero '94	164
<b>Figura 70.</b> Diferencia de temperaturas pozo A2, febrero '94	164
<b>Figura 71.</b> Temperaturas pozo A4, marzo-junio '94	165
<b>Figura 72.</b> Diferencia de temperaturas pozo A4, marzo-junio '94	165

<b>Figura 73.</b> Temperaturas pozo A10, marzo-junio'94	166
<b>Figura 74.</b> Diferencia de temperaturas pozo A10, marzo-junio'94	166
<b>Figura 75.</b> Esquema general de un sistema de recuperación de biogás	173
<b>Figura 76.</b> Conexión de los pozos a las líneas de conducción: (a) líneas individuales hasta la Estación de Control; (b) colector general sobre el vertedero	174
<b>Figura 77.</b> Tendido de la línea de conducción de biogás: (a) en superficie; (b) aéreo	175
<b>Figura 78.</b> Purga automática de condensados	175
<b>Figura 79.</b> Gráfica de regulación del Método de Control Manual de Extracción de Biogás	181
<b>Figura 80.</b> Ensayo de Control Manual, pozo A4 (del 17/3/94 al 27/6/94)	189
<b>Figura 81.</b> Ensayo de Control Manual, pozo A10 (del 17/3/94 al 27/6/94)	189
<b>Figura 82.</b> Dispersión de resultados bajo control manual, pozo A4	190
<b>Figura 83.</b> Dispersión de resultados bajo control manual, pozo A10	190
<b>Figura 84.</b> Dispersión de resultados bajo control automático, pozo A4	191
<b>Figura 85.</b> Dispersión de resultados bajo control automático, pozo A10	191
<b>Figura A1.</b> Producción eléctrica en La Zoreda (1993/94)	219
<b>Figura A2.</b> Utilización de los motores en La Zoreda (1993/94)	219

## LISTA DE FOTOGRAFÍAS

<b>Fotografía 1.</b> Equipos de análisis y medida portátiles: analizador de biogás, termómetro y manómetro	33
<b>Fotografía 2.</b> Recirculación de lixiviados en períodos secos (La Zoreda)	42
<b>Fotografía 3.</b> Relleno o vertido en celdas (Metz, Francia)	55
<b>Fotografía 4.</b> Fases del vertido por área: (a) Disposición, (b) Trituración, (c) Recubrimiento	56
<b>Fotografía 5.</b> Altura de la capa de residuos: (a) La Zoreda, Asturias; (b) Curva de Rodas, Medellín; (c) Doña Juana, Bogotá; (d) Bratovo, Burgas	59
<b>Fotografía 6.</b> Vertedero de Balas (Cerceda, Galicia)	61
<b>Fotografía 7.</b> Comprobación de la densidad de los RSU y del espesor de cubrición (Doña Juana - Bogotá, Colombia -)	62
<b>Fotografía 8.</b> Compactación y trituración de los RSU (Cerro Patacón, Panamá)	63
<b>Fotografía 9.</b> Distintas chimeneas de venteo del biogás: (a) Doña Juana, Bogotá; (b) Curva de Rodas, Medellín; (c) Cerro Patacón, Panamá	113
<b>Fotografía 10.</b> Extractor Portátil de Biogás	119
<b>Fotografía 11.</b> Burbujas de biogás aflorando en la superficie de un vertedero	135
<b>Fotografía A1.</b> Evaporador de lixiviados alimentado con biogás (vertedero de Soignolles en Brie, Metz, Francia)	212
<b>Fotografía A2.</b> Planta de generación de electricidad y nave para el secado de forraje, ambas alimentadas con biogás (vertedero de Mont St Sèbastien, París, Francia)	212
<b>Fotografía A3.</b> Planta de generación de energía eléctrica (vertedero de Dunsink, Dublín, Irlanda)	213
<b>Fotografía A4.</b> Horno Incinerador de Residuos Hospitalarios (La Zoreda)	215
<b>Fotografía A5.</b> Estación de suministro de biogás a la Planta de Aprovechamiento de Subproductos Cárnicos (La Zoreda)	216
<b>Fotografía A6.</b> Planta de generación de electricidad para consumo en el Área de Lixiviados (La Zoreda)	218
<b>Fotografía A7.</b> Planta de generación de electricidad para la venta a la red eléctrica (La Zoreda)	218



## **1. INTRODUCCIÓN**

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Degradación anaerobia y generación de metano

Los restos de vegetales, los animales muertos y también sus excrementos, se descomponen en la Naturaleza normalmente en contacto con el oxígeno del aire. Es lo que se conoce como **degradación aerobia** y en ella actúan microorganismos que consumen oxígeno en su metabolismo. Este tipo de degradación biológica va acompañada de desprendimiento de *dióxido de carbono* y *vapor de agua*, además de un aumento de la temperatura, debido precisamente a la actividad de esos microorganismos.

Sin embargo, a veces la degradación de la materia orgánica se produce en ausencia del oxígeno del aire, esto es, en condiciones **anaerobias**. Esto puede ocurrir, por ejemplo, tras un cataclismo que entierre plantas y animales bajo una gruesa capa de tierra o, también, en una ciénaga donde esos restos puedan quedar acumulados bajo el lodo. En estos casos, los microorganismos que actúan son del tipo anaerobio y su actividad, además de ir acompañada de un menor aumento de la temperatura, produce una mezcla gaseosa combustible compuesta principalmente de *metano*, *dióxido de carbono*, *vapor de agua* e *hidrógeno*.

Esta mezcla gaseosa resultado de una degradación anaerobia se observa en las minas de carbón y se conoce como *grisú*; en los yacimientos petrolíferos, donde se denomina *gas natural*; o en los cementerios, donde es la causante de los llamados *fuegos fatuos*, por citar algunos ejemplos. De forma artificial, la degradación anaerobia es utilizada para la depuración de las aguas residuales urbanas, para la eliminación de los residuos sólidos urbanos en vertederos controlados y para el tratamiento de los excrementos de animales estabulados, conociéndose el gas generado en todos estos casos como **biogás** y, en el caso de los vertederos controlados, también como **gas de vertedero**.

## 1.2. Vertederos Controlados de Residuos Sólidos Urbanos (RSU)

El vertedero, entendido como un lugar para el depósito de los desperdicios, ha acompañado a la Historia de la Humanidad desde el momento en que el hombre comienza a vivir en asentamientos más o menos permanentes.

Todas las culturas han alejado de sí al vertedero o basurero, dejándolo en manos de sus castas y clases sociales más bajas, pues contiene lo que ha sido rechazado bien por carecer de valor, bien por ser indeseable. Este descuido premeditado acrecienta el problema, pues el vertedero se convierte, sin un manejo adecuado, en un lugar insalubre, foco de enfermedades que se propagan a través de distintos vectores (roedores, insectos, etc.). Aquellos que conviven con el vertedero están expuestos a estas enfermedades, sumándose a su condición de *parias* la condición de *intocables*. Aún hoy en día el vertedero se asocia culturalmente a la marginación. En España y otros países europeos es un elemento más del rechazo a la cultura gitana. En Latinoamérica existen multitud de nombres para señalar a los que viven del vertedero: *basuriegos*, *pepenadores*, *rebuscadores*... todos ellos englobados dentro del horrible término acuñado para designar a los más pobres entre los pobres: *desechables*.

No obstante, en este siglo, debido a factores como las proporciones cada vez mayores de las ciudades y el mayor conocimiento científico de los problemas sanitarios ocasionados en los basureros, se han comenzado a aplicar técnicas ingenieriles a la gestión de residuos. En los años 30, en Estados Unidos y en Gran Bretaña se empieza a emplear maquinaria pesada para la compactación de los residuos, añadiéndose tierra para taparlos: de esta manera, se evitan malos olores y se economiza el espacio disponible. A partir de los años 60 comienza en EE.UU. el control de las emisiones de biogás. La primera planta de captación de Europa fue construida en Alemania a mediados de los años 70 (Gendebien *et al.*, 1992; Christensen *et al.*, 1996).

Durante estos 60 ó 70 años se ha desarrollado un conocimiento científico y técnico alrededor del problema de los residuos. Paralelamente a la mejora de las condiciones de diseño, operación y clausura de los vertederos se ha ido gestando toda una nueva **cultura de los residuos**, que ha hecho del vertedero “*el recurso final en la gestión de residuos*”, dado que “*esta práctica puede dar lugar a graves problemas medioambientales de contaminación del suelo y de las aguas subterráneas*” (propuesta de "Directiva del Consejo Relativa al Vertido de Residuos", Comisión de las Comunidades Europeas, Bruselas, 1991).

Esta cultura potencia la **reducción** en la producción de residuos, su **reutilización** y su **reciclado**. Como consecuencia, se han desarrollado o perfeccionado tecnologías como el **compostaje** aerobio de la fracción orgánica de los residuos o su **metanización** anaerobia, o se ha avanzado en el diseño de las plantas de **incineración**.

Sin embargo, todos estos procesos producen en mayor o menor medida rechazos o escorias cuya eliminación final sólo es posible mediante su vertido controlado. Aún estamos muy lejos de la meta del vertido cero. Más aún, al analizar el planeta en su conjunto, nuestra Aldea Global dista aún mucho de poder aplicar los objetivos que se marcan los países occidentales. Por todo ello, no nos equivocamos al afirmar que el vertedero es (y será aún durante mucho tiempo) la opción más generalizada para la eliminación de los residuos.

Bajo el término de Vertedero de Residuos Sólidos Urbanos se incluyen conceptos diferenciados, entre los que destacamos:

- **Vertedero Incontrolado.** Se denomina así al vertedero en el que no se aplican medidas protectoras del impacto sobre el medio ambiente. Es el tradicional *basurero*, también llamado *botadero* en algunos países latinoamericanos.
- **Vertedero Controlado ó Relleno Sanitario Anaerobio.** En él básicamente los residuos son *depositados, triturados, compactados y cubiertos* con tierra diariamente en una zona acondicionada previamente para este fin. Se debe proceder a la depuración de las aguas filtradas (*lixiviados*) y a la recuperación de los gases generados en el interior del vertedero por la descomposición de los residuos (*biogás*). Dependiendo del grado de densidad que los residuos alcancen, se puede hablar de vertederos de alta densidad (0,9 - 1,0 t/m<sup>3</sup>), media densidad (0,7 - 0,8 t/m<sup>3</sup>) y baja densidad (0,5 - 0,6 t/m<sup>3</sup>).
- **Vertedero Controlado Aerobio.** Es similar al anterior, pero sin el recubrimiento diario de los residuos. Con ello, se logra una fermentación aerobia de los residuos. No se genera biogás.
- **Vertedero de Balas.** Similar al vertedero controlado anaerobio, con la salvedad de que los residuos son previamente empaquetados en fardos de alta densidad (1,1 - 1,2 t/m<sup>3</sup>). Estos son apilados y tapados con tierra posteriormente en el vertedero. Debido a la alta densidad de los residuos, el agua no penetra en ellos totalmente, por lo que se produce una menor generación de biogás y de lixiviado.

En este trabajo entenderemos por *vertedero controlado* el *vertedero controlado anaerobio*. Los *residuos sólidos* pueden clasificarse en: (a) *residuos domésticos*, es decir, los producidos en las viviendas de una población; (b) *residuos municipales*, que incluyen junto a los domésticos los generados en centros comerciales, oficinas, limpieza de parques y jardines, e incluso industriales, siempre que su composición sea similar a la del residuo doméstico; y (c) *residuos industriales*.

Tanto los residuos domésticos como los municipales son admitidos en los vertederos controlados y se engloban bajo el concepto de Residuos Sólidos Urbanos (RSU). Los Residuos Industriales (RI) deben tratarse de forma separada, denominándose al vertedero controlado que los recibe Depósito de Seguridad. El estudio de estas instalaciones no es objeto de este trabajo. Cuando en un vertedero se depositan RSU y RI (co-disposición) se producen efectos indeseables sobre la producción de biogás, por lo que esta práctica debe evitarse.

### 1.3. Importancia de la producción de biogás en los vertederos controlados de RSU

La población mundial supera en la actualidad los 5.000 millones de habitantes. La producción de residuos sólidos urbanos de cada uno de los habitantes de la Tierra oscila ampliamente según el país, entre los valores de 0,4 y 1,2 kg/hab y día.

La Tabla 1 muestra la enorme producción de residuos urbanos a nivel mundial y por continentes.

**Tabla 1.** Producción mundial de Residuos Sólidos Urbanos

<b>Continente</b>	<b>Residuos (10<sup>6</sup> t/año)</b>
África	78
Asia	390
Europa	230
América	390
Australia y Oceanía	14
<b>TOTAL</b>	<b>1.102</b>

Fuente: EPA's Air end Energy Engineering Research Laboratory (AEERL)

La mayor parte de estos residuos son depositados en vertederos incontrolados. Sólo un pequeño porcentaje de los residuos termina en un vertedero controlado, es incinerado o es reintroducido en el ciclo productivo, vía reutilización, reciclaje o compostaje.

Aún en los países occidentales el vertido es la solución más extendida para el tratamiento de los residuos sólidos urbanos, como muestra la Tabla 2. En España, Grecia y Portugal todavía se vierten de forma incontrolada gran parte de los RSU.

No es previsible que la solución del vertido deje de ser mayoritaria a nivel mundial en el medio plazo. Sí se puede esperar una mejora de las condiciones sanitarias de éste, es decir, un incremento del vertido controlado frente al incontrolado.

La Comisión Europea, en la última Propuesta de Directiva sobre vertido de residuos (5 de marzo de 1997), sitúa el vertido muy por detrás de las estrategias de *reducción*, *reciclaje* y *valorización* de los residuos. La propuesta pretende suprimir a medio plazo el vertido de residuos biodegradables, con objeto de reducir las emisiones de lixiviados y de metano. Es importante señalar, no obstante, que las buenas intenciones de la Unión Europea pueden resultar demasiado ambiciosas o sencillamente inadecuadas en países miembros tales como España, Finlandia, Gran Bretaña, Grecia, Irlanda y Portugal, que depositan actualmente más del 80% de sus residuos en vertederos.

**Tabla 2.** Sistemas de tratamiento de los residuos municipales en países occidentales

País	Porcentaje de residuos municipales <sup>(1)</sup> tratados según:			
	Vertedero Controlado	Vertedero Incontrolado	Incineración	Compostaje
Alemania	66	-	32	2
Bélgica	52	-	43	5
Dinamarca	30	-	70	-
España <sup>(2)</sup>	55	30	4	11
Estados Unidos	80	-	10	10
Francia	46	-	40	14
Gran Bretaña	90	-	10	-
Grecia	30	70	-	-
Irlanda	100 <sup>(3)</sup>		-	-
Italia	74 <sup>(3)</sup>		24	2
Noruega	50	-	40	10
Portugal	16	70	-	14

(1) Incluye domésticos, comerciales e industriales asimilables a urbanos

(2) Ministerio de Medio Ambiente, 1993

(3) No distingue entre vertido controlado e incontrolado

(4) Fuente: Gendebien *et al.*, 1982 (reformada)

La adopción de la **incineración** como alternativa al vertido controlado depende de múltiples factores. Desde el punto de vista técnico, el principal punto débil de las incineradoras es la producción de dioxinas, compuestos altamente tóxicos, detectadas en los humos. Por su parte, el vertedero controlado tiene unas exigencias de espacio muy superiores. Esta última causa parece justificar, por ejemplo, que en Japón se incineren más de un 70% de los residuos mientras que en Estados Unidos sólo un 10%.

El vertedero conlleva la inutilización ulterior de un terreno (para fines, por ejemplo, agrícolas). Los impactos ambientales asociados al vertedero, si bien son menores durante su vida activa que los de una incineradora, se prolongan durante mucho más tiempo una vez clausurado. Este punto, actualmente motivo de discusión e incluso reglamentación legal, es de suma importancia a la hora de valorar el coste económico real de ambos sistemas de tratamiento. En la actualidad, en el mejor de los casos el gestor incluye en la tasa de vertido los costes de control de gases y lixiviados durante 30 años después de la clausura del vertedero, período considerado suficiente por Crowhurst y Manchester (1993) y la EPA, "United States Environmental Protection Agency" (1994). La Unión Europea pretende ampliar este período hasta 50 años. Sin embargo, nada permite asegurar que las emisiones no se prolonguen hasta 100 ó 200 años después de la clausura. Mucho menos se tienen en cuenta los costes de seguros frente a accidentes en el período post-clausura, pues ninguna compañía aseguradora puede garantizar una cobertura tan dilatada en el tiempo. El vertedero constituye una herencia no deseable para generaciones futuras y, por tanto, contradice la filosofía del desarrollo sostenible.

Las emisiones de metano a nivel mundial asociadas al vertido de residuos han sido estimadas por la EPA entre 22 y 46 millones de toneladas por año, con una media de 34 millones de toneladas por año, según Thorneloe, S. (Christensen, R. *et al.*, 1996). La Tabla 3 desglosa por continentes estos valores.

**Tabla 3.** Estimación de las emisiones mundiales de metano de vertederos

Continente	Residuos (10 <sup>6</sup> t/año)	Emisiones de CH <sub>4</sub> (10 <sup>9</sup> kg/año)	Emisiones de CH <sub>4</sub> (10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup> N/año)
África	78	1,7	106
Asia	390	5,2	325
Europa	230	6,2	388
América	390	20,0	1.250
Australia y Oceanía	14	0,5	31
<b>TOTAL</b>	<b>1.102</b>	<b>34,0</b>	<b>2.125</b>

Fuente: EPA's Air and Energy Engineering Research Laboratory (AEERL)

Las emisiones de metano de los vertederos suponen entre un 6 y un 13% de las emisiones totales mundiales (antropogénicas y no antropogénicas) según la EPA. El IPCC, "Intergovernmental Panel on Climate Change", situaba este intervalo en un 8 - 20% (1992). Son una de las causas del alarmante incremento de la concentración de metano en la atmósfera, que en 1990 es ya de 1,72 ppm en volumen, ligeramente más del doble que en 1750. El ritmo de crecimiento anual es del 0,9% actualmente. Este crecimiento es debido fundamentalmente a emisiones de origen antropogénico, las cuales constituyen alrededor del 70% del total de emisiones de metano a la atmósfera.

El número total de plantas de revalorización del biogás en la actualidad es de alrededor de 300 según Willumsen, H. (Christensen *et al.*, 1996). El metano revalorizado en la actualidad, 1.250.850.000 m<sup>3</sup>/año, supone un 0,06% de las emisiones totales de metano a la atmósfera desde vertederos. La Tabla 4 resume la producción de metano recuperada en 246 plantas, estudiadas por este autor, a las que hemos añadido las plantas españolas de La Zoreda (Asturias), Artigas (Bilbao) y San Marcos (Guipúzcoa).

Otros autores elevan la cifra de las instalaciones de recuperación de biogás hasta las 481 y el caudal total recuperado a unos 2.575.000 10<sup>3</sup> m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/año (Gendebien *et al.*, 1992). Esta discrepancia puede deberse a que en estas cifras se incluyen también aquellas plantas en que el gas es solamente extraído e incinerado, sin darle ninguna utilidad.

Aunque no todas las plantas de recuperación de biogás utilizan éste como combustible para la generación de energía eléctrica, podemos hacernos una idea de la importancia del biogás como fuente de generación de energía a nivel mundial si imaginamos que los 1.250 millones de m<sup>3</sup>N de CH<sub>4</sub>/año revalorizados a nivel mundial equivalen, supuesto un rendimiento eléctrico del 33%, a una potencia de 444 MW eléctricos, es decir, el equivalente a una central térmica.

**Tabla 4.** Producción de metano y energía en vertederos con sistemas de revalorización.

País	Número de Plantas	10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /año	TEP/año <sup>(1)</sup>	GWh/año
EE.UU.	79	843.570	746.512	8419
Alemania	80	149.298	132.000	1.490
GBR	27	126.653	112.000	1.264
Holanda	10	19.539	17.250	195
Canadá	9	6.520	5.763	65
Suecia	8	12.040	10.640	120
Italia	7	11.322	10.000	113
Dinamarca	5	4.108	3.640	41
Francia	5	4.709	4.150	47
España	3	21.900	19.300	206
Otras <sup>(2)</sup>	15	51.191	45.310	511
<b>TOTAL</b>	<b>248</b>	<b>1.250.850</b>	<b>1.116.565</b>	<b>12.471</b>

(1) TEP: Tonelada Equivalente de Petróleo

(2) Suecia, 4; Brasil, 3; Australia, 2; Noruega, 2; Austria, 1; Sudáfrica, 1; India, 1; Japón, 1

Fuente: Willumsen, H.C. (Christensen *et al.*, 1996)

El vertedero de La Zoreda (Asturias), con sus instalaciones de aproximadamente 4.500 m<sup>3</sup>N/h de biogás al 50% de metano, aporta aproximadamente un 1,6% del total del metano revalorizado a nivel mundial.



## 1.4. Génesis y objetivos del trabajo

### 1.4.1. Génesis del trabajo

Este trabajo es resultado de la experiencia acumulada a través de la participación en distintos proyectos con la empresa **COGERSA, S.A.**, *Compañía para la Gestión de los Residuos Sólidos en Asturias*, y el **Área de Tecnología del Medio Ambiente** del *Dpto. de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente* de la **Universidad de Oviedo** (Asturias).

Los trabajos de investigación comenzaron en octubre de 1993, con la firma, por parte de **COGERSA, S.A.** y los departamentos de la **Universidad de Oviedo** de **Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente** (Área de Tecnología del Medio Ambiente) del proyecto "*SISTEMA DE CAPTACIÓN DE BIOGÁS: Diseño de Redes y Control del Biogás Generado en Vertederos de RSU*".

En Febrero de 1995 fue aprobado un proyecto por 3 años dentro del *II Plan Regional de Investigación del Principado de Asturias* (**FICYT**, contrato nº FC-95-PA-MAS94-03) bajo el título "*Sistema de Control Manual de Extracción de Biogás de Redes de Captación para Vertederos Controlados de Residuos Sólidos Urbanos*" en el que participan **COGERSA, S.A.** y el Área de Tecnología del Medio Ambiente.

Durante los años 95 y 96 se participó en el programa *APERTURA* de la **Unión Europea**, realizando estudios sobre la "*Producción de Biogás en el Vertedero de Bratovo (Burgas, Bulgaria)*".

A partir de Mayo de 1996, y con la empresa **ZOREDA INTERNACIONAL, S.A.**, participada por **COGERSA, S.A.**, **DURO FELGUERA** y **TECMED**, se han realizado, como tareas más importantes hasta la fecha, una asesoría, financiada por la **Agencia Española de Cooperación Internacional**, a la Dirección Metropolitana de Aseo de la República de Panamá sobre la gestión de los residuos sólidos; la redacción del "Proyecto de Ampliación de la Red de Captación de Biogás" del vertedero de **COGERSA, S.A.**; y la preparación de un "*Estudio sobre la Generación de Biogás en el Relleno Sanitario de Doña Juana (Bogotá, Colombia)*".

Estas actividades han permitido conocer distintas instalaciones de vertido controlado de residuos:

1. La Zoreda (Asturias)
2. Cerceda (Galicia)
3. Aranguren (Pamplona)
4. Soignolles en Brie (Metz, Francia)
5. Mont St Sébastien (París, Francia)
6. Bratovo (Burgas, Bulgaria)
7. Curva de Rodas (Medellín, Colombia)
8. Doña Juana (Santa Fe de Bogotá, Colombia)
9. Cerro Patacón (Área Metropolitana de Panamá, Panamá)

10. Vertedero de Dunsink (Dublín, Irlanda)
11. Vertedero de Ballealy (Dublín, Irlanda)

Asimismo, se ha asistido a los siguientes foros internacionales:

- *"Calidad, Medio Ambiente y Gestión de Residuos en una sociedad sostenible"* VI Congreso Iberoamericano de Residuos Sólidos, ATEGRUS, Madrid, 1996
- *"Landfill Gas Management"* International Training Seminar, CISA & University of Cagliari, Sardinia, Italia, 1996
- *"Curso Superior de Diseño de Vertederos"* CISA & Instituto Tecnológico de Ingeniería Ambiental, Madrid, 1997

Este trabajo ha sido precedido por distintas publicaciones, comunicaciones e informes que se enumeran a continuación y que también han sido recogidos en la Bibliografía.

### **Informes y Proyectos**

1. *"Sistema de Captación de Biogás: Diseño de redes y control del biogás generado en vertederos controlados de RSU"* Fernández, E.; Martín, S. y Sastre, H. Informe Técnico, COGERSA, S.A., 1994
2. *"Tecnología de Control y Aprovechamiento Energético de Biogás en Vertederos Controlados de Residuos Sólidos Urbanos"* Proyecto Fin de Carrera, ETSIIG, 1995
3. *"Separata para Captación y Regulación de Biogás Procedente del Depósito Controlado de COGERSA"* Fernández, E.; Martín, S.; Sastre, H. y Fernández, S. Proyecto de Ingeniería para la Consejería de Industria, COGERSA, S.A. y Proteínas y Grasas del Principado, S.A., 1995
4. *"Extractor Portátil de Biogás"* Fernández, E.; Martín, S. y Sastre, S. Informe Técnico, COGERSA, S.A., 1995
5. *"Evaluación de la Producción de Biogás en el Vertedero de Bratovo (Burgas, Bulgaria)"* Martín, S.; Campos, F.; Sastre, H. Informe Técnico para el programa APERTURA con Bulgaria de la Unión Europea, COGERSA, S.A., 1995
6. *"Vertederos Controlados de Residuos Sólidos Urbanos. Análisis y Determinación de la Producción de la Biogás"* Martín, S. Trabajo de Investigación, Dpto. de Ing. Química y Tecnología del M.A., Universidad de Oviedo, España, 1996
7. *"Sistema de Captación, Aspiración y Control de Biogás en el Vertedero de Bratovo (Burgas, Bulgaria)"* Martín, S.; Fernández, S.; Sastre, H. Proyecto Técnico para el programa APERTURA con Bulgaria de la Unión Europea, COGERSA, S.A., 1996
8. *"Gestión de los Residuos Sólidos en el Relleno Sanitario de Cerro Patacón y Establecimiento de una Red de Estaciones de Transferencia"* Martín, S. Asesoría para la Dirección Metropolitana de Aseo de Panamá, financiada por la Agencia Española de Cooperación Internacional, ZOREDIA INTERNACIONAL, S.A., 1996
9. *"Ampliación de la Red de Captación de Biogás en el Vertedero de La Zoreda"* Martín, S. Proyecto Técnico para la empresa COGERSA, S.A. ZOREDIA INTERNACIONAL, S.A., 1997

### Artículos Técnicos

1. "Digestores Anaerobios de Residuos Pecuarios" Martín, S., García, J.A. y Corral, J.L., **DYNA** (Órgano Oficial de la Federación de Asociaciones de Ingenieros Industriales de España), 7, 50-55, 1996
2. "Aprovechamiento Energético del Biogás. El caso de COGERSA" Sastre, H., Martín, S. y Fernández, S., **DYNA**, 2, 11-14, 1997
3. "Modelización Matemática del Proceso Físico de Migración del Biogás en Vertederos Controlados de RSU", Martín, S.; Marañón, E. y Sastre, H., **Residuos**, 36, 52-56, 1997
4. "Landfill Gas Extraction Technology" Martín, S., Marañón, E. y Sastre, H. **Bioresource Technology**, (aceptada febrero 1997)
5. "Evaluation of Biogas Production from the Landfill of Bratovo (Burgas, Bulgaria)" Martín, S.; Campos, F.; Sastre, H. y Fernández, S. **Hungarian Journal of Industrial Chemistry**, (aceptada mayo 1997)

### Comunicaciones presentadas a Congresos

1. "Captaciones de Biogás en Vertederos de RSU: Modelización Matemática" Martín, S.; Fernández, E.; Marañón, E.; Sastre, H. III Congreso Internacional de Química de la ANQUE, Tenerife, 1994
2. "Production Potential of Biogas in Sanitary Landfills" Martín, S.; Fernández, E.; Marañón, E.; Sastre, H. Fifth International Landfill Symposium SARDINIA '95, Italia, 1995
3. "Biogas Manually Controlled Extracting System at COGERSA Landfill" Martín, S.; Fernández, E.; Marañón, E.; y Sastre, H. III International Congress Energy, Environment and Technological Innovations, Caracas (Venezuela), 1995
4. "Biogas End-Uses at COGERSA Sanitary Landfill" Martín, S.; Fernández, E.; Marañón, E. y Sastre, H. III International Congress Energy, Environment and Technological Innovations, Caracas (Venezuela), 1995
5. "Modelización Matemática del Proceso Físico de Migración del Biogás en Vertederos de RSU" Martín, S.; Marañón, E. y Sastre, H. VI Congreso Iberoamericano de Residuos Sólidos, ATEGRUS, Madrid, 1996

#### 1.42. Objetivos del trabajo

Este trabajo estudia la **generación y recuperación del biogás en los vertederos controlados de residuos sólidos urbanos (RSU)**. Se pretenden conseguir los siguientes objetivos:

- **Servir de iniciación** sobre el estado actual de la investigación y de la tecnología en la problemática de la generación, captación y aprovechamiento del biogás en los vertederos controlados de RSU
- **Definir ensayos** que permitan la comparación entre distintos vertederos y la modelización de fenómenos

- **Elaborar modelos** de cálculo sobre la generación del biogás y su recuperación
- **Definir métodos de trabajo** prácticos para el estudio de los vertederos controlados bajo la perspectiva de la generación de biogás
- **Proponer un sistema de control** de la extracción de biogás que garantice la seguridad de las instalaciones y la posibilidad de su aprovechamiento energético

Se ha estructurado el trabajo de forma secuencial, comenzando con el proceso de la **generación** de biogás en el vertedero, para continuar con el estudio de los movimientos o **migraciones** del biogás dentro del vertedero y la **captación** por medio de pozos. En los últimos capítulos se propone una metodología para la **determinación de la producción de biogás** en un vertedero controlado y se define un método de **control de extracción de biogás** en una instalación de recuperación. En un apartado de anexos se resumen los conceptos fundamentales de la problemática del **aprovechamiento energético del biogás**.

Los contenidos experimentales de este trabajo corresponden a los vertederos de La Zoreda (Asturias) y Bratovo (Burgas, Bulgaria).

La adopción de esta estructura secuencial en la exposición de los resultados de este trabajo pudiera parecer que desvirtúa en algún caso la pureza del método seguido en la investigación. Sin embargo, se ha considerado que sólo de esta manera se podía transmitir de forma didáctica la multitud de factores valorados hasta llegar a la definición final de ensayos y modelos, y a su aplicación práctica.

Para comprender la amplitud de los temas que se han tratado, basta reflexionar sobre lo alejados que están en nuestra cultura técnica los conceptos del *basurero* y del *digestor anaerobio de RSU*. El reto ha sido ese: caracterizar al *vertedero* como una *instalación de digestión anaerobia o metanización*.

## **2. GENERACIÓN DE BIOGÁS EN VERTEDEROS CONTROLADOS DE RSU: ANÁLISIS DE FACTORES Y MODELIZACIÓN**

---

## 2. GENERACIÓN DE BIOGÁS EN VERTEDEROS CONTROLADOS DE RSU: ANÁLISIS DE FACTORES Y MODELIZACIÓN

### 2.1. Etapas de la degradación anaerobia

Debido a la cobertura diaria con tierra y materiales inertes de los RSU en los vertederos controlados, la materia orgánica contenida en los mismos se degrada de forma anaerobia. Como resultado de esta degradación, se desprende una mezcla gaseosa constituida fundamentalmente por metano y oxígeno. Los microorganismos responsables de esta transformación forman un ecosistema complejo, donde los residuos de la acción de unos son aprovechados como nutrientes por otros.

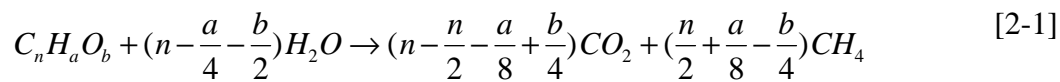
Se distinguen, de forma general, tres etapas en la degradación de la materia orgánica dentro de un vertedero, tal y como muestra la Figura 1:

**1ª Etapa.** Los compuestos orgánicos son HIDROLIZADOS y FERMENTADOS a ácidos grasos, alcoholes, hidrógeno y dióxido de carbono.

**2ª Etapa.** Las bacterias ACETOGÉNICAS generan ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono.

**3ª Etapa.** Las bacterias METANOGÉNICAS generan metano.

Estas tres etapas se resumen en la siguiente reacción general:



La **hidrólisis** es el paso crítico del proceso, que limita la velocidad de degradación de los residuos y la generación de metano, pues los microorganismos necesitan que sus nutrientes estén disueltos en agua para actuar. Es llevada a cabo por **bacterias fermentativas** que generan enzimas extra-celulares. Estas bacterias son un amplio y heterogéneo grupo que incluye bacterias anaerobias y bacterias anaerobias - facultativas.

Las **bacterias acetogénicas**, responsables de la segunda etapa, también constituyen un amplio y heterogéneo grupo. Generan ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono cuando el ácido graso volátil que consumen contiene un número impar de átomos de carbono. Estas bacterias pueden también consumir compuestos aromáticos que contengan oxígeno (p.ej., ácido benzoico y fenoles), pero no hidrocarburos aromáticos (p.ej. benceno y tolueno).

Las **bacterias metanogénicas**, responsables de la tercera etapa, son obligatoriamente anaerobias y requieren potenciales REDOX muy bajos. Un grupo, las **hidrogenofílicas**, convierten hidrógeno y dióxido de carbono en metano, mientras que otro grupo, las **acetofílicas**, convierten principalmente ácido acético en metano y dióxido de carbono. Las bacterias metanogénicas también pueden convertir ácido fórmico y metanol. La conversión de ácido acético en metano es considerada la fuente más importante de metano.

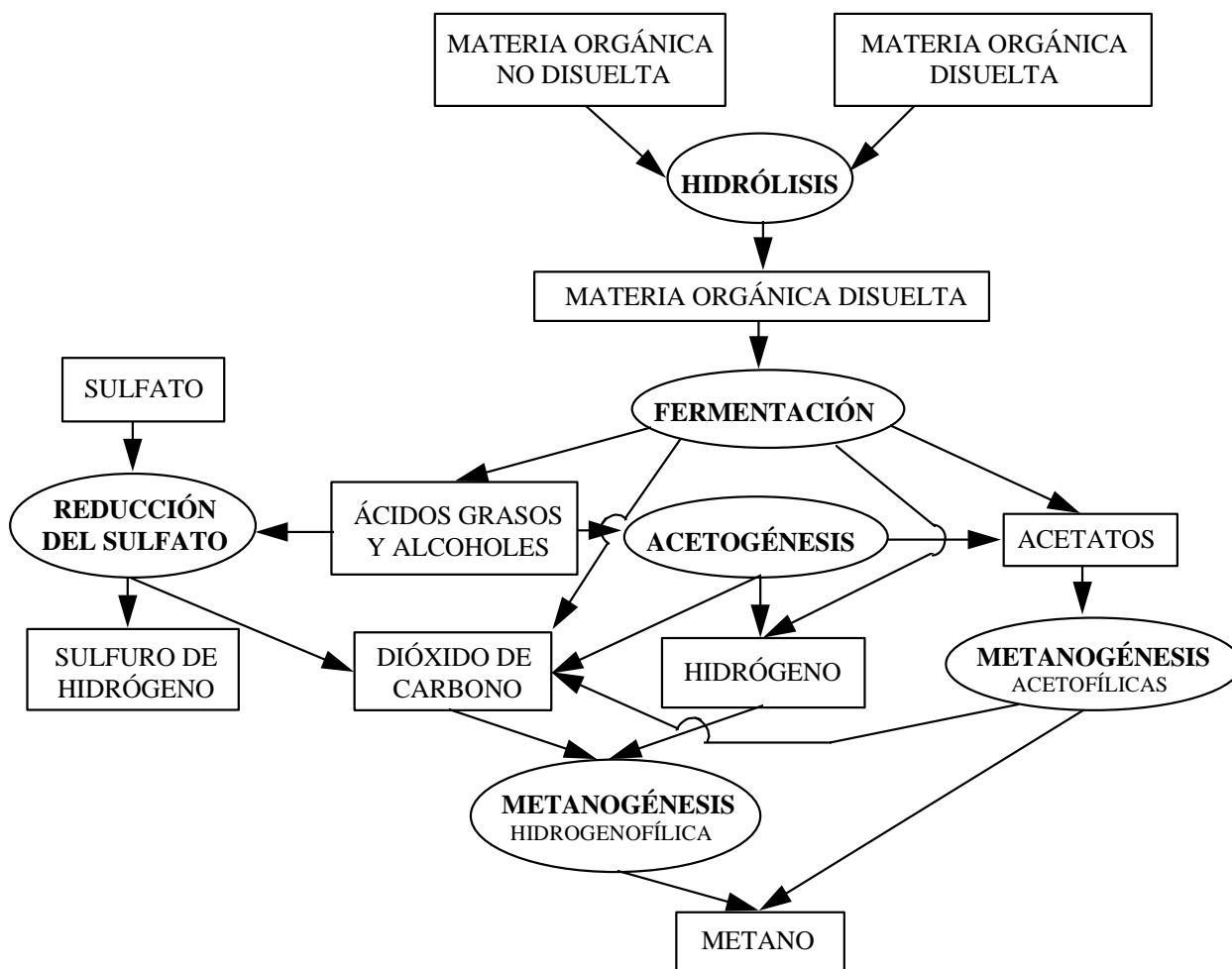


Fig. 1. Etapas de la degradación anaerobia de los RSU

Finalmente, las **bacterias sulfato-reductoras** juegan un importante papel, similar al de las metanogénicas, ya que los sulfatos son componentes mayoritarios en muchos tipos de residuos (de construcción, de incineradoras, etc.). Las bacterias sulfato-reductoras son anaerobias siempre y pueden transformar hidrógeno, ácido acético y ácidos grasos altamente volátiles durante la reducción de los sulfatos. El carbono orgánico se oxida siempre a dióxido de carbono de forma opuesta a lo que ocurre con las bacterias metanogénicas. Una actividad alta de las bacterias sulfato-reductoras puede entonces hacer decrecer la cantidad de productos orgánicos disponibles para la generación de metano.

En la Tabla 5 se resumen las principales reacciones de conversión que tienen lugar en el ecosistema anaerobio.

**Tabla 5.** Principales reacciones de conversión en el ecosistema anaerobio

---

<b>Bacterias Fermentativas</b>		
$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O$	→	$2CH_3COOH + 4H_2 + 2CO_2$
$C_6H_{12}O_6$	→	$CH_3C_2H_4COOH + 2H_2 + 2CO_2$
$C_6H_{12}O_6$	→	$2CH_3CH_2OH + 2CO_2$
<b>Bacterias Acetogénicas</b>		
$CH_3CH_2COOH + 2H_2O$	→	$CH_3COOH + CO_2 + 3H_2$
$CH_3C_2H_4COOH + 2H_2O$	→	$2CH_3COOH + 2H_2$
$CH_3CH_2OH + H_2O$	→	$CH_3COOH + 2H_2$
$C_6H_5COOH + 6H_2O$	→	$3CH_3COOH + CO_2 + 3H_2$
<b>Bacterias Metanogénicas</b>		
$4H_2 + CO_2$	→	$CH_4 + 2H_2O$
$CH_3COOH$	→	$CH_4 + CO_2$
$HCOOH + 3H_2$	→	$CH_4 + 2H_2O$
$CH_3OH + H_2$	→	$CH_4 + H_2O$
<b>Bacterias Sulfato-Reductoras</b>		
$4H_2 + SO_4^{-2} + H^+$	→	$HS^- + 4H_2O$
$CH_3COOH + SO_4^{-2}$	→	$CO_2 + HS^- + HCO_3^- + H_2O$
$2CH_3C_2H_4COOH + SO_4^{-2} + H^+$	→	$4CH_3COOH + HS^-$

---

HCOOH, ácido fórmico; CH<sub>3</sub>COOH, ácido acético; CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>COOH, ácido propiónico; CH<sub>3</sub>C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>COOH, ácido butírico; C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>, glucosa; CH<sub>3</sub>OH, metanol; CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>OH, etanol; C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>COOH, ácido benzoico; CH<sub>4</sub>, metano; CO<sub>2</sub>, dióxido de carbono; H<sub>2</sub>, hidrógeno; SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, sulfato; HS<sup>-</sup>, sulfuro de hidrógeno; HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, carbonato de hidrógeno; H<sup>+</sup>, protón; H<sub>2</sub>O, agua



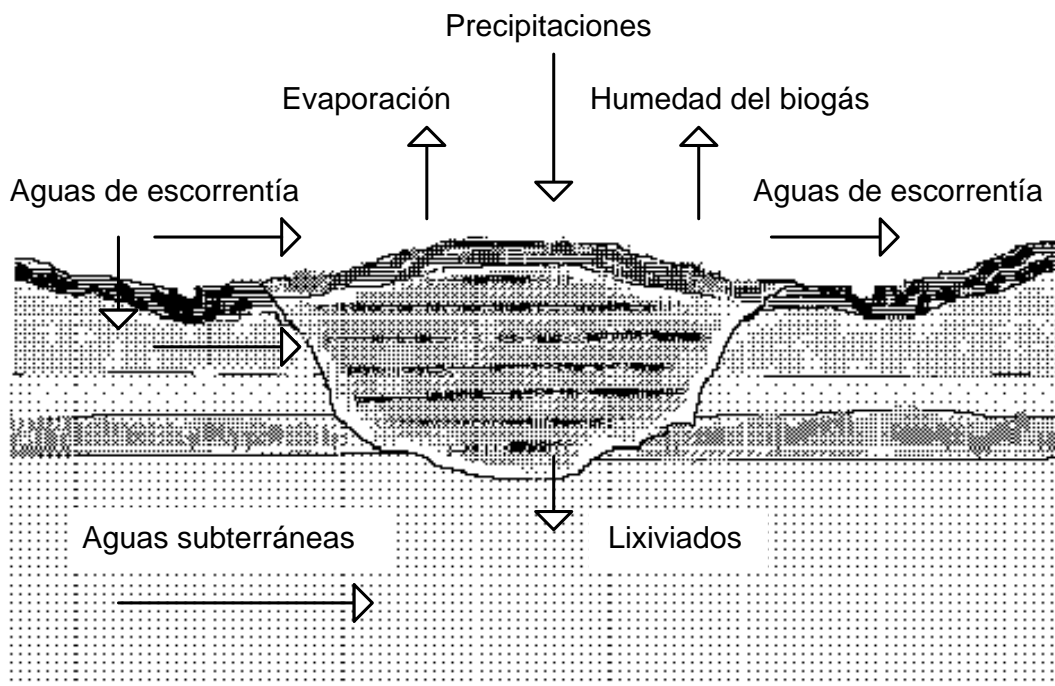
## 2.2. Relación entre el biogás y el lixiviado

La degradación anaerobia de la materia orgánica contenida en los RSU sólo se produce, como se ha comentado en el apartado anterior, cuando los compuestos orgánicos que la constituyen están disueltos en agua. Por ello, existe una íntima relación entre el lixiviado producido en un vertedero y la generación de biogás.

### 2.2.1. Origen de los lixiviados

Como muestra la Figura 2, el agua puede penetrar en el vertedero de distintas formas: (a) como *humedad de los residuos* mismos; (b) como agua de *lluvia* caída directamente sobre el vertedero; (c) como *aguas de escorrentía* desde terrenos aledaños al vertedero; (d) y como *aguas subterráneas* filtradas a través del fondo y laterales del vaso de vertido. Las aguas de lluvia son el mayor aporte.

Un kilogramo de residuos secos puede absorber entre 0,09 y 0,27 litros de agua. Incluso esos valores se pueden incrementar hasta 0,40 - 0,65 litros (Gendebien *et al.*, 1992). Estos valores son superados en el vertedero, escapando el exceso de agua de distintas formas. Una parte lo hace con el biogás, en forma de humedad. El resto lo hace en forma de lixiviado, llevando en disolución metabolitos producto de la actividad microbiana en el vertedero.



**Fig. 2.** Entradas y salidas de agua en un vertedero

### 2.2.2. Composición del lixiviado

El lixiviado es una mezcla compleja y variable de compuestos orgánicos e inorgánicos solubles, microorganismos y sólidos suspendidos en un medio acuoso. La composición y caudal de lixiviado varían no sólo entre vertederos distintos sino también con la edad del vertedero. Los parámetros que caracterizan un lixiviado son *físicos*, como la concentración de sólidos suspendidos, pH y conductividad; *químicos*, como las concentraciones de materia orgánica degradable química o biológicamente, nitratos, fosfatos, cloruros, metales; y *biológicos*, según el tipo y cantidad de microorganismos presentes. En la Tabla 6 se muestran los resultados de los análisis del lixiviado del vertedero de La Zoreda (Asturias) a su llegada a la planta de tratamiento en el año 1988 y en el año 1995. El vertedero de La Zoreda inició su actividad en octubre de 1984.

**Tabla 6.** Características del lixiviado del vertedero de La Zoreda

	1988 (1)	1995 (2)
pH	6,4 - 6,5	8,3
DBO <sub>5</sub>	36.000 - 48.000 mg/l	2.000 mg/l
DQO	77.000 - 81.000 mg/l	3.000 mg/l
Nitrógeno Amoniacal	1.600 - 2.059 mg/l	1.900 mg/l
Sólidos en Suspensión	135 - 1.500 mg/l	250 mg/l
Fosfato	0,08 - 1,9 mg/l	1,9 mg/l
Metales pesados	0,46 - 0,52 mg/l	0,46 mg/l

(1) COGERSA, S.A. (1988), reformada

(2) Sastre *et al.* (1997)

Las variaciones en la composición de los lixiviados se explican como consecuencia de la distinta **composición de los residuos vertidos** y la **edad del vertedero**. Lixiviados jóvenes, de entre 2 y 5 años de antigüedad, se caracterizan por una alta relación entre Demanda Bioquímica de Oxígeno y Demanda Química de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>/DQO > 0,3), un bajo pH (menor de 6,5); una alta carga orgánica, debida a los ácidos grasos volátiles; y una baja concentración de metales pesados. En lixiviados viejos la relación DBO<sub>5</sub>/DQO, que indica la biodegradabilidad del lixiviado, es menor de 0,1; el pH es mayor de 7,5; y la carga orgánica desciende debido a la ausencia de ácidos grasos volátiles.

Concentraciones altas de metales pesados (Fe, Zn, Cu, Cd, Pb, Cr (III & IV), Hg, Ni, Ag) así como de nitrógeno amoniacal y de algunos compuestos orgánicos, pueden ser tóxicas o inhibir el crecimiento de microorganismos. Por lo tanto, si se detectaran en el lixiviado, pueden estar impidiendo la generación de biogás.

### 2.2.3. Factores que afectan la producción de lixiviados

La cantidad y composición del lixiviado depende, entre otros factores, de la *composición y densidad de los residuos, edad del vertedero, hidrología del lugar, climatología y régimen de lluvias*. La cantidad de lixiviado se incrementa cuando los lodos de depuradoras de aguas residuales urbanas se depositan en el vertedero y disminuye cuando los residuos son compactados en fardos de alta densidad. Es decir, también *la gestión del vertedero* influye en la generación de lixiviados.

El balance hidrológico de un vertedero controlado se resume en la siguiente fórmula:

$$L = I - E - a R \quad [2-2]$$

donde:

- L, producción de lixiviado, (m<sup>3</sup>/año)
- I, entrada total de líquidos, (m<sup>3</sup>/año)
- E, evaporación y transpiración, (m<sup>3</sup>/año)
- a, capacidad de absorción de la humedad por parte de los residuos, (m<sup>3</sup>/t)
- R, vertido de residuos (t/año)

La entrada total de líquidos *I* depende del régimen de lluvias y de la superficie del vertedero, de las características de la cobertura diaria de los residuos y de la entrada de corrientes superficiales o subterráneas de agua, tal y como refleja la siguiente fórmula:

$$I = S P + h R + Q + G \quad [2-3]$$

donde:

- S, superficie del vertedero (m<sup>2</sup>)
- P, régimen de precipitaciones (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> y año)
- h, humedad de los residuos (m<sup>3</sup>/t)
- R, vertido anual de residuos (t/año)
- Q, caudal de aguas de escorrentía (m<sup>3</sup>/año)
- G, caudal de aguas subterráneas (m<sup>3</sup>/año)

En general, la producción de lixiviado es aproximadamente un 10% del total de aguas lluvias caídas en el vertedero. Mediante canalizaciones perimetrales puede evitarse la entrada de aguas de escorrentía. Asimismo, un adecuado sellado del vaso de vertido evita la penetración de aguas subterráneas. El problema de la discontinuidad en la producción de lixiviados, por su relación con las precipitaciones, hace necesaria la creación de lagunas para el almacenamiento de los lixiviados antes de su tratamiento.

### 2.2.4. Interacción entre el lixiviado y la producción de biogás

Como ya se ha comentado, la actividad de los microorganismos anaerobios debe tener lugar en un medio acuoso, donde se disuelven los compuestos orgánicos antes de ser metabolizados. Sin duda, el lixiviado constituye además el canal a través del cual los microorganismos responsables de la generación del biogás colonizan todas las zonas del vertedero.

La presencia de agua en el vertedero es también positiva porque diluye posibles concentraciones localmente altas de compuestos tóxicos; regula el pH por intercambio de sustancias buffer; y facilita la difusión de nutrientes (Pacey y De Gier, 1986). La velocidad de degradación de los residuos se ve favorecida por el mayor contenido en humedad de los mismos. Experiencias en laboratorio muestran un aumento exponencial de la producción de metano al incrementar el contenido en humedad de los residuos entre un 25 y un 60% (Christensen *et al.*, 1996)

Los efectos de la *recirculación de lixiviados* sobre el vertedero en la generación de biogás han sido estudiados a pequeña y gran escala en plantas de laboratorio. Es un método de pre-tratamiento del lixiviado y, a la vez, incrementa la generación de biogás en el vertedero (Stegmann y Spendlin, 1986; Rao y Suflita, 1993; Pohland y Al-Yousfi, 1995). El vertido de lodos de depuradora también es, en principio, beneficioso para la generación de biogás, por su alto contenido orgánico y su alto nivel de humedad.

No obstante, la generación de lixiviados es uno de los mayores problemas asociados al vertido de RSU. Por ello, no tiene sentido incrementar artificialmente su producción, aumentando las entradas de agua, aunque redunde en una mayor generación de biogás. Sí tiene sentido, por contra, potenciar dentro de unos límites la capacidad de retención de agua del vertedero, pues de este modo éste actúa como un reactor anaerobio más eficiente, genera más biogás y produce un lixiviado de menor carga orgánica. En cualquier caso, se debe evitar la inundación del vertedero, pues entraña graves riesgos de inestabilidad en taludes e imposibilita técnicamente la recuperación controlada del biogás.

Es también importante señalar que el biogás se disuelve en el lixiviado cuando la presión es suficientemente alta. El biogás puede entonces abandonar el vertedero, disuelto en el lixiviado, y reaparecer como gas al descender de nuevo la presión. Este aspecto ha de ser considerado para prevenir riesgos en el entorno de un vertedero (EPA, 1994; UK Department of the Environment, 1994).

### 2.3. Impacto ambiental de la generación de biogás en los vertederos

La generación de biogás es el segundo problema medioambiental en importancia, después de la producción de lixiviados, derivado del vertido de RSU. La generación de biogás ocasiona los siguientes impactos:

1. Afecta a la Seguridad e Higiene de trabajadores y población aledaña al vertedero
2. Influye en el desarrollo de la vegetación en el vertedero
3. Las emisiones de biogás consideradas a escala planetaria tienen una incidencia negativa sobre el medio ambiente global

A continuación desarrollaremos brevemente estos tres puntos. Cabe añadir que el biogás también contribuye a la contaminación de aguas subterráneas cuando, en vertederos inadecuadamente impermeabilizados, se filtra disuelto en el lixiviado.

#### 2.3.1. Efectos sobre la Seguridad e Higiene de los trabajadores y la población aledaña

Tradicionalmente, la población aledaña a los vertederos y los propios trabajadores del mismo limitan sus quejas a los malos olores asociados a las emisiones de biogás en el vertedero. Sin embargo, la generación de biogás en el vertedero es un problema mucho más grave y debe ser objeto de especial tratamiento debido a:

- Los riesgos de **incendio** y **explosión** que acarrea
- Los **efectos contra la salud** de algunos de sus componentes

El metano, principal constituyente del biogás, es **inflamable** y, en determinadas proporciones con el oxígeno del aire, es **explosivo**. Otros gases presentes en el biogás en menores proporciones, como el hidrógeno, comparten estas propiedades. Existe riesgo de accidentes incluso para la población vecina al vertedero debido a que, en ausencia de las adecuadas medidas preventivas, el biogás es capaz de migrar a través del terreno a cientos de metros fuera del vertedero (Gendebien *et al.*, 1986; EPA, 1994; UK Department of the Environment, 1994).

Existen casos documentados de explosiones en edificios dentro y en las inmediaciones de vertederos. Cuando la bolsa de gas se acumula en el interior mismo del vertedero, una explosión puede originar una avalancha incontrolada de residuos por pérdida de estabilidad de los taludes. Tal parece haber sido la causa del grave accidente ocurrido en el vertedero de Urmaraniye (Estambul, Turquía) en 1993.

La acumulación de metano en un recinto cerrado, así como la de dióxido de carbono, segundo componente en importancia del biogás, desplaza al oxígeno del aire, habiéndose producido accidentes por **asfixia** debido a ello.

Gran parte de los compuestos minoritarios del biogás, cuya proporción total es menor del 1%, son peligrosos para la salud por su carácter **tóxico**. Incluso algunos de ellos son cancerígenos. Especial atención merecen los compuestos orgánicos volátiles. Aunque afortunadamente las concentraciones de estos compuestos son muy bajas, no es prudente suponer que la dilución del biogás en la atmósfera garantice la salud de la población cercana (Christensen *et al.*, 1996). Existe, además, la posibilidad de formación de dioxinas y furanos en las antorchas de incineración así como en los gases de escape de motores alimentados con biogás.

### 2.3.2. Efectos sobre la vegetación

Existen numerosos ejemplos de daños en la vegetación debidos a la generación de biogás en los vertederos (Gendebien *et al.*, 1992). Estos efectos han sido observados tanto en el propio vertedero como en terrenos aledaños. No obstante, cuando así ha ocurrido, se constata también la carencia de sistemas de extracción del biogás y/o deficiencias importantes en el sellado final del vertedero. Una corrección de estas deficiencias, acompañada de una correcta repoblación con plantas adecuadas, solucionan estos problemas.

Los daños en la vegetación se manifiestan como clorosis, defoliación y pérdida de ramaje. Estos síntomas no son exclusivos del biogás, también pueden ser debidos a sequías, exceso de sales en el suelo y, en el caso de la clorosis, carencia de nutrientes. La presencia de biogás también se pone de manifiesto con el crecimiento enano de la vegetación, desarrollo superficial de las raíces y, en casos severos, muerte de la vegetación.

Debido a la diferente absorción de la radiación infrarroja por parte de la vegetación enferma frente a la sana, es posible determinar zonas de alta emisión de biogás mediante fotografía aérea por infrarrojos (Crowhurst y Manchester, 1993).

Los efectos del biogás en las plantas están asociados con la migración del biogás en la zona de la raíz y el desplazamiento del aire de esta zona. Ello conlleva en unos casos la aparición de condiciones anóxicas y, con ello, la asfixia de la planta; otras veces su intoxicación, por la presencia de gases tóxicos, y, finalmente, en otros casos, problemas derivados de un cambio en la composición del suelo por variaciones del pH.

- **Asfixia.** Ocasionada por la carencia de suficiente oxígeno en la raíz de la planta, bien por desplazamiento del aire debido a la corriente de biogás, o bien por la oxidación microbiana del metano a dióxido de carbono. Aunque algunas plantas, leñosas en general, requieren de un 12-14% de oxígeno en el suelo, suele ser suficiente con un 5-10% habitualmente. Existe pues un amplio margen de tolerancia entre las distintas especies, lo que puede ser utilizado en la selección de las mismas. Como consecuencia de la necesidad de oxígeno, las plantas tienden a desarrollar sus raíces superficialmente y no en profundidad, aún cuando no sea su desarrollo habitual. Ello conlleva un acceso limitado al agua y nutrientes, lo que hace que la planta sea más débil y proclive a perecer en temporadas de sequía. Los árboles son también menos resistentes a fuertes vientos.

- **Metano.** El metano no se considera tóxico para las plantas. Bajas concentraciones (<5%) son incluso beneficiosas, aunque a más altas concentraciones (>45%) se observen ya efectos negativos. El metano causa problemas indirectamente, al ser oxidado biológicamente, con el consiguiente consumo de oxígeno, incremento de dióxido de carbono e incluso incremento de la temperatura del suelo.
- **Dióxido de carbono.** El porcentaje de dióxido de carbono del aire retenido en un suelo normal es bajo, apenas el originado por la respiración de la planta y la degradación de la materia orgánica del suelo. Aunque algunas plantas soportan porcentajes de hasta el 5% de dióxido de carbono en el suelo, la mayoría se ven afectadas mucho antes. Indirectamente, además, la presencia de dióxido de carbono altera el pH del suelo y, con ello, su composición.

Deben tenerse en cuenta también otros efectos derivados de la ausencia de oxígeno en el suelo. Nos referimos a la imposibilidad de sobrevivir de determinadas especies que tienen su medio en el suelo y que influyen en el desarrollo de las plantas. Así, por ejemplo, lombrices de tierra y hormigas son expulsados de su medio por el biogás. Debido a que su actividad tiene en general efectos positivos sobre la vegetación, pues airean el suelo, el efecto es doblemente negativo. Otras especies, como los topos, tampoco se adaptan a este medioambiente, en este caso afortunadamente para el desarrollo de la vegetación.

### 2.3.3. Efectos sobre el Medio Ambiente global

Como se ha comentado en el Apartado 1.3 , se calcula que un 70% de la emisiones de metano a la atmósfera son causadas por la actividad humana. Entre un 6 y un 13% del total de emisiones de metano tiene su origen en los vertederos. Estas emisiones de metano repercuten en el calentamiento global de la Tierra, conocido como **Efecto Invernadero** (Yasuda, K., 1996). El metano es unas 20 veces más eficaz atrapando calor en la atmósfera que el dióxido de carbono (USEPA, 1993). Comparado con el CO<sub>2</sub> y tomando un horizonte temporal de 100 años, el CH<sub>4</sub> tiene un potencial 11 veces superior sobre el calentamiento global. Es decir, la emisión de una sola tonelada de metano a la atmósfera es tan negativa como la emisión de 11 toneladas de dióxido de carbono. Basándose en estas consideraciones, la US Environmental Protection Agency estima el peso de los distintos gases invernadero con origen antropogénico como se refleja en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Contribución relativa al Efecto Invernadero de distintos gases antropogénicos

Dióxido de Carbono	66%
Metano	18%
CFC	11%
Óxidos de Nitrógeno	5%

Fuente: USEPA, 1993

Algunos de los compuestos minoritarios presentes en el biogás, especialmente los clorofluorocarbonos (CFC) tienen una repercusión negativa tanto en el Efecto Invernadero como en la destrucción de la capa de ozono (Brown y Maunder, 1994; Coops *et al.*, 1995).

## 2.4. Composición del biogás

En este apartado se analizan distintos aspectos relativos a la composición del biogás. Inicialmente, se explican las causas de la variabilidad de la composición del biogás entre distintos vertederos y aún entre distintas zonas de un vertedero. A continuación se definen las características e importancia de los distintos componentes del biogás, así como cuáles son sus concentraciones habituales. Finalmente, se explican algunos aspectos relativos a la medida de la composición del biogás, se propone el Ensayo Biogás / Gas de Vertedero y se resumen los resultados obtenidos en la caracterización del biogás tanto en el vertedero de La Zoreda (Asturias) como en el de Bratovo (Bulgaria).

### 2.4.1. Evolución de la composición con el tiempo

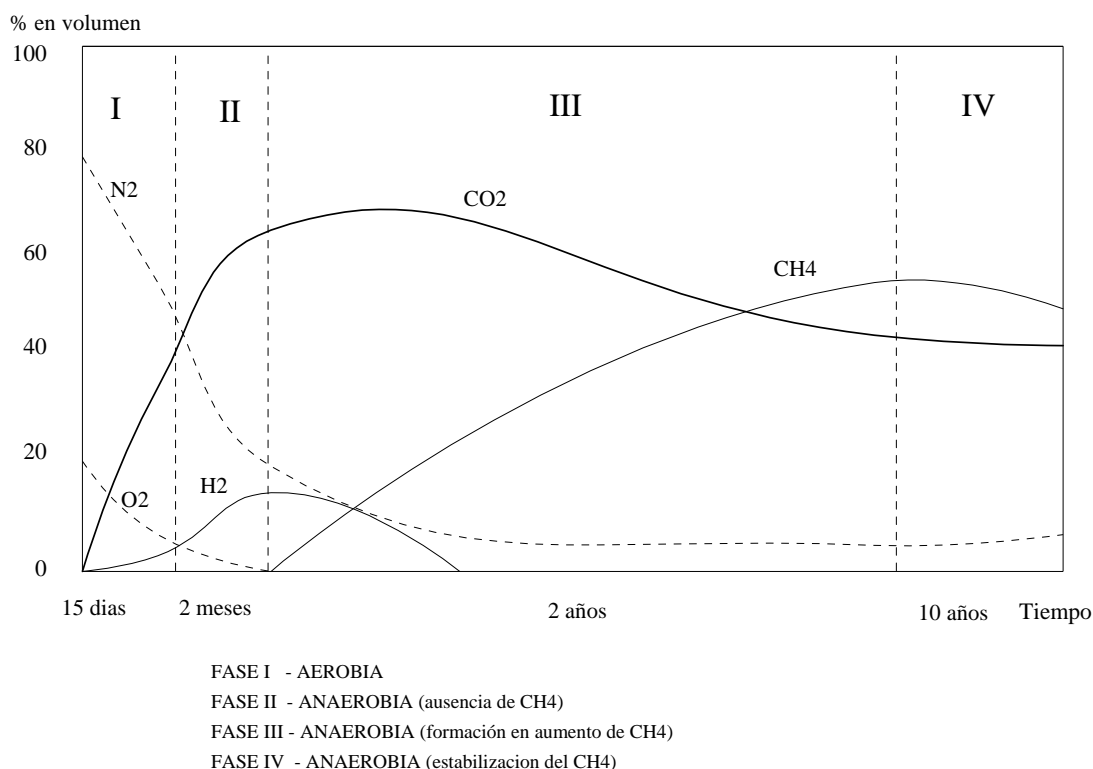
Como se ha explicado en el Apartado 2.1, la degradación anaerobia de la materia orgánica es un proceso complejo, en el que intervienen distintas poblaciones de bacterianas. El resultado final es la generación de un gas en cantidad y composición variable con el tiempo.

La evolución de la composición del biogás generado por una única tongada de residuos durante su degradación a lo largo de más de diez años se ilustra en la Figura 3. Se pueden distinguir cuatro distintas fases de acuerdo con el proceso de degradación.

- Fase I.** Breve degradación anaerobia. El oxígeno retenido en los residuos recién depositados se consume rápidamente, produciéndose compost y dióxido de carbono a partir de la materia orgánica fácilmente degradable.
- Fase II.** Bacterias fermentativas y acidogénicas producen, bajo condiciones anaerobias, ácidos grasos volátiles, dióxido de carbono e hidrógeno. La presencia de estos gases reduce el porcentaje relativo de nitrógeno.
- Fase III.** Segunda fase anaerobia, en la que actúan las bacterias metanogénicas produciendo metano. Dióxido de carbono e hidrógeno disminuyen en proporción relativa.
- Fase IV.** Se estabiliza la metanogénesis. 50-60% de metano y bajos niveles de hidrógeno. El dióxido de carbono es reducido en parte a metano.

La duración de cada fase depende de múltiples factores (ambientales, gestión del vertedero, tratamiento de los RSU, etc.). La producción de metano y dióxido de carbono puede prolongarse durante varias décadas, típicamente hasta al menos 15 años de la clausura del vertedero (UK Department of the Environment, 1994).





**Fig. 3.** Evolución con el tiempo de la composición del biogás generado por una misma tongada de residuos

La Fase IV concluye cuando, debido a los cada vez menores caudales generados de biogás (al estar los residuos casi completamente mineralizados), comienza a haber intrusión de aire en la parte superior del vertedero, disminuyendo la formación de metano. La presencia de oxígeno oxida el metano a dióxido de carbono en su fuga a la atmósfera. El contenido en nitrógeno aumenta paulatinamente. Finalmente, cuando la generación de metano es ya despreciable, la intrusión de aire permite la oxidación del carbono orgánico no disuelto y de las especies inorgánicas reducidas, generándose dióxido de carbono. Los residuos ya mineralizados terminan por tener un comportamiento semejante al del suelo normal.

La concentración de metano en el biogás no sólo depende de la fase en que se encuentre la degradación. Distintos sustratos originan distintas concentraciones de los componentes del biogás. Así, por ejemplo, la degradación de los lípidos genera un biogás con mayor concentración de metano que la degradación de la celulosa (Gendebien *et al.*, 1992)

Según esta descripción, es difícil hablar de una composición del biogás sin hacer referencia a la fase del proceso de degradación y al tipo de sustrato vertido. No obstante, el hecho de que habitualmente los residuos son depositados en capas o tongadas superpuestas, de composición bastante homogénea, hace que el biogás recuperado en la superficie sea mezcla de los gases producidos por residuos de distinta edad. En esta mezcla tiene mayor peso relativo el gas generado por los residuos que se encuentran en la etapa metanogénica, pues esta etapa se caracteriza por los mayores caudales de gas emitidos y por su mayor duración en el tiempo.

Por tanto, al analizar el biogás que aflora a la superficie de un vertedero, habitualmente sí se encuentra una composición prácticamente constante aún entre pozos distantes.

Estas consideraciones no son ciertas en vertederos de poca profundidad, donde no exista superposición de tongadas, así como en vertederos ya clausurados. Tampoco entre celdas de vertido de distinta antigüedad o en las que el residuo depositado tenga distinta composición.

#### 2.4.2. Componentes mayoritarios del biogás

Los componentes mayoritarios del biogás son:

- metano (CH<sub>4</sub>)
- dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)
- nitrógeno (N<sub>2</sub>)
- oxígeno (O<sub>2</sub>)
- vapor de agua (H<sub>2</sub>O)

La concentración habitual de estos componentes en el biogás recuperado en un vertedero, expresada en tanto por ciento en volumen de gas seco, se muestran en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Concentraciones habituales de distintos componentes del biogás recuperado en un vertedero

CH <sub>4</sub> % vol	CO <sub>2</sub> % vol	N <sub>2</sub> % vol	O <sub>2</sub> % vol	H <sub>2</sub> % vol	CO % vol	NH <sub>3</sub> mg/m <sup>3</sup> N	H <sub>2</sub> S g/m <sup>3</sup> N
40-60	40-60	5	-	-	0,001	30	0,015

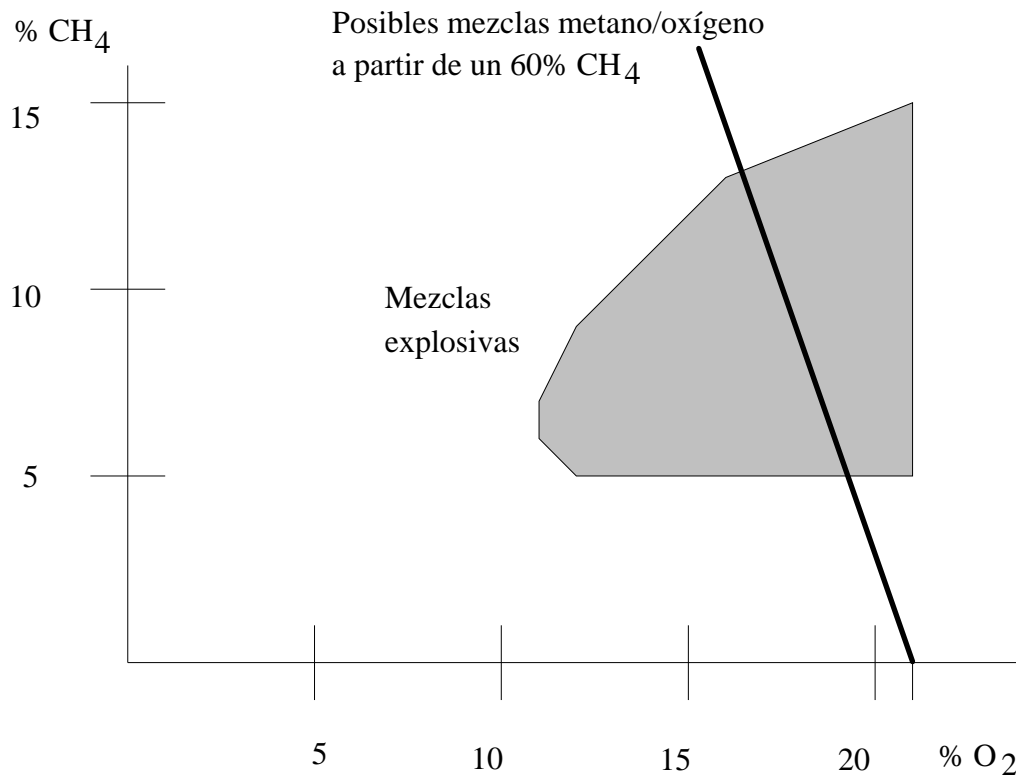
Fuente: Gendebien *et al.* (1992) y medidas propias

El contenido en **metano** es el parámetro más interesante, pues de él depende el poder calorífico del biogás. El contenido habitual de metano en el biogás está entre un 40 - 60%, como indica la Tabla 8. El metano es inflamable. y, además, es explosivo cuando se mezcla con oxígeno en determinadas proporciones, como muestra la Figura 4.

La presencia de oxígeno en el biogás es debida, como se demostrará, a la entrada de aire en los pozos de captación cuando éstos se someten a una presión relativa negativa para la aspiración del biogás. Si el gas generado en el vertedero, sin mezcla de aire, tiene por ejemplo un 60% de metano, el resultado de la entrada de aire producirá mezclas de metano y oxígeno según la siguiente ecuación (suponiendo que no se produce la oxidación del metano a dióxido de carbono):

$$\%CH_4 = 60/21 (21 - \%O_2) \quad [2-4]$$

En la Figura 4 se ha representado la recta dada por esta ecuación, que atraviesa claramente la zona de explosividad. Por tanto, la aspiración forzada del biogás del vertedero sin un adecuado sistema de control puede dar lugar a mezclas explosivas metano/oxígeno.



**Fig. 4.** Límites explosivos de la mezcla metano - oxígeno (Eden, 1990)

El Poder Calorífico Inferior del metano es de 35.880 kJ/m<sup>3</sup>N (Christensen *et al.*, 1996). Aproximadamente 1 m<sup>3</sup>N de biogás al 50% de metano equivale a 0,5 litros de gasolina. El metano no es tóxico, pero puede desplazar al oxígeno en locales cerrados y provocar asfixia. Niveles inferiores al 18% en volumen de oxígeno en un local cerrado son considerados peligrosos para la salud. Al ser inodoro e incoloro, en las instalaciones de biogás se deben usar sistemas de detección de fugas. Es más ligero que el aire, por lo que tiende a escapar a la atmósfera (densidad relativa respecto del aire es 0,56).

Ya se ha comentado que el metano influye en el calentamiento global de la Tierra (*efecto invernadero*) de forma significativa. Los motores que trabajan con biogás necesitan una concentración de al menos un 30% de metano (Gendebien *et al.*, 1992), aunque se citan casos en EE.UU. de motores trabajando a niveles de incluso un 10% (Eden, 1990).

El **oxígeno** no es estrictamente un componente del biogás, ya que el biogás es fruto de una degradación anaerobia. Los residuos recién vertidos pueden retener aire, también es posible la difusión de aire desde la atmósfera hacia la capa más superficial de los residuos cuando la actividad metanogénica es baja. No obstante, la aportación de oxígeno debida a estos factores debe ser mínima, tanto por la poca cantidad que se retiene, como por el hecho de su rápido consumo en las primeras fases de la degradación de los residuos y por su arrastre inmediato con la corriente de biogás cuando se conecta el sistema de aspiración. Niveles de oxígeno mayores del 1% en volumen son debidos a que los sistemas de extracción provocan la entrada de aire y, por tanto, de oxígeno por fenómenos de convección (Eden, 1990; Brown y Maunder, 1994; UK Department of the Environment, 1994). Es necesario determinar en qué cantidad penetra aire, para saber cuál es el nivel real de metano en el gas de vertedero. Por ello, debe analizarse también el oxígeno a la hora de caracterizar el gas de un vertedero. Si el caudal de aire entrante es bajo, puede ocurrir que el análisis del biogás no presente oxígeno en su composición: ello se debería a que se ha producido la oxidación biológica del metano a dióxido de carbono. En este caso, la concentración de nitrógeno nos permitiría calcular el caudal real de aire entrante.

La ausencia de oxígeno libre es esencial para las bacterias anaerobias que producen el metano y dióxido de carbono. Las bacterias metanogénicas son muy sensibles a esta variable, exigiendo potenciales REDOX inferiores a -330 mV (Christensen *et al.*, 1996). El oxígeno que penetra en el vertedero por difusión desde la atmósfera sólo afecta a la parte más superficial del mismo. El oxígeno que penetra en el vertedero debido a un alto vacío del sistema de extracción del biogás puede inhibir la generación de metano en una zona más amplia. No obstante, aunque se desconoce la capacidad de formar esporas de las bacterias metanogénicas, lo cierto es que se ha demostrado su capacidad de recuperación una vez desaparece nuevamente el oxígeno.

El **dióxido de carbono** es inodoro e incoloro y puede producir accidentes por asfixia al desplazar al oxígeno en el sistema respiratorio. Resultan tóxicas las exposiciones a niveles del 1,5% en volumen durante más de 10 minutos, o del 0,5% en volumen durante más de 8 horas (UK Department of the Environment). Su eliminación total aumenta el poder calorífico del biogás, haciendo posible la mezcla con gas natural en la red de distribución. En el caso de los motores de encendido por compresión Diesel - Gas, la alta resistencia del metano a la autoignición aumenta por la presencia del CO<sub>2</sub>, por lo que las condiciones de temperatura y presión que se alcanzan en el cilindro pueden llegar a ser insuficientes.

El dióxido de carbono puede ser un importante agente corrosivo a altas presiones en presencia de agua. En estas condiciones se forma ácido carbónico, H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. El pH de la disolución depende de la presión y temperatura. Por ejemplo, un biogás con un 40% de CO<sub>2</sub> almacenado a 350 bar y 20°C puede formar condensados de pH 2,73 (Constant *et al.*, 1989).

Respecto del **nitrógeno**, su presencia está asociada a la entrada de aire al vertedero por una mala cobertura de los residuos, una extracción forzada del biogás excesivamente energética o una toma de muestras incorrecta.

Los niveles de *nitrógeno*, o bien del *dióxido de carbono*, se pueden determinar por diferencia de 100, conocidos los niveles de metano y oxígeno. En general, se prefiere analizar el dióxido de carbono, al estar en mayor proporción en el biogás, y por facilidad de medida.

En las primeras etapas de la degradación anaerobia también se forma **hidrógeno** (H<sub>2</sub>), que es altamente inflamable, formando mezcla explosiva con el aire en el rango 4 - 74% en volumen (UK Department of the Environment, 1994). No obstante, su porcentaje en el gas de vertedero es muy bajo. El hidrógeno es generado por las bacterias fermentativas y las acidogénicas. Las fermentativas producen hidrógeno, dióxido de carbono y ácido acético mientras la presión de hidrógeno sea baja. Con presiones de hidrógeno altas generan hidrógeno, dióxido de carbono, etanol y ácidos butírico y propiónico. Estos tres últimos compuestos pueden ser consumidos más tarde por las bacterias acetogénicas si la presión de hidrógeno vuelve a descender. No obstante, la conversión de ácido propiónico requiere presiones de hidrógeno por debajo de  $9 \times 10^{-5}$  atm. Esto significa que, si la presión de hidrógeno se mantiene relativamente alta, se acumulará ácido propiónico y también ácido butírico, por lo que caerá el pH y se inhibirá, en el extremo, la generación de metano.

El **monóxido de carbono** (CO) es extremadamente tóxico, inodoro, incoloro e inflamable. Su concentración en el biogás es también muy baja.

El biogás suele estar saturado completamente de **vapor de agua** (Crescenti *et al.*, 1985; Tomasini, 1986; Eden, 1990; Uriarte *et al.*, 1992a y b; Brown y Maunder, 1994). Los ensayos realizados en el vertedero de La Zoreda han dado como resultado un contenido de 11 g/m<sup>3</sup>N, inferior a los 28,5 g/m<sup>3</sup>N del vertedero de Artigas (Uriarte *et al.*, 1992a y b). Debido al enfriamiento del biogás al ser extraído del vertedero (la temperatura ambiente es normalmente inferior a la del gas) se producen condensaciones en las líneas que pueden obstruirlas. Es necesario instalar purgas automáticas en los puntos más bajos de las conducciones. El agua es arrastrada por el sistema de aspiración si la velocidad del gas en el interior de las líneas supera los 5 m/s. El agua también puede condensar en el interior de los motores de combustión, por lo que se recomienda que el punto de rocío del gas se establezca en 11°C por debajo de la temperatura normal de entrada del gas al motor. La condensación producida por el biogás contiene disueltos distintos compuestos, lo que hace necesario un tratamiento adecuado de la misma previo a su vertido (Gandolla *et al.*, 1992).

#### 2.4.3. Componentes minoritarios

La medida de los **componentes minoritarios** del biogás es interesante debido a los problemas de corrosión que provocan, en especial los **compuestos orgánicos halogenados**, el **sulfuro de hidrógeno** y los **organosulfurados** (Eden, 1990; Uriarte *et al.*, 1992a y b).

En los motores de combustión interna, los **compuestos orgánicos clorados**, debido a las altas temperaturas de la cámara de combustión, generan HCl y CO<sub>2</sub> principalmente (Gendebien *et al.*, 1992). Aunque la mayor parte del HCl sale al exterior con los humos, un cierto porcentaje pasa al cárter, debido a que el sellado entre los segmentos del pistón y la camisa del cilindro no es perfecto. El HCl ataca, debido a su carácter altamente corrosivo, directamente o por acidificación del aceite lubricante, al motor. Para evitar estos daños, se pueden tomar las siguientes medidas:

- Neutralizar la presencia de HCl en el aceite del motor añadiendo aditivos especiales
- Aumentar la frecuencia de cambio de aceite, por ejemplo a las 200 horas de funcionamiento
- Reemplazar determinadas piezas del motor por otras más resistentes.

Los efectos corrosivos del biogás comienzan a manifestarse a concentraciones totales de cloro superiores a 50 mg/m<sup>3</sup>N según Held y Cornet (1995).

El biogás también puede ser tratado hasta eliminar las trazas existentes de *compuestos orgánicos halogenados* y otros compuestos, como el *sulfuro de hidrógeno* (Stookey *et al.*, 1984; Christensen *et al.*, 1996).

El **sulfuro de hidrógeno** (H<sub>2</sub>S) es un compuesto tóxico e inflamable. Su olor, muy fuerte, se asocia generalmente a la degradación anaerobia de residuos orgánicos.

El sulfuro de hidrógeno ataca especialmente las piezas de cobre (Cu), hierro (Fe) y acero. La corrosión de estas piezas se acelera por el alto contenido en humedad del biogás. Además, durante la combustión del biogás el sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) se oxida a SO<sub>2</sub> y SO<sub>3</sub>. Estos óxidos de azufre, por reacción con el vapor de agua, forman ácido sulfuroso, H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>, y ácido sulfúrico, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Estos ácidos son altamente corrosivos, especialmente cuando, después de la condensación, se acumulan localmente. Esto puede ocurrir en las conducciones de salida de gases de motores y calderas. Los efectos corrosivos del biogás comienzan a manifestarse con concentraciones totales de sulfuro de hidrógeno superiores a 500 mg/m<sup>3</sup>N (Held y Cornet, 1995).

El sulfuro de hidrógeno tiene efectos muy tóxicos para la salud humana aún en concentraciones muy bajas. En la Tabla 9 se resumen los efectos de la exposición de un individuo a distintos niveles de concentración. No debe permitirse la exposición a concentraciones de 15 ppm durante más de 10 minutos, ni a concentraciones de 10 ppm durante más de 8 horas (UK Department of the Environment, 1994).

**Tabla 9.** Efectos tóxicos del sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S)

Concentración H <sub>2</sub> S (ppm)	Efectos observados
10	Umbral de sensibilidad
5 - 40	Olor desagradable (que tiende a desaparecer por parálisis de la sensibilidad olfativa)
20 - 100	Ligero mareo, escozor en los ojos, visión borrosa
100 - 200	Vértigos, desvanecimiento, fuerte dolor de cabeza
500	Desorientación, vómitos, desmayo
1000	Desmayo, muerte por asfixia provocada por la inhalación del vómito

Fuente: Constant *et al.* (1989) citando a Fox (1984)

El sulfuro de hidrógeno es producido por las bacterias sulfato-reductoras, que metabolizan los sulfatos. Las bacterias sulfato-reductoras consumen también ácido acético, en competencia con las bacterias metanogénicas. Cuando la concentración de sulfatos es alta, la producción de metano cae dramáticamente. Ello no se debe a ningún efecto tóxico de los sulfatos sobre las bacterias metanogénicas, sino simplemente a una competencia entre los dos grupos de bacterias por los mismos nutrientes. La mayor energía liberada en la reducción de los sulfatos favorece el predominio de las bacterias sulfato-reductoras frente a las metanogénicas. Por tanto, una alta concentración de sulfuro de hidrógeno en el biogás puede revelar este problema.

Es difícil determinar a partir de qué concentración estos compuestos minoritarios comienzan a ser dañinos en los sistemas de aprovechamiento, pues dependerá no sólo del tipo (motor, turbina, quemador, etc.) sino también del modelo y del fabricante. En general, un quemador presenta menos problemas de corrosión que un motor fuel-gas; un motor fuel-gas menos problemas que un motor de gas de encendido provocado (pues éste último trabaja a un régimen de revoluciones muy superior); y un motor de gas de encendido provocado menos problemas que una turbina de gas. No obstante, si la turbina funciona con el vapor generado en una caldera de gas, estaremos en un caso tan favorable como el simple quemador de biogás.

#### 2.4.4. Medida de la composición del biogás

La medida de la composición del biogás es necesaria, desde un punto de vista práctico, para:

1. Poder decidir la viabilidad del aprovechamiento energético del biogás en un vertedero donde no exista
2. Regular el sistema de extracción de biogás, una vez implantado éste

En el primer caso, la caracterización del biogás debe ser completa y se deben determinar:

- (a) Componentes mayoritarios del biogás:
  - CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>
  - O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> (que nos advierten de la entrada de aire)
  - H<sub>2</sub>O (contenido en humedad)
- (b) Componentes minoritarios:
  - H<sub>2</sub>S
  - Compuestos organo sulfurados
  - Compuestos orgánicos halogenados

De este modo será posible determinar los siguientes parámetros, fundamentales para decidir posibles aprovechamientos del biogás:

- **Poder Calorífico Inferior (PCI)** del biogás, a partir del contenido en metano
- **Entrada de aire** en el vertedero al someter los pozos a presiones relativas negativas
- Nivel de **humedad** en el biogás
- Presencia de **compuestos corrosivos**
- Presencia de **compuestos tóxicos** para la salud

Debido a la variabilidad que presenta la composición del biogás, es necesario el análisis de muestras en distintos puntos del vertedero y durante un período razonable de tiempo. Esto se puede llevar a cabo por medio de equipos de análisis transportables o bien mediante la toma de muestras para su análisis en laboratorio.

Una vez implantado un sistema de extracción de biogás, también son necesarios análisis del biogás para su correcta regulación. Estos análisis se realizan en continuo o a intervalos breves de tiempo, de forma manual ó automática, en las líneas de extracción de gas, e incluyen solamente las concentraciones de metano y oxígeno. Los equipos utilizados son habitualmente fijos, aunque también se utilizan equipos portátiles para realizar análisis complementarios en puntos diversos de la red de captación.

Los equipos portátiles de análisis más utilizados suministran al menos las concentraciones de *metano*, *dióxido de carbono* y *oxígeno* (obteniéndose el nivel de *nitrógeno* por diferencia). Deben tener una precisión de  $\pm 1\%$  volumen de gas seco. En la Fotografía 1 se muestra el analizador portátil utilizado en este estudio junto a otros equipos de medida también empleados.

El equipo no debe resentirse por los niveles de humedad del biogás. También ha de resistir las condiciones de temperatura ambiental habituales y del propio biogás. Es conveniente que esté dotado de una pequeña bomba de aspiración para la toma de muestras en las conducciones de biogás que trabajen en depresión relativa. Debe cumplir normas de seguridad para el análisis de gases inflamables.



Al ser el metano y el dióxido de carbono gases absorbentes del infrarrojo, esta técnica es la habitualmente empleada en este tipo de equipos. Para la determinación del oxígeno, los detectores habitualmente utilizados se apoyan en sus propiedades paramagnéticas. El nivel de nitrógeno es calculado por diferencia. Estas mismas técnicas son las utilizadas habitualmente por los equipos estáticos para la regulación del sistema de extracción de biogás.

Para el contraste en laboratorio de estas mediciones, la técnica más utilizada es la cromatografía gaseosa (Crowhurst y Manchester, 1993).

**Fotografía 1.** Equipos de análisis y medida portátiles: analizador de biogás, termómetro y manómetro

Finalmente, el estudio exhaustivo de los componentes minoritarios en el biogás presenta el inconveniente de la alta variabilidad de sus concentraciones. La concentración de estos compuestos puede cambiar de un día a otro, cuando no de una hora a otra (Eden, 1990). Es necesario valorar los riesgos que se corren si no se realizan estas medidas frente al gasto de un análisis minucioso.

A continuación se proponen varias técnicas experimentales: (a) el Ensayo Biogás/Gas de Vertedero, que demuestra que el origen del oxígeno presente en el biogás es la entrada de aire en el vertedero al someter el pozo de muestreo a depresión y (b) un método para la determinación del contenido en humedad del biogás.

#### 2.4.4.1. Ensayo Biogás/Gas de Vertedero

Este ensayo tiene por objeto el cálculo del contenido real de metano del gas generado en un vertedero de RSU. En los apartados anteriores se ha aceptado que la presencia de oxígeno en el biogás es debida a la entrada de aire al vertedero. Mediante este ensayo se pretende demostrar la veracidad de esa afirmación, así como comenzar a interpretar el proceso de generación y recuperación del biogás en un vertedero.

La degradación de los Residuos Sólidos Urbanos depositados en un vertedero genera, de forma continua, biogás. Cuando en el vertedero no se ha instalado un sistema de desgasificación forzada, existe una *sobrepresión* en la biomasa que hace salir el biogás hacia el exterior.

Para evitar estas fugas de gas hacia la atmósfera se instala una red de chimeneas, uniformemente repartidas en el vertedero, y se conecta a un sistema de aspiración. La biomasa queda entonces sometida a una *ligera depresión*, que orienta la migración del gas generado hacia los pozos. Pero esta depresión en la zona del pozo provoca también la *entrada de aire* desde la atmósfera, ya que el sellado alrededor del pozo no es perfecto (Eden, 1990; Brown y Maunder, 1994). Este fenómeno se representa en la Figura 5. El caudal de aire se mezcla con el caudal del gas producido por la descomposición de los residuos. *Si bien el gas generado en el vertedero no tiene oxígeno en su composición* (ya que procede de una degradación anaerobia), *el gas extraído sí contendrá una cierta cantidad de oxígeno*. Por ello, en este trabajo nos referiremos al gas generado sin mezcla de aire como **Gas de Vertedero** y al gas extraído, con presencia de oxígeno, como **Biogás** tal y como se muestra en la Figura 6.

La riqueza en metano es siempre mayor en el Gas de Vertedero que en el Biogás, igualándose sólo en el caso de un caudal de aire nulo. El contenido real en metano del *Gas de Vertedero* (%CH<sub>4</sub>Vert) puede calcularse entonces en función de las concentraciones en el *Biogás* de metano (%CH<sub>4</sub>) y de oxígeno (%O<sub>2</sub>), tal y como muestra la Fórmula (2-5).

$$\%CH_4\text{Vert} = 100 \%CH_4 / (100 - (100/21) \%O_2) \quad [2-5]$$

Esta fórmula es válida mientras las cantidades de aire que penetran en el vertedero sean bajas y no lo hagan en profundidad. De otra forma el oxígeno del aire podría afectar la degradación *anaerobia* de los RSU si penetra lo suficiente en los residuos, disminuyendo la producción de metano. También se produciría la oxidación biológica del metano a dióxido de carbono.

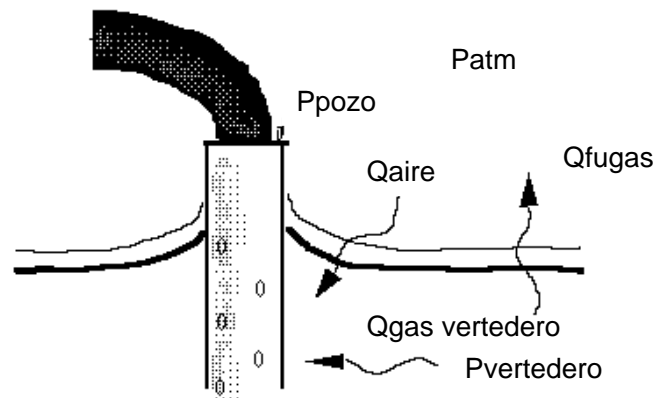


Fig. 5. Flujos de gas y aire en una captación de biogás

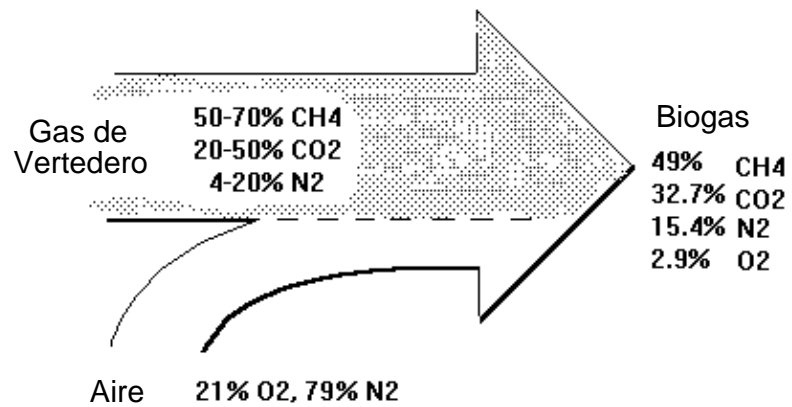


Fig. 6. Conceptos de Gas de Vertedero y Biogás

Mediante el Ensayo Biogás/Gas de Vertedero se demuestran estas afirmaciones. El ensayo consiste en registrar la composición en metano y oxígeno del biogás extraído en un pozo de captación, para distintas presiones de aspiración. Estos datos son entonces procesados utilizando la Fórmula (2-5), de forma que se obtiene un valor de la concentración de metano en el Gas de Vertedero para cada par metano / oxígeno del Biogás extraído. Los valores así obtenidos deben ser constantes.

La Tabla 10 muestra el resultado de aplicar este ensayo en dos pozos del vertedero de La Zoreda (Asturias). Es conveniente, tal y como reflejan estos datos, realizar mediciones sin aspiración forzada (o bien con presión cero, en venteo de gas a la atmósfera, o bien con presión positiva, con pozo cerrado). Ambos casos conducen a un contenido nulo de oxígeno y, por tanto, la concentración en metano registrada coincide con la concentración en metano del Gas de Vertedero.

**Tabla 10.** Resultados del Ensayo Biogás/Gas de Vertedero en los pozos F11 y F9 del vertedero de La Zoreda (Asturias)

<i>Pozo F11</i>				
Hora	10:15	10:27	10:34	10:37
CH <sub>4</sub>	54.6	59.2	60.1	60.3
O <sub>2</sub>	1.4	0.1	0	0
CH <sub>4</sub> Vert	58.7	59.4	60.1	60.3
Media	59.6			
<i>Pozo F9</i>				
Hora	10:54	11:09	11:39	12:13
CH <sub>4</sub>	55.3	56.6	58.6	55.5
O <sub>2</sub>	1.1	0.5	0	0.9
CH <sub>4</sub> Vert	58.5	58.1	58.6	58.1
Media	58.3			

El sistema de numeración de pozos en La Zoreda es el siguiente: primero, la letra corresponde a la caseta de regulación a la que está conectado el pozo (A, B... F); y, segundo, el dígito corresponde al número de línea dentro de esa caseta (1, 2... 12).

Aunque las sondas estén localizadas en distintos puntos del vertedero, la composición del biogás se muestra normalmente constante, por los motivos explicados en el Apartado 2.4.1.

La Tabla 11 muestra los resultados obtenidos en el vertedero de La Zoreda al aplicar el Ensayo Biogás / Gas de Vertedero a los análisis de cada una de las 12 líneas de la Caseta B, repetidos durante más de un mes con una periodicidad de 10 horas (más de 600 datos). La concentración de dióxido de carbono se ha obtenido de forma análoga a la del metano. El nitrógeno se ha calculado por diferencia de cien. Este resultado se considera representativo de todo el vertedero de La Zoreda. En la Figura 7 se muestra la distribución de frecuencias con que se repite cada resultado, semejante a una distribución normal de probabilidad.

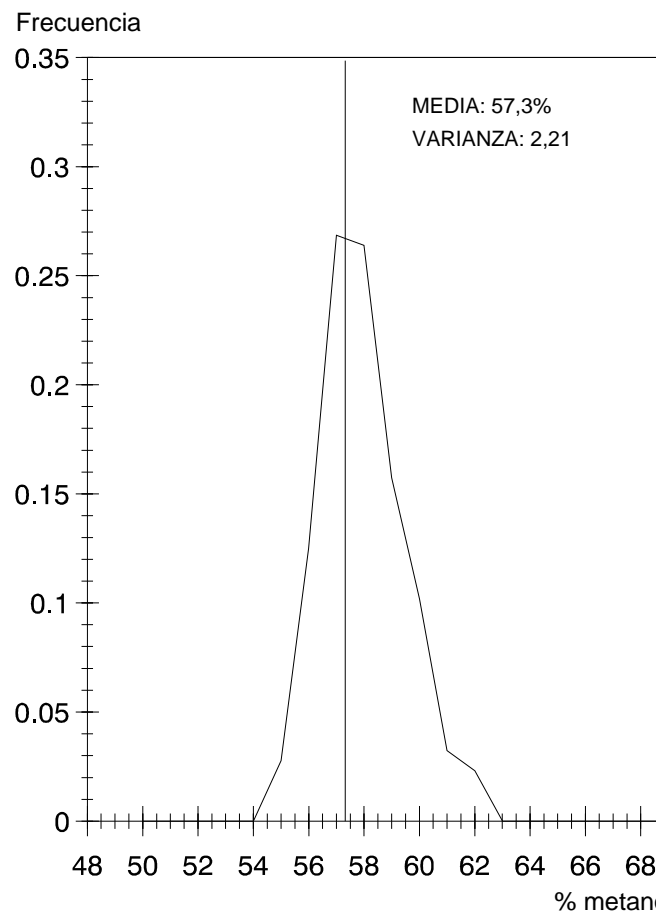
**Tabla 11.** Composición del Gas de Vertedero (La Zoreda)

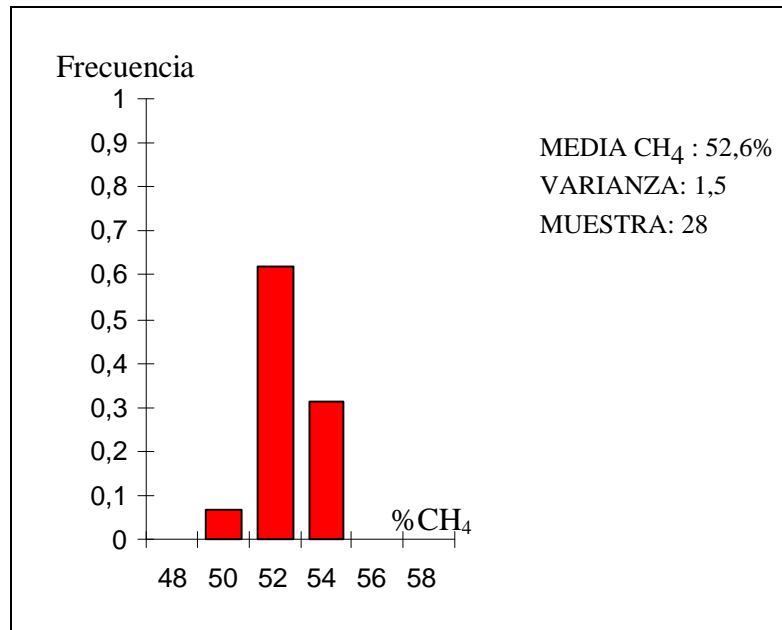
%CH <sub>4</sub> en volumen	57,3
%CO <sub>2</sub> en volumen	38,2
%N <sub>2</sub> en volumen	4,5
%O <sub>2</sub> en volumen	-

En la Tabla 12 se muestran los resultados obtenidos del estudio realizado en el vertedero de Bratovo (Burgas, Bulgaria), donde se analizaron cuatro pozos distintos. En la Figura 8 se muestra la distribución de frecuencias obtenida.

**Tabla 12.** Composición del Gas de Vertedero (Bratovo)

	%CH <sub>4</sub>	%CO <sub>2</sub>	%N <sub>2</sub>
POZO 1	52,9	36	11,1
POZO 2	52,5	34,2	13,3
POZO 3	52,4	31,6	16
POZO 4	52,6	32,4	15
<b>MEDIA</b>	<b>52,6</b>	<b>35,1</b>	<b>12,3</b>

**Fig. 7.** Riqueza en metano del Gas de Vertedero en La Zoreda



**Fig. 8.** Riqueza en metano del Gas de Vertedero en Bratovo

#### 2.4.4.2. Medida del contenido en humedad

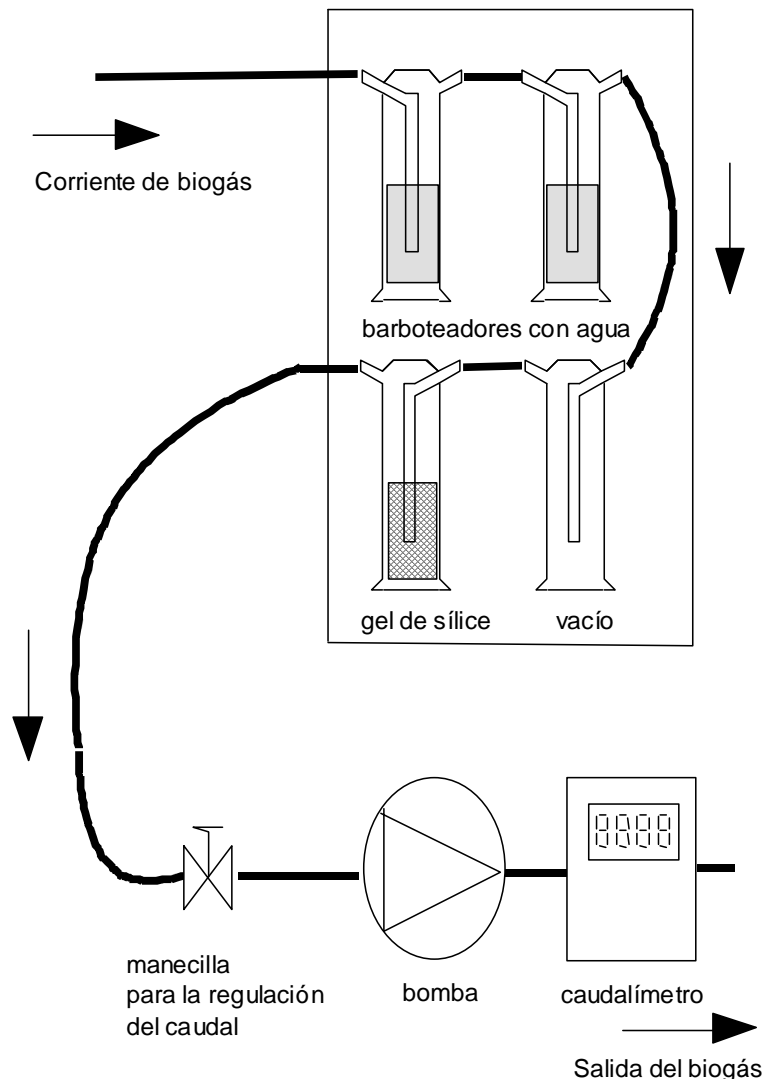
El método propuesto consiste en hacer circular un caudal conocido de biogás a través de varios barboteadores, registrando el aumento de peso de los mismos. Los barboteadores deben estar refrigerados por inmersión en un baño de hielo, de modo que toda la humedad del biogás condense. El último barboteador, con gel de sílice coloreada, servirá de test de la correcta realización del ensayo. Finalmente, el contenido de humedad del biogás se calcula como la diferencia de pesada de los barboteadores dividida entre el volumen de biogás trasegado.

Los instrumentos utilizados son, según muestra la Figura 9:

- 2 barboteadores con agua
- 1 barboteador vacío
- 1 barboteador con gel de sílice
- nevera para sumergir los barboteadores en hielo
- bomba de vacío
- presilla de control de caudal
- caudalímetro
- filtro
- balanza

Este método ha sido aplicado para calcular el contenido en humedad del biogás al final en las líneas de extracción en el vertedero de La Zoreda. El resultado ha sido de 11 mg/l.

Cossu, R. y Reiter, M. sugieren la posibilidad de emplear como aproximación para el cálculo del contenido en humedad del biogás el diagrama de Mollier para la mezcla aire - vapor de agua (Christensen *et al.*, 1996). Considerando que el peso específico del aire húmedo es similar al del biogás, se justifica la utilización del diagrama del Mollier para la mezcla aire - vapor de agua a 1 atmósfera. Teniendo en cuenta que habitualmente el biogás está completamente saturado de humedad, es fácil calcular la cantidad de condensado que se obtiene al enfriarlo. Ésta viene dada por la diferencia entre las humedades absolutas a las temperaturas inicial y final, dentro de la curva de saturación.



**Fig. 9.** Equipo de medida del contenido en humedad

Así, a 20 °C, temperatura aproximada del biogás en el punto muestreado en La Zoreda, la humedad absoluta es de 15,0 g/kg ó 19,3 g/m<sup>3</sup>N, para un peso específico del biogás de 1,287 kg/m<sup>3</sup>N. Enfriando el gas hasta 5 °C, estos valores descienden a 5,5 g/kg ó 7,0 g/m<sup>3</sup>N. El condensado producido es de 9,5 g/kg ó 12,3 g/m<sup>3</sup>N. Este valor, ligeramente superior al obtenido, corresponde al máximo teórico, con las aproximaciones que se han realizado.

## 2.4.4.3. Componentes minoritarios

A modo de ejemplo, se resumen a continuación los resultados de los análisis de distintos compuestos minoritarios en los vertederos de La Zoreda (Asturias) y Bratovo (Bulgaria).

El contenido de los componentes minoritarios del biogás en La Zoreda es el recogido en la Tabla 13.

**Tabla 13.** Componentes minoritarios del gas de vertedero en La Zoreda

H <sub>2</sub> S (g/m <sup>3</sup> N)	HF (μg/m <sup>3</sup> N)	HCl (μg/m <sup>3</sup> N)
0,2	20	30

(1) COGERSA, S.A.

Recientemente se han realizado nuevos ensayos sobre el contenido en sulfuro de hidrógeno del biogás en el vertedero de La Zoreda, obteniéndose una concentración media de 0,118 g/m<sup>3</sup>N, dentro de un intervalo máximo de 0,079 a 0,197 g/m<sup>3</sup>N (Sastre *et al.*, 1997). Este nivel de H<sub>2</sub>S, moderadamente alto, puede deberse al empleo de escoria de acería como material complementario en el recubrimiento diario de los residuos.

En los trabajos realizados en el vertedero búlgaro de Bratovo, se tomaron medidas en las cinco sondas del contenido en sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S). Estos ensayos fueron realizados por personal de la compañía NEFTOCHIM de Burgas (la mayor refinería de petróleo de Bulgaria, muy cercana al vertedero). Las medidas se obtuvieron por cambio de coloración en ampollas conteniendo acetato de plomo, haciéndose una comprobación por medio de cromatografía de gas. Los resultados se muestran en la Tabla 14.

**Tabla 14.** Contenido en H<sub>2</sub>S del gas de vertedero de Bratovo

POZO 1	POZO 2	POZO 3	POZO 4	POZO 5
6 mg/m <sup>3</sup>	-	-	3 mg/m <sup>3</sup>	1 mg/m <sup>3</sup>

(1) NEFTOCHIM



## 2.5. Caudal generado de biogás. Análisis de los factores que intervienen en la generación del biogás

Una determinada muestra de residuo genera una cantidad mayor o menor de biogás dependiendo de diferentes factores tales como, por ejemplo, su composición. Existen otros condicionantes que influyen no en la cantidad de biogás que se genera sino en la velocidad de generación. Así, si se reduce el contenido en humedad de la muestra, disminuye la velocidad de la degradación anaerobia, pero se mantiene durante más tiempo la metanogénesis, pues la cantidad final de biogás es la misma. Finalmente, otros factores influyen en la eficiencia o rendimiento de los sistemas de recuperación del biogás en el vertedero, sin alterar la actividad microbiana.

En este apartado analizaremos estas variables, agrupadas en: (a) factores ambientales; (b) cantidad y composición de los RSU; (c) características del vertedero; (d) tratamiento de los RSU; y (e) sistema de extracción del biogás. Se utilizarán como referencia los estudios de los vertederos de La Zoreda (Asturias) y Bratovo (Bulgaria). En el Apartado 2.6, se propondrán dos modelos desarrollados para el **cálculo de la producción de biogás** que incorporan parte de las variables definidas. Los vertederos de La Zoreda y Bratovo también servirán de ejemplos de aplicación de estos modelos.

### 2.5.1. Factores ambientales

El conocimiento de la meteorología de la zona donde está ubicado el vertedero es de suma importancia. Tanto la **temperatura ambiente** como el **índice de precipitaciones** influyen en la degradación anaerobia de los residuos.

Ya se ha comentado en los Apartados 2.1 y 2.2 el carácter positivo, desde el punto de vista de la generación de biogás, que tiene un contenido en humedad elevado en los residuos (Attal *et al.*, 1992; Suflita *et al.*, 1992). Existe una relación directa entre la humedad de los residuos y su tiempo de degradación, pudiéndose afirmar que los vertederos de zonas húmedas producen un caudal mayor de gas durante el periodo de explotación que los de zonas secas. Una vez clausurado el vertedero, no obstante, cesan más pronto de producir metano (Marticorena *et al.*, 1993; Pohland y Al-Yousfi, 1995). Christensen *et al.* (1996) establece un incremento exponencial en la velocidad de degradación de los RSU al incrementar el contenido en humedad entre un 25 y un 60%.

Un alto contenido en humedad permite que sustancias nutrientes presentes en una zona del vertedero se trasladen a otras donde son escasas. El pH debe mantenerse en torno a 7 para que la producción de metano no se detenga, siendo muy beneficioso un nivel alto de la humedad, pues permite el movimiento de sustancias con un efecto buffer sobre el pH. Finalmente, sustancias que son tóxicas cuando alcanzan determinadas concentraciones se diluyen en el lixiviado, reduciendo su concentración a niveles en los que incluso pueden convertirse en nutrientes necesarios para la degradación anaerobia, como ocurre con los cationes de calcio, magnesio, etc. (Pacey y DeGier, 1986).

Si no hay precipitaciones durante un largo periodo de tiempo, la superficie del vertedero se puede agrietar y facilitar así la entrada de aire. La lluvia, por el contrario, hace que la superficie del vertedero sea más impermeable. Este fenómeno se acentúa con materiales de recubrición de tipo arcilloso, por sus propiedades expansivas. Según algunos autores, la entrada de aire podría llegar a frenar la producción de metano (Bogner, 1986; Brown y Maunder, 1994). Antes de llegar a este extremo, no obstante, se producirá una fuerte caída en el nivel de metano del biogás recuperado, por la dilución del gas generado en el vertedero en la corriente de aire que penetra a través del terreno poroso, tal y como se ha explicado en el Apartado 2.4.4.

Se recomienda la **recirculación de lixiviados** en los periodos estivales para mantener alta la humedad de los residuos (Stegmann y Spendlin, 1986; Rao y Suflita, 1993; Pohland y Al-Yousfi, 1995), así como para lograr una superficie más impermeable. En la Fotografía 2 puede verse un camión cisterna irrigando el lixiviado en verano en el vertedero de La Zoreda. No obstante, la recirculación del lixiviado no constituye, en ningún caso, un sistema de tratamiento válido en un vertedero controlado.



**Fotografía 2.** Recirculación de lixiviados en periodos secos (La Zoreda)

El agua también puede provocar problemas en el sistema de extracción del biogás como se ha explicado en el apartado 2.4.2 (Eden y Eden, 1992). Además de los problemas asociados a la condensación de la humedad del biogás, las chimeneas de extracción tienden a inundarse por encima del nivel freático del entorno, disminuyendo entonces su rendimiento de captación.

Al estudiar la generación de biogás en un vertedero controlado y la facilidad de su recuperación es necesario, por tanto, conocer el índice de precipitaciones en la zona objeto de estudio.

La **temperatura ambiente** también influye en la generación del biogás. Si la temperatura *de los residuos* está por debajo de los 10°C o por encima de los 60°C, la producción de biogás cae rápidamente. Los rangos óptimos de temperatura *de los residuos* son: 20 a 45 °C para las bacterias mesófilas y 45 a 75 °C para las termófilas (Pacey y DeGier, 1986). Las temperaturas habituales que se han medido en el interior de los vertederos están entre 20 y 50 °C (Stegmann y Spendlin, 1986; Suflita *et al.*, 1992; Rao y Suflita, 1993). Suflita *et al.* (1992) registra temperaturas de hasta 62,3 °C en el interior de un vertedero. Las variaciones estacionales de la temperatura *ambiente* influyen en vertederos poco profundos, con menos de 10 m (Attal *et al.*, 1992).

El vertedero de La Zoreda puede considerarse como un *vertedero húmedo*, como reflejan los datos de precipitaciones de la Tabla 15 del período Enero'93 / Diciembre'95. La precipitación mensual media es 83,6 l/m<sup>2</sup> (1003 mm anuales). La temperatura ambiente media de medias es 15,9 °C, y las medias de mínimas y máximas 5,1 °C y 26,7 °C respectivamente. La temperatura mínima en estos meses fue -5 °C.

El vertedero de Bratovo se considera como un vertedero *moderadamente húmedo* a raíz de los datos meteorológicos de precipitaciones facilitados por el Ayuntamiento de Burgas, reflejados en la Tabla 16, y que dan un índice medio mensual de 41,9 l/m<sup>2</sup> (503 mm anuales). La temperatura media es de 13,8 °C.

**Tabla 15.** Datos meteorológicos del vertedero de La Zoreda

Fecha	Lluvia (l/m <sup>2</sup> )	Temp. máx. (°C)	Temp. mín. (°C)
Ene 93	26,7	22,0	-3,0
Feb 93	39,3	20,0	-2,0
Mar 93	62,3	24,0	-2,5
Abr 93	136,4	19,5	3,0
May 93	58,0	25,5	6,5
Jun 93	114,7	24,0	11,0
Jul 93	47,3	28,0	12,0
Ago 93	129,9	29,0	12,5
Sep 93	88,6	26,0	9,0
Oct 93	111,6	20,0	8,0
Nov 93	88,2	19,0	3,0
Dic 93	207,9	23,0	5,0
Ene 94	134,9	17,0	-0,5
Feb 94	33,1	21,0	2,0
Mar 94	21,0	27,0	8,0
Abr 94	77,1	26,0	3,0
May 94	60,7	24,0	8,0
Jun 94	19,7	35,0	12,5

(SIGUE)

**Tabla 15.** Datos meteorológicos del vertedero de La Zoreda (continuación)

<b>Fecha</b>	<b>Lluvia (l/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Temp. máx. (°C)</b>	<b>Temp. mín. (°C)</b>
Jul 94	34,4	32,0	9,0
Ago 94	42,1	32,5	14,0
Sep 94	155,1	34,0	8,5
Oct 94	71,9	29,0	3,0
Nov 94	46,4	25,0	2,5
Dic 94	201,1	24,0	1,0
Ene 95	139,6	26,0	-1,0
Feb 95	142,3	27,0	2,0
Mar 95	103,5	24,5	-2,0
Abr 95	36,5	21,0	-2,0
May 95	50,2	32,0	6,0
Jun 95	8,8	32,0	6,0
Jul 95	68,7	36,5	15,4
Ago 95	19,3	41,0	20,0
Sep 95	117,8	35,5	5,0
Oct 95	23,3	33,0	6,0
Nov 95	123,9	26,0	1,0
Dic 95	167,5	21,5	-5,0

Fuente: Estación meteorológica de CSI - Avilés (Corporación de la Siderurgia Integral)

**Tabla 16.** Datos meteorológicos del vertedero de Bratovo

<b>Periodo</b>	<b>Temperatura media (°C)</b>	<b>Precipitaciones (l/m<sup>2</sup>)</b>
Ene 1994	5,9	20
Feb 1994	3,1	4
Mar 1994	8,7	39
Abr 1994	13,4	47
May 1994	18,4	12
Jun 1994	22,8	49
Jul 1994	26,7	36
Ago 1994	27,2	21
Sep 1994	24,8	11
Oct 1994	15,6	116
Nov 1994	8	38
Dic 1994	4,75	87
Ene 1995	1,8	86
Feb 1995	8	22
Mar 1995	7,7	69
Abr 1995	12,5	33
May 1995	16,7	23
Jun 1995	23	41

Fuente: Ayuntamiento de Burgas (Bulgaria)

## 2.5.2. Residuos depositados

### 2.5.2.1. Cantidades vertidas

El volumen de biogás generado en un vertedero depende de la cantidad de materia orgánica depositada en el mismo. Interesa conocer no sólo la cantidad total vertida sino el ritmo anual de deposición desde el inicio de las operaciones del vertedero hasta su clausura.

Cuando se estudia un vertedero en operación, se debe realizar una hipótesis de la evolución futura del vertido. Para ello se evaluará:

- La *tendencia demográfica* en la zona usuaria del vertedero
- La existencia de *movimientos de población estacionales*
- Las tendencias en la *cantidad de basura generada por habitante y día*
- La posibilidad de *vertidos industriales asimilables a urbanos*
- La posibilidad de que la empresa gestora o la administración, impongan *modelos de tratamiento de los residuos* distintos al vertido controlado
- La *vida útil del vertedero*

La producción de residuos municipales por habitante y día en países industrializados como los pertenecientes a la Unión Europea varía en el intervalo 0,7 a 1,8 kg (Gendebien *et al.*, 1992, citando a su vez a Collinson, 1981, y Rae, 1988). Es habitual utilizar un valor medio de 1 kg por habitante y día en este tipo de estimaciones. En los países de baja renta per capita se puede utilizar como aproximación el valor medio de 0,6 kg por habitante y día.

Se consideran como *residuos asimilables a urbanos* los restos de jardín y limpieza viaria, comedores industriales y material de oficina, vehículos, restos de construcción, etc. La admisión de lodos de depuradoras de plantas de tratamiento de aguas es recomendable desde el punto de vista de la generación de biogás, debido a su alto contenido en humedad, siempre que no contengan sustancias tóxicas o modifiquen el pH.

Como aplicación práctica de estos criterios, resumimos a continuación los resultados obtenidos para el vertedero asturiano de La Zoreda y para el vertedero búlgaro de Bratovo.

El vertedero de La Zoreda fue inaugurado en 1986, conociéndose las cantidades vertidas anualmente hasta el presente. La *vida útil* del vertedero es de otros 10 años, hasta el 2005, aunque podría ampliarse con la ocupación de terrenos próximos al vertedero. La zona usuaria del vertedero comprende la práctica totalidad del Principado de Asturias. La tendencia demográfica es negativa, esperándose que la población asturiana descienda desde 1.092.627 habitantes en 1991 hasta 1.020.887 en el 2006, es decir, unos 70.000 habitantes (según datos de “La población escolar en Asturias”, elaborado por el Dpto. de Geografía de la Universidad de Oviedo). Esta hipótesis supone un descenso en las cantidades de residuos a tratar de un 6,4% en 10 años.

Por otra parte, según datos suministrados por COGERSA, S.A. la producción de residuos por habitante y día es de 0,8 kg actualmente. Suponiendo que en el año 2006 la producción de basuras fuese de 0,9 kg/hab y día, según la tendencia europea, las cantidades de residuos a tratar se incrementarían en un 12,5% en estos 10 años.

COGERSA emprendió en 1994 un plan piloto de recogida selectiva de papel, cartón, vidrio, plásticos y metales.

Otro factor a considerar, de difícil estimación, es la disminución de la actividad industrial en Asturias, en clara recesión en los últimos años.

Teniendo en cuenta todas estas variables, se ha optado por suponer un crecimiento cero en el vertido para los próximos años, como se muestra en la Tabla 17.

**Tabla 17.** Vertido anual de RSU en el vertedero de La Zoreda

<b>Año</b>	<b>Toneladas</b>
1986	122.000
1987	213.000
1988	238.000
1989	260.000
1990	300.000
1992	330.000
1993	410.000
1994	418.534
1995	416.204
1996	436.446
1996 - 2005	416.204 <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Hipótesis

En el caso del vertedero búlgaro de Bratovo, inaugurado en 1983, no se dispone de datos fiables de vertido hasta 1988. Se ha supuesto para esos años un crecimiento anual del vertido constante del 5% hasta el dato del año 88. Este incremento coincide con el promedio de la serie de datos 1988 / 1994. No existe información sobre las tendencias demográficas ni del futuro industrial y el cambio de los modos de vida en ese país. La adecuación de la economía comunista a una economía de mercado hace altamente arriesgada cualquier hipótesis. No existen de momento planes alternativos al tratamiento de residuos mediante vertido controlado. Por ello, se ha tomado la hipótesis de un crecimiento del 5% en la producción anual de residuos hasta el año 2000, estabilizándose después hasta el año 2007, año en que se clausurará el vertedero según los responsables municipales de Burgas. Los resultados se muestran en la Tabla 18.

**Tabla 18.** Vertido anual de RSU en el vertedero de Bratovo

<b>Año</b>	<b>Toneladas</b>
1983	52.264 <sup>(1)</sup>
1984	55.256 <sup>(1)</sup>
1985	58.018 <sup>(1)</sup>
1986	60.919 <sup>(1)</sup>
1987	63.965 <sup>(1)</sup>
1988	67.164
1989	70.675
1990	79.691
1991	65.000
1992	76.000
1993	95.000
1994	108.000
1995	113.400 <sup>(1)</sup>
1996	119.070 <sup>(1)</sup>
1997	125.023 <sup>(1)</sup>
1998	131.274 <sup>(1)</sup>
1999-2007	137.838 <sup>(1)</sup>

(1) Hipótesis

#### 2.5.2.2. Composición de los RSU

El conocimiento de la composición de los RSU es necesario, ya que la producción de biogás depende de su contenido en materia orgánica y del origen de ésta. El papel y el cartón y, en general, todos los derivados de la madera, forman un grupo de residuos orgánicos de *lenta degradación*. Ello es debido a que presentan en su composición química moléculas orgánicas no solubles en agua. Para ser degradadas biológicamente, es necesaria su hidrólisis previa, como se ha explicado en el Apartado 2.1. Los restos de comida, así como los de jardín forman el grupo de residuos orgánicos de *degradación rápida*. Son residuos de alto contenido en humedad y su vertido en grandes cantidades en vertederos jóvenes puede retrasar, paradójicamente, la formación de metano. Ello es debido al descenso del pH que produce la alta actividad microbiana inicial. Superada esta fase, la producción de biogás se recobra con fuerza (Christensen *et al.*, 1996). El resto, vidrio, metales, cenizas, trapos, etc. son materiales *no biodegradable*.

La composición de los residuos sólidos urbanos está influida por factores tales como:

- Modos de vida de la población
- Época del año
- Vertido conjunto de residuos industriales
- Existencia de planes de recogida selectiva

Los RSU generados en zonas rurales tienen una composición distinta a los generados en la ciudad. Así, por ejemplo, en las zonas rurales el contenido en materia orgánica es menor, debido al aprovechamiento de ésta en la alimentación de animales. Zonas residenciales, áreas de servicios o zonas industriales originan también distintos tipos de residuos. El modo de vida moderno aumenta la proporción de todo tipo de embalajes (vidrio, plásticos, metales, papel y cartón) y disminuye la de escorias y cenizas (debido al uso de gas y electricidad en cocinas y calefacciones).

Los residuos en verano tienen mayor contenido en frutas y verduras, mientras que en invierno aumentan escorias y cenizas. En el caso de zonas turísticas, en la época estival aumentará el porcentaje de embalajes.

Los vertidos industriales conjuntamente dispuestos con urbanos no deben ser, lógicamente, tóxicos. De otra forma, la degradación anaerobia de la materia orgánica podría detenerse. Los residuos industriales asimilables a urbanos pueden ser no biodegradables (restos de construcción, por ejemplo) o presentar un alto contenido en materia orgánica (restos de jardín, lodos de depuradoras de aguas residuales urbanas, etc.).

El vertido de lodos de depuradora es considerada positiva por su alto contenido en humedad, nutrientes e incluso biomasa activa. Este último factor es menos importante cuando las condiciones metanogénicas ya están presentes en el vertedero. Si los lodos tienen un pH bajo, pueden tener un efecto negativo.

La recogida selectiva altera lógicamente la composición de los residuos efectivamente depositados en el vertedero. En este sentido, se espera una modificación sustancial de la composición de los residuos vertidos en España durante los próximos años, debido a la aplicación de la nueva Ley de Envases y Residuos de Envases.

La composición media de los RSU en Europa y Estados Unidos se resume en la Tabla 19.

**Tabla 19.** Composición de los RSU en Europa y EE.UU.

	Alimentación	Agrícolas	Papel y Cartón	Madera	Textil	Plásticos	Cristal	Metales	Otros
UE	20-50	12-18	20-24	1-8	1-6	3-8	4-12	3-13	1-20
EE.UU.	8-9	18-20	36-41	8-9		6-7	8-10	9-10	1-2

(1) Fuente: Gendebien *et al.*, 1992



En los trabajos realizados para los vertederos de La Zoreda y Bratovo, se solicitó de los responsables de ambas instalaciones el análisis de la composición media de los RSU depositados, resumida en la Tabla 20.

Únicamente el vertedero de La Zoreda cuenta con un plan de recogida selectiva para reciclaje de vidrio, metales, plásticos, papel y cartón. Es difícil realizar una estimación de cuál puede ser la variación de la composición de los residuos depositados en el vertedero en un futuro.

En ninguno de los dos vertederos se vierten conjuntamente residuos industriales que puedan afectar la degradación anaerobia de la materia orgánica.

**Tabla 20.** Comparación de la composición media de los RSU en los vertederos de Bratovo y La Zoreda

	<b>BRATOVO<sup>(1)</sup></b>	<b>LA ZOREDA<sup>(2)</sup></b>
Materia Orgánica	26,6	50,6
Papel y Cartón	20,2	15,6
Metales	2,5	3,5
Vidrios	5,5	7,2
Plásticos	11,4	9,5
Textiles	2,4	2,7
Otros	27,6	10,9

<sup>(1)</sup> Ayuntamiento de Burgas

<sup>(2)</sup> COGERSA, S.A.

### 2.5.2.3. Contenido en humedad de los RSU

La degradación de la materia orgánica se ve favorecida por la presencia de agua (Attal *et al.*, 1992; Suflita *et al.*, 1992). La producción de metano exige un contenido en humedad de los residuos depositados de al menos un 40-60% (Pacey y DeGier, 1986; Rao y Suflita, 1993; Brown y Maunder, 1994). Contenidos altos de humedad aceleran la velocidad de degradación de las basuras y, por tanto, la producción de biogás (Marticorena *et al.*, 1993; Pohland y Al-Yousfi, 1995). No obstante, los niveles altos de humedad en los residuos plantean problemas en el sistema de captación de biogás (Eden y Eden, 1992).

La presencia de agua en el vertedero es positiva porque facilita la presencia de los microorganismos responsables de la degradación anaerobia en todos los puntos del vertedero, diluye la concentración de sustancias tóxicas, regula el pH y facilita la difusión de nutrientes (Pacey y DeGier, 1986).

Parte del agua que entra al vertedero lo hace directamente con las basuras depositadas. Estas contienen porcentajes de humedad distintos según su origen o la época del año. Los restos de comida y jardín, así como los lodos de depuradora, aportan la mayor parte de este agua contenida en los residuos (Pacey y DeGier, 1986). Si durante la recogida los residuos están expuestos a las inclemencias atmosféricas, el contenido en humedad aumentará. El contenido en humedad de los RSU antes de ser depositados puede variar entre valores tan dispares como 25 y 60% en peso (Gendebien, 1992 citando a Dorfmann, 1985). Un contenido del 35% puede considerarse normal.

En el vertedero de Bratovo, el contenido en humedad medio de los residuos antes de ser vertidos, según el estudio estadístico encargado por el Ayuntamiento de Burgas, es del 39%.

#### 2.5.2.4. Nutrientes

El ecosistema anaerobio necesita, además de materia orgánica, de otros nutrientes, entre los que destacan el nitrógeno y el fósforo. Todos los micronutrientes necesarios, como el azufre, calcio, magnesio, potasio, hierro, cinc, cobre, cobalto, molibdeno y selenio son habitualmente abundantes en el vertedero. El ecosistema anaerobio precisa de una menor cantidad de nitrógeno y fósforo que el aerobio. El "ratio" óptimo para el ecosistema anaerobio entre materia orgánica (expresada como DQO), nitrógeno y fósforo es de 100:0,44:0,08 (Christensen *et al.*, 1996, citando a McCarty, 1964). Aunque considerado en su conjunto el vertedero dispone de suficiente cantidad de nitrógeno y fósforo, la heterogeneidad del mismo puede provocar la existencia de zonas donde sean escasos. El fósforo es, aunque sólo en estas circunstancias límite, el nutriente con más probabilidad de escasear.

#### 2.5.2.5. Inhibidores de la actividad metanogénica

Existen sustancias contenidas en los residuos capaces de inhibir el proceso de la metanogénesis. Entre ellas, las más importantes son algunas sales, sulfuros, metales pesados y algunos compuestos orgánicos (Pacey y DeGier, 1986; Rao y Suflita, 1993).

El lixiviado generado por *sales* presentes en los residuos puede tener una alta concentración de cationes. Aunque en bajas concentraciones resultan estimulantes de la actividad metanogénica, en altas concentraciones su efecto es inhibitorio. Así, son tóxicos niveles de  $\text{Na}^+$  por encima de 3500 mg/l, de  $\text{K}^+$  por encima de 2500 mg/l, de  $\text{Ca}^{2+}$  por encima de 2500 mg/l, de  $\text{Mg}^{2+}$  1500 mg/l y de  $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$  superiores a 1500 mg/l. Estos niveles, no obstante, rara vez se alcanzan en el vertedero.

Los *metales pesados* son tóxicos a concentraciones mucho más bajas. El cobre, Cu (II) a 1 mg/l, el cinc, Zn (II) a 5 mg/l, el níquel, Ni (II) a 2 mg/l y el cadmio, Cd (II) a tan solo 0,02 mg/l.

La Tabla 21 muestra algunos *compuestos orgánicos* con efectos negativos en la generación de biogás. Concentraciones tan elevadas de estos compuestos sólo se pueden producir si en el vertedero se admiten residuos de origen industrial.

**Tabla 21.** Compuestos orgánicos inhibidores<sup>(1)</sup> de la metanogénesis

Compuesto	Concentración (mg/l)
Acetaldehído	440
Acroleína	20-50
Ácido acrílico	864
2-Etil-1-Exanol	500-1000
Formaldehído	50-100

(1) A las concentraciones indicadas se observa en laboratorio una reducción del 50% en la generación de metano en laboratorio (Gendebien, 1992)

Cuando la concentración de *sulfatos* es alta, la producción de metano cae dramáticamente. Ello no se debe a ningún efecto tóxico de los sulfatos sobre las bacterias metanogénicas, sino simplemente a una competencia entre los dos grupos de bacterias por los mismos nutrientes. La mayor energía liberada en la reducción de los sulfatos favorece el predominio de las bacterias sulfato-reductoras.

Se ha comentado que la adición de lodos de depuradora con un pH bajo puede afectar negativamente a la generación de metano. Lo mismo ocurre con la recirculación de lixiviados. Ello se debe a que las bacterias metanogénicas operan eficientemente solamente en un estrecho intervalo de pH, entre 6 y 8. El intervalo tolerado por las bacterias fermentativas y acetogénicas es mayor. Si las bacterias metanogénicas tienen una actividad baja por un descenso del pH, el consumo de hidrógeno y ácido acético será bajo. La acumulación consiguiente de ácidos orgánicos volátiles hará caer aún más el pH, lo que puede afectar aún más su actividad, pudiéndose llegar al cese de la actividad metanogénica. En cuanto a las bacterias sulfato-reductoras, toleran un intervalo de pH mayor, entre 5 y 9.

El descenso en el pH también puede ser provocado por el vertido de grandes cantidades de residuos de degradación rápida, como restos de alimentación o de limpieza de jardines.

### 2.5.3. Diseño del vertedero

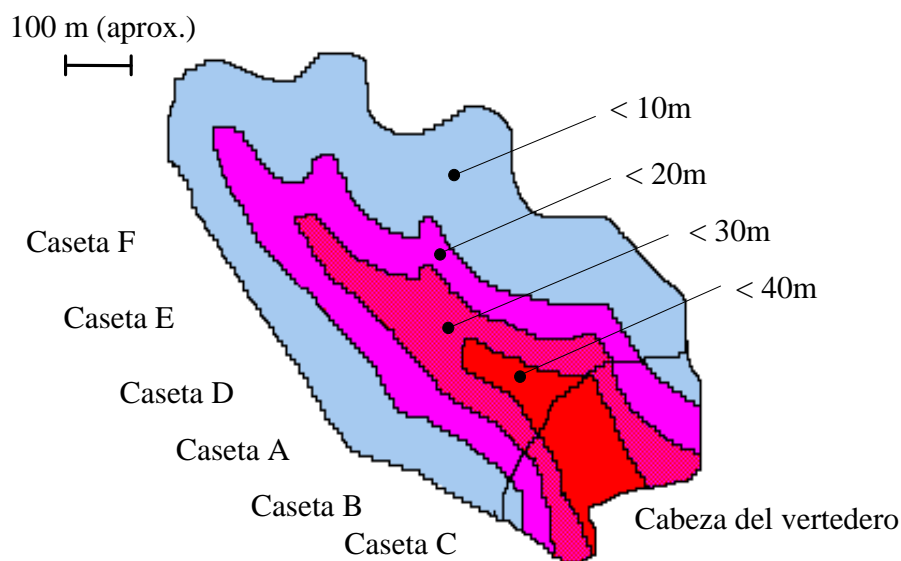
#### 2.5.3.1. Topografía

Cuando el vertedero controlado ha sido construido aprovechando depresiones naturales del terreno, valles u hondonadas, la relación entre la superficie exterior y el volumen de los residuos depositados es baja. Esto favorece la generación de biogás, pues garantiza un aislamiento térmico natural del vertedero respecto de la temperatura ambiental. También favorece la recuperación posterior del gas, siempre que el vaso de vertido haya sido correctamente impermeabilizado.

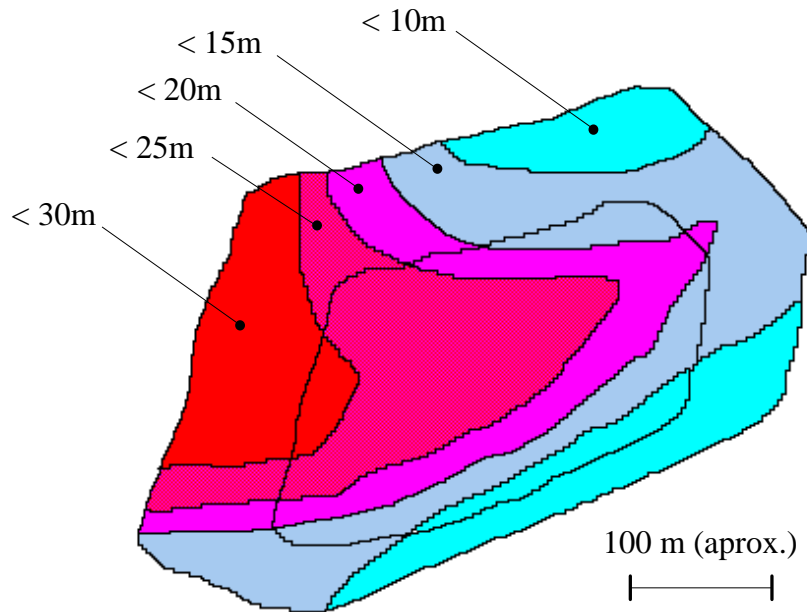
El extremo opuesto lo constituyen vertederos en zonas llanas donde las capas de residuos alcanzan cotas superiores a la del terreno circundante. Evidentemente, la relación superficie / volumen es ahora mayor y, por tanto, el vertedero está más expuesto a las condiciones térmicas ambientales. También será necesario un mayor número de sondas de captación y cada una de ellas recuperará un caudal comparativamente menor.

El análisis topográfico del vertedero debe incluir el plano de curvas de nivel inicial del vertedero y los planos de evolución del vertido, al menos en la situación actual y final del vertedero. De esta forma, es posible dividir el vertedero en distintas zonas según la antigüedad y la profundidad de los residuos. Esta división permite decidir la posición de la sonda de muestreo de modo que sean lo más representativas del vertedero. La zona de profundidad inferior a 10 m es, en principio, no sólo la de menor producción de biogás sino también donde las captaciones tienen menor eficiencia. En estas zonas la temperatura de los residuos se ve afectada por la temperatura ambiente, pudiendo descender por debajo del rango mesófilo cuando se producen heladas (Pacey, 1986). Brown y Maunder (1994) fijan en 8 metros la profundidad mínima de los residuos necesaria para una adecuada degradación anaerobia, mientras que el UK Department of the Environment (1994) en 5 metros. En el estudio llevado a cabo por Attal *et al.* (1992) en el vertedero de Villeparisis (París, Francia), con una temperatura ambiente de 14 °C, la temperatura de los residuos en los primeros 10 m aumentaba desde 26 a 50 °C, manteniéndose constante en los 15 metros restantes hasta el fondo del vertedero. Es posible que en este vertedero la flora bacteriana de la zona superficial estuviese en el rango mesófilo, mientras que en la zona profunda estuviese en el rango termófilo.

En las Figuras 10 y 11 se muestra la división en zonas de distinta profundidad de los vertederos de La Zoreda y Bratovo. Se observa el perfil más angosto y profundo del vertedero de Asturias, por tanto más favorable a la generación y recuperación del biogás.



**Fig. 10.** División en zonas de distinta profundidad del vertedero de La Zoreda



**Fig. 11.** División en zonas de distinta profundidad del vertedero de Bratovo

#### 2.5.3.2. Acondicionamiento del vaso de vertido

Un mal acondicionamiento de la zona de vertido no sólo puede provocar la contaminación de aguas subterráneas sino también la migración del biogás hacia zonas alejadas. Al ser más ligero que el aire y generarse de forma continua, el biogás tiende a salir preferentemente a través de la cobertura superficial del vertedero. Pero si la superficie presenta poca porosidad, debido a un aguacero reciente o una helada, el gas tenderá a migrar lateralmente, con el consiguiente riesgo en las edificaciones colindantes al vertedero. Se ha llegado a detectar biogás en puntos alejados 180 m del vertedero (Gendebien *et al.*, 1992) e incluso entre 300 y 400 m (UK Department of the Environment, 1994). Naturalmente, si es adecuadamente impermeabilizado en su etapa de construcción, este riesgo se evita.

#### 2.5.4. Tratamiento de los residuos

A continuación se valora la influencia que tienen en la generación de biogás las tareas de pretratamiento y vertido de los RSU, poniendo como ejemplos las recomendaciones realizadas para los vertederos de La Zoreda y Bratovo.

### 2.5.4.1. Técnicas de vertido

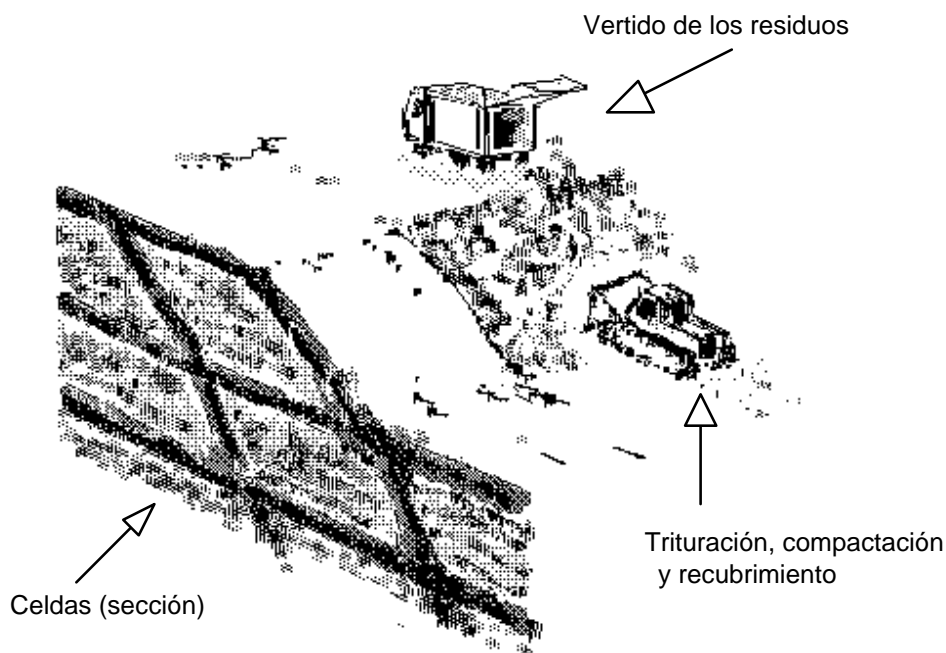
La primera característica distintiva que observamos en un vertedero es la forma en que los residuos son vertidos. Existen varias técnicas de disposición, que dependen principalmente de la orografía del terreno. Principalmente se distinguen tres:

- **Trinchera o zanja**
- **Relleno por área**
- **Celdas**

En la **técnica de trinchera**, también conocida como **zanja**, se abren trincheras apartando la tierra extraída para posteriormente utilizarla como material de relleno. Las basuras son extendidas y trituradas en las mismas trincheras.

En la **técnica de relleno o vertido por área**, representada en la Figura 12, los residuos se disponen en terrazas sobre el terreno. Esta técnica se utiliza cuando el terreno forma depresiones naturales.

En la **técnica de relleno en celdas** las basuras se vierten en áreas previamente delimitadas con diques de tierra, tal y como se observa en la Fotografía 3. Esta técnica se usa en todo tipo de entornos topográficos.



**Fig. 12.** Técnica de vertido por área



**Fotografía 3.** Relleno o vertido en celdas en el vertedero de Soignolles en Brie (Metz, Francia)

La técnica empleada tanto en el vertedero de La Zoreda como en el de Bratovo es similar al tipo *relleno por área*. Las operaciones de relleno por área siguen el siguiente método de trabajo, tal y como se observa en la Fotografía 4:

1. Los camiones de recogida vacían los residuos directamente en el frente de operación, bien desde abajo o bien desde arriba (Fotografía 4a).
2. Se extienden y compactan los residuos en capas de unos 25 cm, hasta alcanzar unos 2,5 metros de altura, procurando que el área de depósito sea lo más reducida posible, para evitar tanto la aireación de los residuos como la presencia de animales (Fotografía 4b). Los residuos se deben extender y compactar con sucesivas pasadas de la maquinaria de abajo hacia arriba, presionándolos contra el frente de vertido. Esto permite incrementar la densidad y trituración de los mismos. Debe evitarse el vuelo de papeles y bolsas instalando si es necesario redes verticales en la zona de descarga.
3. Una vez terminada la operación *diaria* se recubren los residuos con una capa de unos 15 cm de tierra (Fotografía 4c).

Estas operaciones son comunes en cualquiera de las técnicas de vertido, con las lógicas diferencias debidas a la distintas disposiciones geométricas ya comentadas. A continuación se analizan cada una de las operaciones por separado y su influencia en la generación de biogás.



**Fotografía 4a.** Fases en el vertido por área: (a) Disposición





**Fotografía 4b.** Fases en el vertido por área: (b) Trituración



**Fotografía 4c.** Fases en el vertido por área: (c) Rcubrimiento

#### 2.5.4.2. Altura de las capas de residuos

La degradación de los residuos en el vertedero provoca que se produzcan *asentamientos* en el mismo. Cuando estos asentamientos son diferenciales, es decir, tienen distinto valor entre zonas del vertedero, se producen esfuerzos cortantes que quiebran las conducciones de biogás y de lixiviados, y pueden hacer aparecer grietas en la superficie del vertedero. Experiencias en distintos vertederos indican que la altura de las capas de residuos no debe superar los 3 m, recomendándose los 2,5 m a fin de evitar estos problemas (Gendebien *et al.*, 1992). Un menor espesor de la capa de residuos se traduce también en una mayor compactación de los mismos.

Sin embargo, como puede apreciarse en las Fotografías 5, no siempre se sigue esta recomendación. En el vertedero de La Zoreda la altura de las capas es de unos 6 metros, aproximadamente igual que en el relleno de Curva de Rodas (Medellín, Colombia), como se observa en las Fotografías 5a y 5b. En el relleno sanitario de Doña Juana (Bogotá, Colombia) el espesor realmente es de 2,5 a 3 metros (Fotografía 5c). Por último, en la zona de cabeza del vertedero de Bratovo, las tongadas son de aproximadamente 2 m, aunque, sin embargo, en la cola del vertedero superan los 3 m (Fotografía 5d).

#### 2.5.4.3. Compactación

La **compactación** es el proceso por el que la basura ya depositada es aplastada por vehículos especiales. El grado de compactación deseado se logra combinando cuatro variables: el *peso de la maquinaria*, el *número de pasadas* que realiza, la *pendiente* y el *espesor* de la capa de basuras.

La *compactación* aumenta la *vida útil* del vertedero, al reducir los requerimientos de espacio; facilita el *movimiento de vehículos*; reduce el riesgo de *asentamientos* o movimientos de las basuras; reduce la presencia de *moscas* y *parásitos*; reduce el riesgo de *fuegos* en el interior del vertedero y los eventuales incendios superficiales; y aumenta la *generación de biogás*.

Cabría pensar que lo más idóneo es intentar maximizar la densidad de los residuos depositándolos, por ejemplo, como fardos o balas mediante un compactador, tal y como muestra la Fotografía 6, correspondiente al vertedero de balas de Cerceda (Galicia). Pero esto conlleva un riesgo: tan elevada densidad no permite alcanzar el grado de humedad óptimo para la fermentación de la materia orgánica, pudiendo llegar a inhibirse la producción de gas (Pacey y DeGier, 1986).

Los RSU tienen una densidad, sin compactar, entre 140 y 180 kg/m<sup>3</sup>. Los camiones de recogida aumentan esta densidad hasta los 240 - 420 kg/m<sup>3</sup>. En el vertedero, la densidad sin apenas compactación puede variar entre 360 y 450 kg/m<sup>3</sup>. Una compactación moderada debería proporcionar densidades comprendidas entre 300 y 700 kg/m<sup>3</sup>.



**Fotografía 5a.** Altura de la capa de residuos: (a) La Zoreda, Asturias



**Fotografía 5b.** Altura de la capa de residuos: (b) Curva de Rodas, Medellín



**Fotografía 5c.** Altura de la capa de residuos: (c) Doña Juana, Bogotá



**Fotografía 5d.** Altura de la capa de residuos: (d) Bratovo, Burgas

Los principales factores que afectan a la compactación son:

- *Peso de la maquinaria*
- *Número de pasadas de un compactador:* Independientemente de la máquina utilizada (ruedas de acero, neumáticos o cadenas), los mejores resultados se obtienen en 3 a 5 pasadas. Un mayor número de pasadas no proporciona un incremento de densidad apreciable y entorpece el vertido normal de los residuos
- *Las pendientes en la extensión:* Con una máquina de cadenas la mejor compactación se consigue con pendientes de 3:1. Se recomienda que la máquina ataque el talud de residuos de abajo hacia arriba. Conforme la máquina sube la pendiente, las cadenas ayudan también a desgarrar y trocear los residuos. Tanto en el vertedero de La Zoreda como en el de Curva de Rodas la maquinaria, debido a la altura del talud, ataca el frente en sentido contrario al indicado, de arriba hacia abajo.
- *Espesor de la capa de residuos:* Para obtener una alta densidad, los residuos deben distribuirse en capas sucesivas de menos de 60 cm de profundidad y compactarse. Cuanto más gruesas sean las capas, menos susceptibles son a la compactación

Comprobar la densidad de los residuos en el vertedero es tan sencillo como extraer un volumen determinado y pesarlo en el mismo lugar, tal y como muestra la Fotografía 7 (vertedero de Doña Juana - Bogotá, Colombia -).

**Fotografía 6.** Vertedero de balas (Cerceda, Galicia)



**Fotografía 7.** Comprobación de la densidad de los RSU y del espesor de cubrición (Doña Juana - Bogotá, Colombia -)

#### 2.5.4.4. Trituración

La **trituration** es el proceso por el que las bolsas se desgarran y su contenido se trocea antes de compactarse y recubrirse con material inerte. En general, son las cadenas y ruedas de las máquinas compactadoras las que llevan a cabo este cometido a la vez que compactan los residuos, como muestra la Fotografía 8. La trituración incrementa la superficie de los residuos expuesta a la actividad de las bacterias (Pacey y DeGier, 1986; Rao y Suflita, 1993). También aumenta la homogeneidad de los residuos.

En la mayoría de los países el método de recolección de los residuos domiciliarios se realiza a través de bolsas de plástico. Por tanto, la trituración de los residuos debe romper y desgarrar estas bolsas. Si esto no ocurre así, la producción de biogás puede decrecer.

La trituración de los RSU, al facilitar la acción biológica, puede provocar una fase inicial ácida más intensa, retrasándose la metanogénesis. A largo plazo, no obstante, el efecto es positivo, ya que la hidrólisis, que es la etapa limitante de la degradación anaerobia, se completa en un tanto por ciento mayor con una buena trituración.



**Fotografía 8.** Compactación y trituración de los RSU (vertedero de Cerro Patacón, Área Metropolitana de Panamá)

#### 2.6.4.5. Cobertura

La **cobertura** o **recubrimiento** es la operación por la cual las basuras depositadas y ya compactadas son tapadas diariamente con material inerte.

El *recubrimiento* diario de las basuras minimiza el *vuelo de papeles*, plásticos, etc.; posibilita el *movimiento de vehículos*; reduce los *olores* en el vertedero; evita el contacto de los residuos con el oxígeno del *aire*, reduciendo la fase aerobia inicial; inhibe la aparición de *roedores* y *aves*; reduce la entrada de *agua de lluvia*; y reduce el riesgo de *incendios*.

La *cobertura final* es de gran importancia para la clausura y recuperación final del vertedero. La calidad y espesor de esta cobertura depende del uso que se le vaya dar al lugar. Generalmente la capa consiste, de abajo a arriba, de un drenaje de biogás, una zona impermeable al agua, una zona de drenaje de aguas y una capa final de tierra con vegetación. Se puede instalar una doble barrera que incluya una zona de recogida de filtraciones y lixiviados intermedia.

Que los residuos sean o no sean recubiertos diariamente con material inerte determinará el tipo de proceso biológico que tendrá lugar en un vertedero. Para la obtención de biogás es imprescindible la no aireación de los residuos y, por tanto, su cubrición periódica. En cuanto al espesor de la capa de recubrimiento, debe ser el suficiente para que la degradación de los residuos no se vea afectada por los cambios meteorológicos y, además, no se facilite la penetración de aire.

En el vertedero de La Zoreda la cobertura de los residuos se realiza con una mezcla de escoria de acería y tierra extraída de los laterales de la zona de vertido. El espesor de las capas es suficiente, entre 20 y 40 cm.

En el vertedero de Bratovo la cobertura de los residuos se realiza con tierra arcillosa procedente de los laterales del vertedero. En la cabeza del vertedero, la disposición y cubrición de los residuos se realiza de forma correcta, aunque se observó que algunos conductores no se acercan suficientemente al talud para verter su carga, por miedo a dañar sus vehículos al pisar vidrios u otros materiales cortantes depositados con anterioridad. Esto disminuye la calidad de la cubrición, por lo que se recomendó evitarlo.

Más importante en Bratovo es la situación en la cola del vertedero, donde se vierten la mayor parte de los residuos en los meses lluviosos, debido a los problemas de tránsito que acarrea el agua. En esta zona, el talud, mucho más alto, permanece mucho tiempo expuesto al aire antes de su cubrición.



#### 2.5.4.6. Recirculación de lixiviados

Como se ha comentado en apartados previos, el agua constituye el canal a través del cual los microorganismos responsables de la generación del biogás colonizan todas las zonas del vertedero. Estos microorganismos, además, necesitan un medio húmedo para su desarrollo.

Los efectos de la *recirculación de lixiviados* sobre el vertedero en la generación de biogás han sido estudiados a pequeña y gran escala en plantas de laboratorio. Es una medida positiva para mantener alta la humedad de los residuos y potenciar así la generación de biogás (Rao y Suflita, 1993; Brown y Maunder, 1994).

Si el lixiviado no es recirculado y presenta niveles de DBO altos, el resultado es una pérdida de nutrientes negativa para la metanogénesis (UK Department of the Environment, 1994).

En zonas húmedas, la recirculación es beneficiosa durante los primeros años del vertedero, hasta que el proceso biológico se estabiliza. No obstante, si el pH del lixiviado es bajo, se debe ajustar mediante sustancias moderadoras (hidróxido sódico, por ejemplo). Cuando el vertedero mantiene niveles de humedad aceptables y la DBO del lixiviado es baja, la recirculación tiene pocos efectos. En vertederos de climas secos, la recirculación continúa siendo positiva durante períodos de tiempo más largos, pues la metanogénesis es más lenta (Christensen *et al.*, 1996).

Cuando se utiliza material arcilloso para la cobertura diaria de los residuos, la recirculación de lixiviados por irrigación provoca el hinchamiento de las arcillas y, con ello, mejora el carácter impermeable del terreno. Esto redundaría en un mayor rendimiento del sistema de recuperación del biogás, tal y como se ha comentado en el Apartado 2.2.4.

La recirculación no debe, en ningún caso, conducir a la inundación del vertedero, pues ello hace imposible la recuperación del biogás en los pozos de captación y puede provocar migraciones de biogás disuelto en el lixiviado de difícil control, además de otros riesgos para el vertedero como la inestabilidad de taludes o la fuga de lixiviados a través del fondo del vaso de vertido.

La recirculación de lixiviados no es, en ningún caso, un método válido de tratamiento de los mismos. Es necesario disponer de plantas de tratamiento específicas para tal fin en los vertederos controlados.

### 2.5.5. Sistema de extracción de biogás

Es necesario también considerar, caso de que exista, la posible influencia del sistema de extracción de biogás. La extracción del biogás mediante sondas sometidas a una cierta depresión relativa provoca inevitablemente la entrada de aire al interior del vertedero, como se ha comentado en el Apartado 2.4.4. Aunque el aire penetra superficialmente y sólo en el entorno del pozo de captación, la presencia de oxígeno altera las condiciones anaerobias en esa zona. Si el vertedero es sometido a una sobre-extracción de biogás, la entrada de aire puede repercutir negativamente en el caudal y la composición del biogás generado.

No debe confundirse el caudal generado de biogás en un vertedero con el caudal recuperado por el sistema de extracción. La tasa de recuperación depende del correcto diseño y operación de la red de captación y del grado de impermeabilidad del material utilizado en la cobertura superficial del vertedero y en el sellado del vaso de vertido.

Por ejemplo, es habitual observar un incremento en el caudal de biogás recuperado inmediatamente después de un aguacero que interrumpa un período de sequía. Aunque la lluvia es positiva para la metanogénesis, sus efectos no son inmediatos. En realidad, la causa del incremento del caudal recuperado está en el hinchamiento de la arcilla de cobertura, que mejora su carácter impermeable.

También es habitual observar que aumenta el caudal de biogás recuperado después de una helada nocturna, pese a que este meteoro no beneficia en absoluto la generación de biogás. Nuevamente, la causa del incremento del caudal recuperado está en la impermeabilización de la superficie por el hielo.

Finalmente, al clausurar un vertedero, si se construye una barrera impermeable superficial, también aumenta el caudal de biogás recuperado, aún cuando el caudal de gas generado decrece al no existir nuevos aportes de materia orgánica. La causa es, también aquí, el aumento del rendimiento del sistema de recuperación por una mejor impermeabilización de la superficie del vertedero.

## 2.6. Modelo de cálculo de la producción de biogás

El caudal de biogás recuperable en un vertedero controlado puede ser estimado mediante modelos matemáticos a partir de los datos de composición de los RSU y cantidades vertidas anualmente. El resultado obtenido, no obstante, está sujeto al contraste con los resultados experimentales de ensayos en campo y al estudio y caracterización del vertedero, tal y como se explicará en el Apartado 5. Los resultados obtenidos con este tipo de modelizaciones siempre deben ser analizados con prudencia (Eden, 1990; Brown y Maunder, 1994).

El contenido de este apartado se ha subdividido en tres puntos. Primeramente, se establece el volumen total de biogás que produce la degradación anaerobia de una cantidad determinada de residuos de composición conocida; a continuación, se propone un modelo para el cálculo del caudal recuperado anualmente en un vertedero, desde su inauguración hasta después de su clausura, suponiendo conocida la cantidad y composición de los RSU depositados anualmente; y, finalmente, se propone una adaptación de este modelo para el cálculo del caudal mensual recuperable de biogás en cada zona o celda de vertido.

Como ejemplos de aplicación se utilizan los datos experimentales obtenidos en los vertederos de La Zoreda y Bratovo.

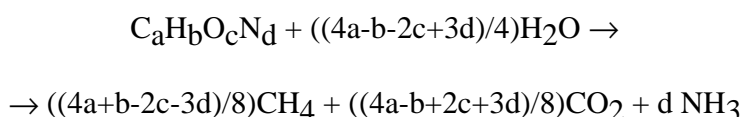
Para un contraste con otros modelos matemáticos de la generación de biogás, recomendamos acudir a Young, 1989; Gendebien *et al.*, 1992; Marticorena *et al.*, 1993; Lee *et al.*, 1993; Coops *et al.*, 1995; y Christensen *et al.*, 1996.

### 2.6.1. Volumen total de biogás generado y recuperado por la degradación de los RSU

En este apartado se calcula la cantidad total de biogás que se genera a partir de una tonelada de residuo en el vertedero y que puede ser efectivamente recuperada, en función de la composición de los RSU.

#### 2.6.1.1. Producción teórica de metano según la Demanda Química de Oxígeno

La materia orgánica se transforma en una degradación anaerobia en metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) según la siguiente reacción:



[2-6]

$C_aH_bO_cN_d$  representa la fórmula característica de la materia orgánica, donde los coeficientes estequiométricos  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$  deben ajustarse dependiendo de la composición exacta de los residuos.

Teóricamente, se puede relacionar la producción de biogás con la Demanda Química de Oxígeno (DQO). La DQO se define como la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar químicamente un determinado sustrato. No toda la materia orgánica oxidable químicamente lo es biológicamente. Así, por ejemplo, los hidrocarburos aromáticos (benzeno, tolueno, etc.) no son degradables biológicamente aunque estén reflejados en la DQO porque sí lo son químicamente. Por tanto, al calcular la producción de biogás, que depende del grado de biodegradabilidad del sustrato, en función de la DQO, se comete un error por exceso. Esta consideración será tenida en cuenta.

Suponiendo ahora que la degradación de la materia orgánica fuera completa, el oxígeno necesario para oxidar 1 gramo de materia orgánica inicial sería igual al oxígeno necesario para oxidar el volumen de metano generado anaerobiamente a partir de ese sustrato.

En la combustión de un mol de metano se consumen dos moles de oxígeno. Es decir, para oxidar completamente un mol de metano (16 gramos de metano) son necesarios dos de oxígeno (64 gramos de oxígeno). La DQO del metano es, por tanto, de 4 g de oxígeno/g de metano. Si la  $DQO_{mat.org.}$  es de  $x$  gramos de oxígeno por gramo de materia orgánica, su degradación anaerobia completa debe generar  $x/4$  gramos de metano. Es decir, se generan 0,25 g de metano por cada gramo de  $DQO_{mat.org.}$ , lo que equivale a  $0,35 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$  de metano a  $0^\circ\text{C}$  y 1 bar de presión (condiciones *estándar* de presión y temperatura, en las que el volumen medido se denomina "normal" -  $\text{m}^3\text{N}$  -).

<b>Producción de metano, <math>350 \text{ m}^3\text{N/t DQO}</math></b>
---

La producción de metano por kg de DQO de materia orgánica es  $0,35 \text{ m}^3\text{N}$ . Esta es la producción máxima, es decir, supone la degradación biológica total de las basuras, algo que ciertamente no ocurre en el vertedero, ya sea por su ineficiente funcionamiento como digestor anaerobio o bien por el hecho de que no toda la materia orgánica vertida es oxidable biológicamente. Los RSU sólo contienen un cierto porcentaje de "*materia orgánica degradable anaerobiamente*". Naturalmente dentro de este concepto entran una amplia variedad de compuestos cuya DQO es distinta, como se comenta a continuación.

2.6.1.2. Influencia de la composición de los residuos urbanos

En una primera aproximación a la composición de los residuos, se puede distinguir el porcentaje *no biodegradable anaerobiamente*, **materia inerte**, y el porcentaje *biodegradable anaerobiamente*, **materia orgánica**. Dentro del porcentaje de materia orgánica se distinguen generalmente las fracciones de restos de alimentación, limpieza de jardines, papel, cartón y madera. La velocidad con que cada uno de estos componentes es degradado de forma anaerobia es distinta.

En la Tabla 22 se observan distintos valores, según el componente, del tiempo necesario para la degradación anaerobia del 50% de una muestra. La falta de consenso entre distintos autores puede deberse al distinto criterio a la hora de clasificar el residuo o a distintas condiciones de ejecución del ensayo (temperatura, humedad, grado de trituración, etc.).

**Tabla 22.** Tiempo necesario en años para la degradación del 50% de una muestra según su composición

Componente	Palmer, 1985 <sup>(1)</sup> Hoeks, 1983 <sup>(2)</sup>	Stegmann, 1978/9 <sup>(2)</sup>	Ham <i>et al.</i> , 1979 <sup>(2)</sup>	Moolenaar, 1981 <sup>(2)</sup>	Bowermann, 1976 <sup>(2)</sup>	Coops <i>et al.</i> , 1995
Alimentación	1	1,5	1	1-5	0,4	5,4
Jardín	5	1,5	15	5-25	0,4	5,4
Papel	15	25	15	1-5	0,6	10
Cartón	15	25	15	5-25	0,6	10
Madera	15	-	15	20-100	0,6	33,3

<sup>(1)</sup> Gendebien *et al.*, 1992

<sup>(2)</sup> Christensen *et al.*, 1996

Con objeto de lograr una mayor sencillez del modelo, se consideran en este trabajo únicamente dos fracciones dentro de la materia orgánica biodegradable: la fracción de *alta degradabilidad*, compuesta por restos de alimentación y jardín, y la de *degradabilidad media*, compuesta por papel, cartón y madera.

La menor velocidad de degradación de algunos materiales se debe a su alto contenido en celulosa, hemicelulosa y lignina, cuya hidrólisis es lenta. No debe extrañar descubrir un periódico prácticamente legible aún después de años en un vertedero (Suflita *et al.*, 1992).

La composición del sustrato afecta no sólo a la velocidad de degradación sino también a la DQO, como es lógico. En la Tabla 23 se muestra la DQO de distintos compuestos orgánicos y el caudal teórico máximo de metano que se puede generar a partir de ellos.

**Tabla 23.** Producción teórica máxima de biogás a partir de distintos compuestos orgánicos

Compuesto	Fórmula	DQO (g/g)	Metano (m <sup>3</sup> N/kg)	Biogás (m <sup>3</sup> N/kg)	% en metano
Celulosa	(C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub> ) <sub>x</sub>	1,185	0,415	0,830	50,0
Proteínas	(C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> ON) <sub>y</sub>	1,619	0,567	1,100	51,5
Lípidos	(C <sub>55</sub> H <sub>106</sub> O <sub>6</sub> ) <sub>z</sub>	2,914	1,020	1,428	71,4

Fuente: Gendebien *et al.*, 1992

Se supondrá una DQO media, por g de sustrato seco, para la *materia orgánica de alta degradabilidad* (alimentación, restos de jardín, etc.), por su mayor contenido en proteínas y lípidos, de 1,52 g y, para la *materia orgánica de media degradabilidad* (papel, cartón, etc.), por su mayor contenido en celulosa, de 0,95 g.

La producción de metano teórica máxima por tonelada de materia orgánica seca será, por tanto, de 532 m<sup>3</sup>N para la fracción de alta degradabilidad y de 332,5 m<sup>3</sup>N para la fracción de media degradabilidad.

Este cálculo, basado en la DQO del sustrato, produce un error por exceso, como ya se ha comentado, pues no toda la materia orgánica químicamente degradable lo es biológicamente. Estimaremos que sólo un 70% de la DQO corresponde a materia biológicamente degradable.

El vertedero tampoco es un reactor anaerobio totalmente eficiente. La mineralización incompleta se debe a factores tales como el *grado de trituración de las basuras*, su mayor o menor *compactación*, la falta de *agua* en el vertedero, etc. El metano que efectivamente se genera en un vertedero está entre un 40 y un 50% del teórico (Suflita *et al.*, 1992; Marticorena *et al.*, 1993; Coops *et al.*, 1995). En este estudio se admitirá un rendimiento de mineralización del 45%.

De esta forma, la producción total de metano por tonelada de materia orgánica seca es de 168 m<sup>3</sup>N para la fracción de alta degradabilidad y de 105 m<sup>3</sup>N para la fracción de media degradabilidad.

**Producción de metano,**

- 168 m<sup>3</sup>N/t de materia orgánica de alta degradabilidad seca
- 105 m<sup>3</sup>N/t de materia orgánica de media degradabilidad seca

Las basuras depositadas en el vertedero contienen un porcentaje de **humedad** variable, que podemos estimar en 35 g de agua por cada 100 g de materia orgánica vertida. En los cálculos debemos distinguir entre la cantidad de materia orgánica *húmeda* vertida y la cantidad de materia orgánica *seca* que se transforma en metano. Por tanto, la producción teórica de metano por tonelada de materia orgánica húmeda será de 109 m<sup>3</sup>N de metano para la fracción de alta degradabilidad y 68 m<sup>3</sup>N para la fracción de degradabilidad media.

**Producción de metano,**

- 109 m<sup>3</sup>N/t de materia orgánica de alta degradabilidad húmeda
- 68 m<sup>3</sup>N/t de materia orgánica de media degradabilidad húmeda

2.6.1.3. Caudal de biogás recuperable

El contenido en metano del biogás varía según el compuesto que se degrade, como refleja la ya citada Tabla 23. Suponiendo una **composición del biogás recuperado** del 50% en volumen de gas seco de metano, valor habitual en los vertederos según la bibliografía y nuestros análisis, la producción de *biogás* por tonelada de materia orgánica húmeda será de 218 m<sup>3</sup>N/t para la fracción de alta degradabilidad y 136 m<sup>3</sup>N/t para la de degradabilidad media.

Ningún sistema de captación del biogás es perfecto, por lo que parte del biogás generado se perderá como ya hemos comentado. Se puede considerar normal la **recuperación** del 70% del gas generado. Teniendo esto en cuenta, la producción teórica recuperable de biogás por tonelada de materia orgánica húmeda será de 153 m<sup>3</sup>N y 95 m<sup>3</sup>N para la fracción de alta y media degradabilidad respectivamente.

**Volumen recuperable de biogás, al 50% de metano,**

- 153 m<sup>3</sup>N/t de materia orgánica de alta degradabilidad húmeda
- 95 m<sup>3</sup>N/t de materia orgánica de media degradabilidad húmeda

Finalmente, suponiendo que la composición de los residuos fuera de un 50% de restos de alimentación y jardín, y un 25% de papel y cartón, la producción total de biogás por tonelada de RSU será de 143 m<sup>3</sup>N y la producción recuperable de biogás, 100 m<sup>3</sup>N.

La fórmula [2-7] resume el proceso del cálculo realizado:

$$V = K \times (1-H) \times (1/M) \times R \times \alpha \times \beta \times \{ A \times X + B \times Y \} \quad [2-7]$$

donde,

**V** caudal de biogás (50% de metano) por t de RSU húmedo, 50% moderadamente biodegradable y 25% lentamente biodegradable ( $V=100 \text{ m}^3\text{N/t}$ )

**K** caudal de metano generado por unidad de DQO ( $K=350 \text{ m}^3\text{N/t}$ )

**H** humedad de los residuos (0,35)

**M** contenido en metano del biogás(0,50)

**R** rendimiento de la captación (0,70)

**$\alpha$**  relación biodegradabilidad frente a DQO (0,70)

**$\beta$**  rendimiento de mineralización (0,45)

**A** t de DQO/t de materia orgánica de alta degradabilidad (1,52)

**X** porcentaje de materia orgánica de alta degradabilidad (0,50)

**B** t de DQO/t de materia orgánica de media degradabilidad (0,95)

**Y** porcentaje de materia orgánica de media degradabilidad (0,25)

La Tabla 24 resume algunos valores encontrados en la bibliografía. La gran disparidad de valores da una idea del riesgo inherente a este tipo de modelos matemáticos. No obstante, el diferente criterio con que se ha llegado a cada uno de estos valores los hace a veces no totalmente comparables.



**Tabla 24.** Producción de biogás por tonelada de RSU según distintos autores

<b>Autores</b>	<b>Cantidad de biogás generada (50% CH<sub>4</sub>) (m<sup>3</sup>N/t de RSU)</b>
Rhyne (1974)	437
(3)Cooney y Wise (1975)	224-328
(3)Pfeffer (1976)	131-182
Tabasaran (1976)	60-180
Rasch (1976)	300
Augenstein et al. (1976)	128
Bowermann (1977)	50
Rettenberger (1978)	200
Stegmann (1978)	250
Ham (1979)	120-310
Beker (1981)	250
(3)Chakraverty <i>et al.</i> (1981)	91-413
Hoeks y Oosthoek (1981)	200
Pacey (1981)	225
(2)Ferotte <i>et al.</i> (1982)	210
Hoeks (1983)	300
Stegmann (1983)	120-150
Campbell (1985)	100-400
(3)Doedens (1985)	50-114
(2)Mouton <i>et al.</i> (1985)	60-100
Stegmann (1986)	120-150
(1)Kinman <i>et al.</i> (1987)	200
Wise et al. (1987)	100-400
(2)Findikakis <i>et al.</i> (1988)	180
(1)Marique <i>et al.</i> (1989)	240
(1)Barlaz <i>et al.</i> (1989)	70
(2)Baubeau (1989)	50
(4)Gendebien <i>et al.</i> (1992)	210
(2)Attal <i>et al.</i> (1992)	90
(1)Marticorena <i>et al.</i> (1993)	130
INSTITUTO DE ENERGÍA RENOVABLE DE ESPAÑA	90-100

(1) Citados por Marticorena *et al.*, 1993. En su trabajo supone un rendimiento de captación del 40-50%, por lo que el caudal recuperado sería menor

(2) Citados por Attal *et al.*, 1992. No especifica el rendimiento de captación

(3) Citados por Hans-Jügen Ehrig (Christensen *et al.*, 1996)

(4) En su trabajo supone un rendimiento de captación del 70%. El resto de citas de la Tabla han sido tomadas de su libro

Attal *et al.* (1992) ha calculado la producción de biogás para cada uno de los componentes de los RSU, como se muestra en la Tabla 25.

**Tabla 25.** Producción de biogás de cada uno de los componentes de los RSU

Componente	Volumen de Biogás [m <sup>3</sup> N/t]
Restos de comida	51,5
Restos vegetales	52,4
Papel	44,9
Madera	5,5
Textiles y cuero	8,5
Plásticos	9,3
Cristal y metales	0
Otros	38,9

Fuente: Attal *et al.*, 1992

### 2.6.2. Cálculo de la velocidad de generación de biogás en un vertedero

La velocidad con que se destruye la materia orgánica en el vertedero puede suponerse directamente proporcional a la cantidad de materia aún no degradada, que denominamos  $C(t)$ , o a una potencia de ella,  $C^n(t)$ . Los distintos modelos cinéticos propuestos en la bibliografía se diferencian en el valor de esta constante  $n$ . Así tenemos los modelos de orden cero, donde  $n=0$  y por tanto la velocidad de destrucción de la materia orgánica es constante; los modelos de primer orden, donde  $n=1$ ; y los modelos de segundo orden, con  $n=2$ . Órdenes de reacción mayores no proporcionan mejores resultados. De hecho, la ecuación de primer orden proporciona una mejor modelización de la generación de biogás en el vertedero que la de segundo orden según algunos autores (Marticorena, 1993; Coops *et al.*, 1995). Tomaremos pues la ecuación [2-8] correspondiente a  $n=1$ :

$$- dC/dt = k C(t) \quad [2-8]$$

donde  $k$  es una constante que refleja la velocidad con que la materia orgánica se degrada. Más adelante profundizaremos en su significado.

Integrando esta expresión, obtenemos la cantidad de materia orgánica aún no degradada en un instante  $t$ :

$$C(t) = C_0 e^{-kt} \quad [2-9]$$

donde  $C_0$  es la cantidad de materia orgánica inicialmente presente.

La producción de biogás es proporcional a la cantidad de materia orgánica destruida, según se ha explicado en el apartado anterior. Para un instante  $t$  determinado, la producción de biogás acumulada desde el principio de la degradación será proporcional a la cantidad de materia orgánica destruida desde el instante cero:

$$D(t) = \alpha C_0 (1 - e^{-kt}) \quad [2-10]$$

donde  $\alpha$  es la constante de proporcionalidad, que refleja la eficiencia en la conversión de la materia orgánica en biogás.

Podemos calcular el caudal de biogás producido entre  $(t-1)$  y  $t$ , es decir, el caudal de gas correspondiente al año  $t$ . Se supone que para  $t = 0$  la producción de gas es nula.

$$Q(t) = D(t) - D(t-1) = \alpha C_0 (e^{k} - 1) e^{-kt} \quad [2-11]$$

La constante  $k$  hace referencia a la mayor o menor velocidad de degradación de los residuos. Para expresar esta constante en unidades de tiempo, sustituimos por su inversa  $d = 1/k$ . La nueva constante  $d$  se denomina **tiempo de degradación**. Para  $t = d$  se ha generado un 63% del total de gas, según se puede deducir de la fórmula (2-11).

La velocidad de degradación depende del *tipo de sustrato*. Los restos de papel, cartón y madera degradan más lentamente que los restos de alimentación y de jardín. En la Tabla 22, ya comentada, se han recogido distintos valores propuestos en la literatura del tiempo necesario para la degradación del 50% de una muestra,  $t_{1/2}$ , según su composición.

No existe consenso sobre cuál es el tiempo que tardan los residuos en mineralizarse completamente en un vertedero. Marticorena *et al.* (1993) cita períodos de generación de biogás en vertederos de entre 12 años (Findikakis *et al.*, 1988) y 20 años (Bogner *et al.*, 1989). Attal *et al.* (1992) cita incluso tiempos mayores, de entre 20 y 25 años (Mounton *et al.*, 1985). En su trabajo, Marticorena *et al.* (1993) encuentra una relación entre el *contenido en humedad* de los residuos y el tiempo necesario para su completa degradación. Muestras de 6 años de antigüedad tomadas en un vertedero húmedo se encuentran totalmente mineralizadas, mientras que otras muestras, recogidas en un vertedero más seco, están poco degradadas 10-15 años después de su vertido. Esta relación entre la humedad de los residuos y el tiempo de degradación es ratificada por otros autores (Pohland y Al-Yousfi, 1995). Los valores utilizados en este trabajo para la constante  $d$ , expresada en años, se representan en la Tabla 26.

**Tabla 26.** Valores del tiempo de degradación,  $d$  (años)

	Vertederos Húmedos	Vertederos Secos
Fracción de degradabilidad alta, $d_x$	1	5
Fracción de degradabilidad media, $d_y$	15	20

El producto  $\alpha C_o$  representa la cantidad total de biogás producida por cada tonelada de residuos depositada en el vertedero. La Tabla 27 muestra los valores de este producto en los supuestos recogidos en el Apartado 2.6.1.3.

**Tabla 27.** Producción de biogás por tonelada de residuo según su grado de degradabilidad

Degradabilidad alta	153 m <sup>3</sup> N/t
Degradabilidad media	95 m <sup>3</sup> N/t

Denominando  $X$  e  $Y$  a las fracciones de residuos de degradabilidad alta y media respectivamente, podemos transformar la fórmula (2-11) de la forma siguiente:

$$Q(t) = 153 X (e^{1/d_x} - 1) e^{-t/d_x} + 95 Y (e^{1/d_y} - 1) e^{-t/d_y} \quad [2-12]$$

donde  $Q(t)$  se expresa en m<sup>3</sup>N/t,  
 $t, d_x$  y  $d_y$  en años  
 $X$  e  $Y$  en %

Para facilitar los cálculos, se indican en la Tabla 28 los valores del caudal de biogás generado en vertederos húmedos y secos por tonelada de materia orgánica de degradabilidad alta y media respectivamente.

Para obtener la producción de biogás en el vertedero, se modeliza éste como un conjunto de capas de residuos de distinta antigüedad superpuestas unas a otras. Se calculan las producciones de biogás por año correspondientes a los distintos vertidos. Ya que el caudal de biogás que se genera en cada capa en un momento dado se mezcla con el de las otras y escapa a la atmósfera o es recogido por un sistema de captación, para calcular la producción de biogás en el vertedero en el año  $t$  debemos calcular la producción de biogás correspondiente a ese año en cada una de las capas, teniendo en cuenta la distinta cantidad de residuos vertida y su distinta antigüedad, y sumarlas, como indica la fórmula (2-13).

$$Q_{\text{Total}}(t) = \sum T_i Q_i(t-t_i), \text{ para } i = 0,1,2,\dots,n \text{ capas} \quad [2-13]$$

donde,

$T_i$  es igual al número de toneladas de RSU vertidas en la capa  $i$ -ésima  
 $Q_i$  es el caudal de biogás que produce la capa  $i$ -ésima  
 $t_i$  es el año en que fueron vertidos los residuos de la capa  $i$ -ésima  
 $(t-t_i)$  es, por tanto, la antigüedad de la capa  $i$ -ésima

**Tabla 28.** Caudal de biogás generado por tonelada de materia orgánica

TIEMPO [años]	VERTEDEROS HÚMEDOS		VERTEDEROS SECOS	
	FRACCIÓN DE DEGRADABILIDAD ALTA $153(e-1)e^{-t/1}$ [m <sup>3</sup> N/h]	FRACCIÓN DE DEGRADABILIDAD MEDIA $95(e^{1/15}-1)e^{-t/15}$ [m <sup>3</sup> N/h]	FRACCIÓN DE DEGRADABILIDAD ALTA $153(e^{1/5}-1)e^{-t/5}$ [m <sup>3</sup> N/h]	FRACCIÓN DE DEGRADABILIDAD MEDIA $95(e^{1/20}-1)e^{-t/20}$ [m <sup>3</sup> N/h]
1	96.71	6,13	27.73	4,63
2	35.58	5,73	22.71	4,41
3	13.09	5,36	18.59	4,19
4	4.82	5,02	15.22	3,99
5	1.77	4,69	12.46	3,79
6	0.65	4,39	10.20	3,61
7	0.24	4,11	8.35	3,43
8	0.09	3,84	6.84	3,26
9	0.03	3,59	5.60	3,11
10	0.01	3,36	4.58	2,95
11	0.00	3,15	3.75	2,81
12	0.00	2,94	3.07	2,67
13	0.00	2,75	2.52	2,54
14	0.00	2,58	2.06	2,42
15	0.00	2,41	1.69	2,30
16	0.00	2,25	1.38	2,19
17	0.00	2,11	1.13	2,08
18	0.00	1,97	0.93	1,98
19	0.00	1,85	0.76	1,88
20	0.00	1,73	0.62	1,79
21	0.00	1,62	0.51	1,70
22	0.00	1,51	0.42	1,62
23	0.00	1,41	0.34	1,54
24	0.00	1,32	0.28	1,47
25	0.00	1,24	0.23	1,40
26	0.00	1,16	0.19	1,33
27	0.00	1,08	0.15	1,26
28	0.00	1,01	0.13	1,20
29	0.00	0,95	0.10	1,14
30	0.00	0,89	0.08	1,09
31	0.00	0,83	0.07	1,03
32	0.00	0,78	0.06	0,98
33	0.00	0,73	0.05	0,94
34	0.00	0,68	0.04	0,89
35	0.00	0,64	0.03	0,85
<b>TOTAL</b>	<b>100,00%</b>	<b>90,30%</b>	<b>99,75%</b>	<b>82,62%</b>

Este modelo ha sido contrastado con datos reales obtenidos del vertedero de **La Zoreda**. De forma aproximada, entre los años 1993 y 1996 el caudal medio de biogás recuperado aumentó desde 3000 m<sup>3</sup>N/h hasta más de 4000 m<sup>3</sup>N/h. En la Tabla 17 se han resumido las cantidades vertidas en La Zoreda desde su creación y una estimación del vertido hasta su clausura en el año 2005. En la Tabla 20 se ha analizado la composición de los residuos depositados. Según dicha tabla, el porcentaje de residuos de degradabilidad alta en Asturias es del 50,6% mientras que el de degradabilidad moderada del 15,6%. No existe conocimiento del contenido en humedad de los RSU, por lo que se mantendrá la hipótesis del 35%. El contenido en metano del biogás recuperado en La Zoreda es exactamente el 50%. Supondremos un rendimiento del sistema de recuperación del 70%, ya que no se dispone de datos para su modificación. Como se ha indicado en el Apartado 2.5.1, el vertedero de La Zoreda, con una precipitación mensual media de 83,6 l/m<sup>2</sup> (1003 mm anuales), es un vertedero *húmedo*. La técnica de disposición de los residuos, explicada en el Apartado 2.5.4, permite modelizar el vertedero como un conjunto de capas superpuestas de distinta antigüedad.

Se ha calculado la producción de biogás recuperable en el vertedero de La Zoreda. La Figura 13 muestra estos resultados de forma gráfica, que se indican también en la Tabla 29.

El modelo también ha sido ensayado en el vertedero de **Bratovo**. Las cantidades de RSU vertidas por año en este vertedero se han indicado en la Tabla 18 y la composición de los residuos en la Tabla 20 (26,6% de materia orgánica y 20,2% de papel y cartón). El contenido en humedad de los RSU es del 39%. El contenido en metano del biogás recuperado es, según los estudios realizados, del 45%. Supondremos un rendimiento de la recuperación del 70%. El índice de precipitaciones medio es de 41,9 l/m<sup>2</sup>, que consideraremos *húmedo* a efectos del modelo, aunque sea sensiblemente inferior al del vertedero de La Zoreda (Apartado 2.5.1). La técnica de disposición de los residuos en el vertedero de Bratovo permite modelizar el vertedero como un conjunto de capas superpuestas de distinta antigüedad (Apartado 2.5.4).

Los efectos de la distinta composición del biogás y del distinto contenido en humedad sobre los valores de producción de biogás por tonelada de residuo se compensan mutuamente. Los valores del biogás recuperable por tonelada serían ahora 152,5 m<sup>3</sup>N/h para materia de degradabilidad alta (frente a 153) y 94,7 m<sup>3</sup>N/h para degradabilidad media (frente a 95).

Los resultados de la aplicación del modelo matemático se ofrecen de forma gráfica en la Figura 14 y numéricamente en la Tabla 30.

**Tabla 29.** Producción de biogás recuperable en el vertedero de La Zoreda

<b>Año</b>	<b>Volumen de biogás (m<sup>3</sup>N/h)</b>
1986	0
1987	695
1988	1476
1989	1919
1990	2220
1991	2573
1992	2889
<b>1993<sup>(1)</sup></b>	<b>3137</b>
<b>1994<sup>(1)</sup></b>	<b>3585</b>
<b>1995<sup>(1)</sup></b>	<b>4003</b>
<b>1996<sup>(1)</sup></b>	<b>4177</b>
1997	4260
1998	4309
1999	4343
2000	4372
2001	4397
2002	4420
2003	4441
2004	4461
<b>2005<sup>(2)</sup></b>	<b>4480</b>
2006	4497
2007	1945
2008	987
2009	617
2010	465
2011	393
2012	353
2013	324
2014	301
2015	281

(1) Años tomados como referencia

(2) Año de clausura del vertedero

**Tabla 30.** Producción de biogás recuperable en el vertedero de Bratovo

<b>Año</b>	<b>Volumen de biogás (m<sup>3</sup>N/h)</b>
1983	0
1984	169
1985	246
1986	287
1987	316
1988	340
1989	364
1990	388
1991	430
1992	402
1993	431
1994	507
<b>1995<sup>(1)</sup></b>	<b>582</b>
1996	633
1997	676
1998	717
1999	758
2000	801
2001	822
2002	836
2003	847
2004	856
2005	864
2006	871
<b>2007<sup>(2)</sup></b>	<b>878</b>
2008	885
2009	444
2010	274
2011	204
2012	172

(1) Año tomado como referencia

(2) Año de clausura del vertedero



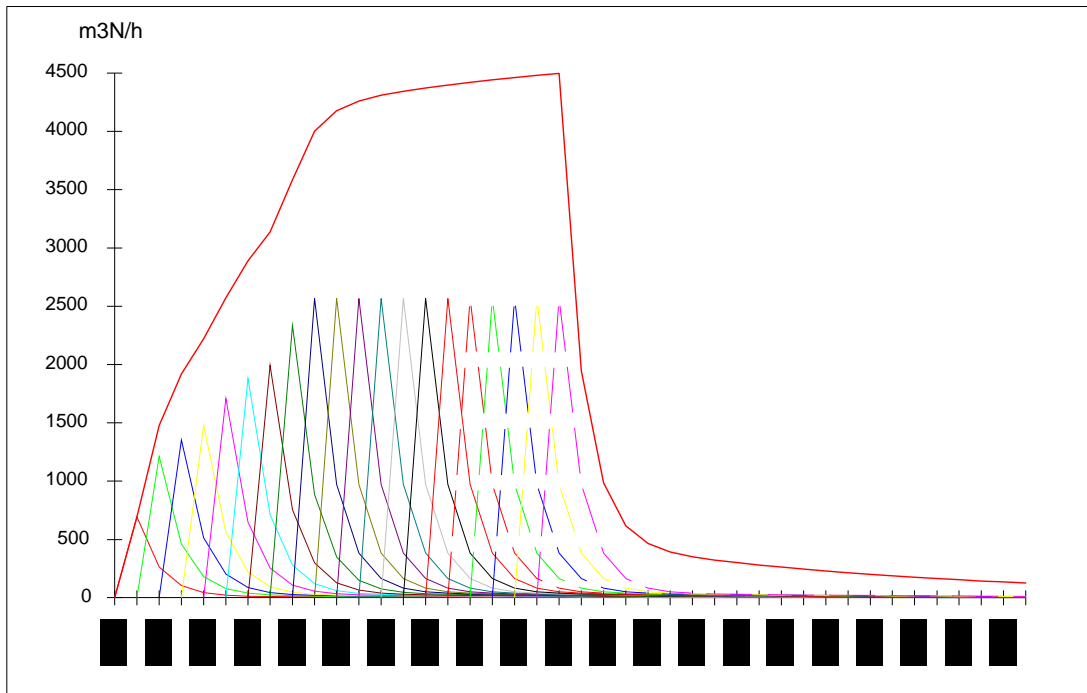


Fig. 13. Caudal de biogás recuperable en el vertedero de La Zoreda (Asturias)

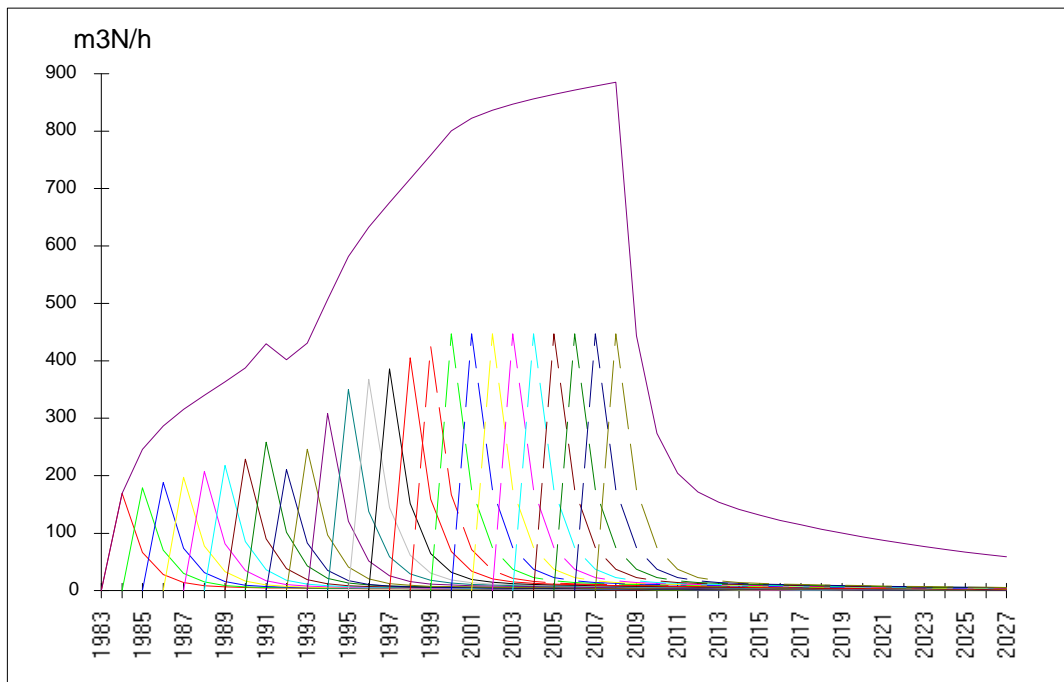


Fig. 14. Caudal de biogás recuperable en el vertedero de Bratovo (Burgas, Bulgaria)

### 2.6.3. Producción de biogás recuperable en cada zona del vertedero

Utilizando el modelo descrito, es sencillo predecir no sólo la producción total de biogás en un vertedero, sino también la cantidad de biogás recuperable en distintas zonas o celdas del mismo, supuesto que se conozcan las cantidades de residuos vertidas en cada zona y su antigüedad. Esto nos va a permitir contrastar el modelo con la información disponible del vertedero de La Zoreda.

#### 2.6.3.1. Datos experimentales

En este vertedero, ya existían entre los años 1993 y 1995 seis estaciones de regulación de la extracción del biogás. De ellas, cinco están automatizadas, existiendo un registro continuo de la producción de biogás. Estos datos han sido recopilados entre el 3/9/93 y el 6/9/95, y se muestran en las Figuras 15 a 19. La gráfica correspondiente al caudal total, Figura 20, ha sido obtenida sumando los caudales de las cinco casetas automáticas.

#### 2.6.3.2. Modelización de la producción mensual de biogás recuperable en cada zona del vertedero

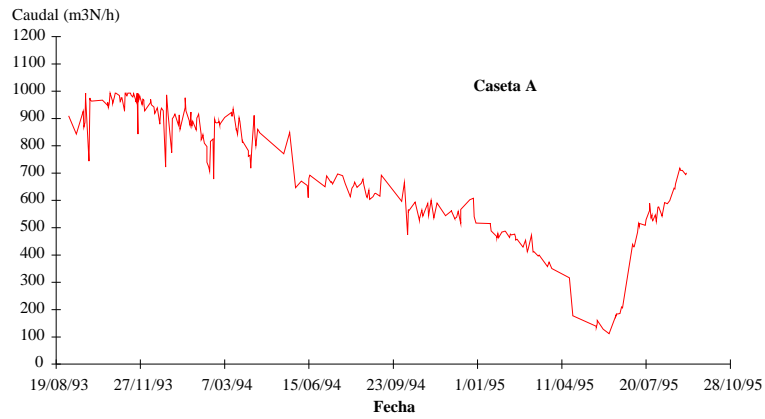
Desgraciadamente, no existe un registro que delimite las zonas de vertido en La Zoreda, sólo pudiendo decirse que éstas coinciden en cierta medida con las casetas de regulación. Tampoco existe un registro de las fechas de vertido ni de las cantidades depositadas.

Sólo podemos suponer, con cierto grado de aproximación a la realidad, que el vertedero está dividido en 8 áreas, cada una de las cuales recibe residuos cada 2 años durante un periodo de 3 meses. Teniendo en cuenta que el vertido desde el año 1993 está entre las 410.000 y 420.00 t, cada zona recibe aproximadamente 105.000 t de residuos en esos 3 meses cada bienio.

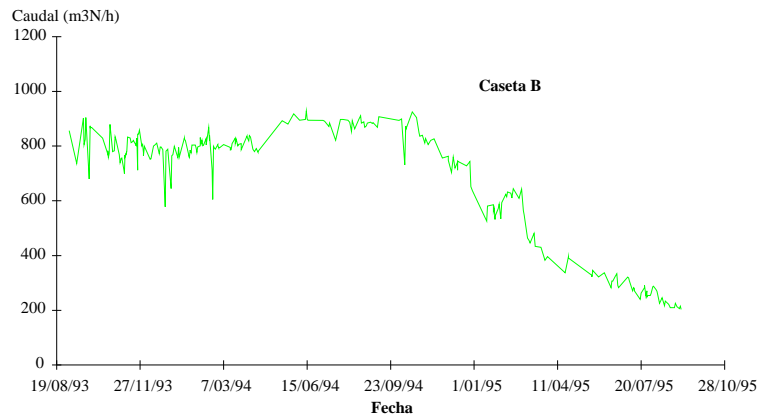
Durante los 3 meses de vertido el caudal de biogás recuperado es nulo, pues los pozos están desconectados del sistema de aspiración. Una vez concluido el vertido, se inicia el crecimiento de los microorganismos anaerobios. Supondremos que la velocidad de crecimiento de los microorganismos es proporcional a la zona habitable restante, es decir, a la diferencia con la población máxima aún admisible, según expresa la ecuación diferencial (2-14).

$$\frac{dN(t)}{dt} = k (d - N(t)) \quad [2-14]$$

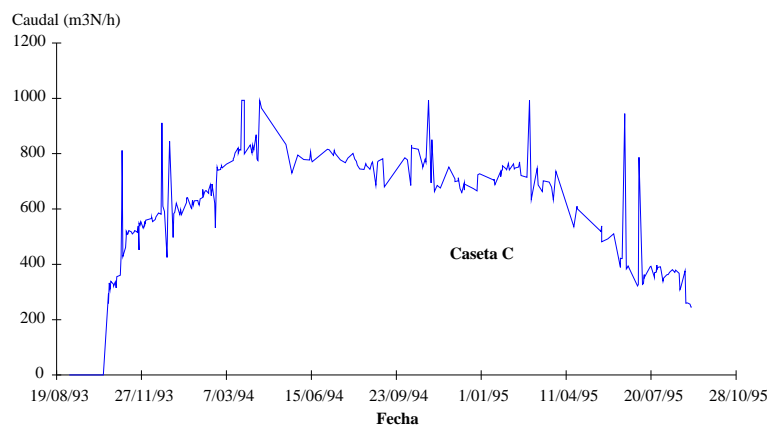
donde  $N(t)$  es la población de microorganismos en el instante  $t$ , expresada en tanto por uno sobre el máximo posible  
 $t$  es el tiempo transcurrido desde el vertido, expresado en meses  
 $k, d$  son constantes



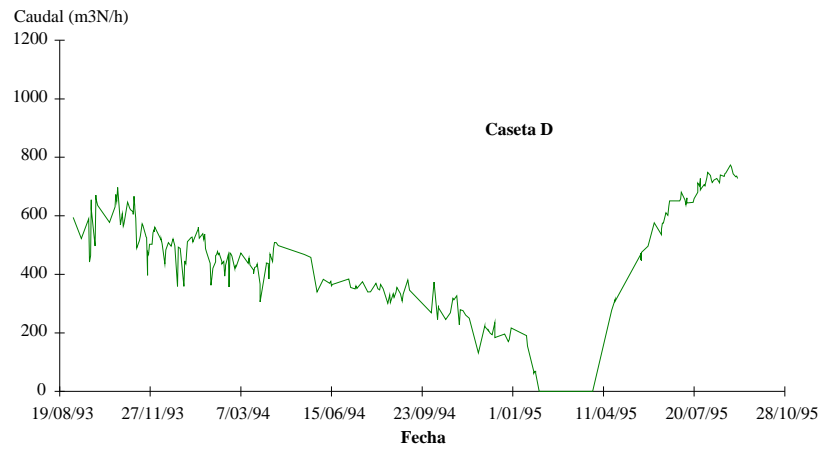
**Fig. 15.** Histórico de caudales, Caseta A (La Zoreda)



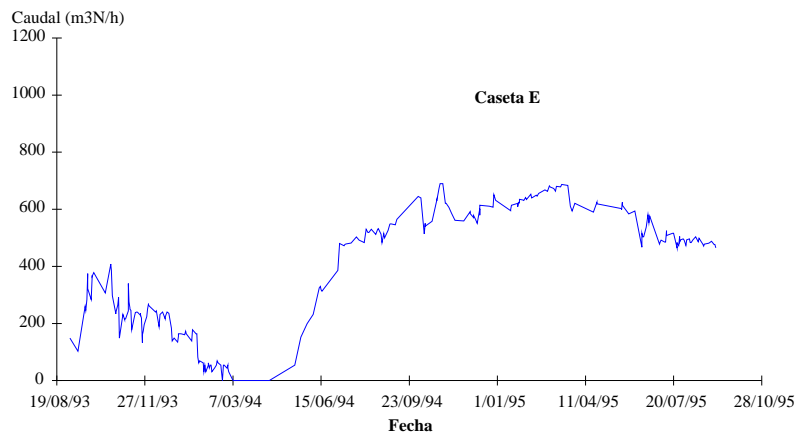
**Fig. 16.** Histórico de caudales, Caseta B (La Zoreda)



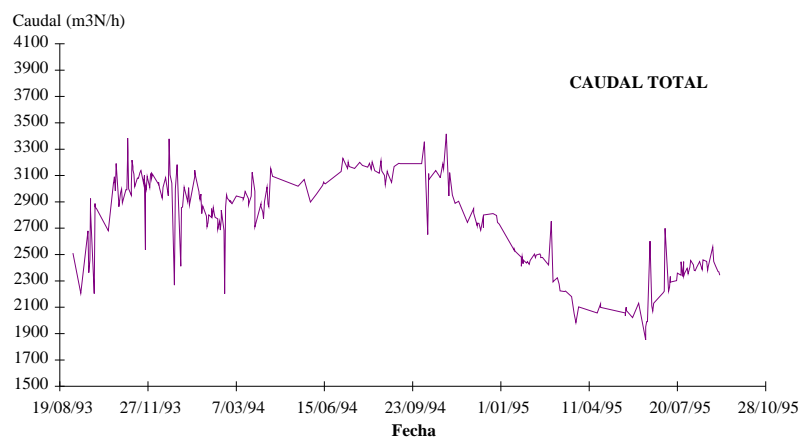
**Fig. 17.** Histórico de caudales, Caseta C (La Zoreda)



**Fig. 18.** Histórico de caudales, Caseta D (La Zoreda)



**Fig. 19.** Histórico de caudales, Caseta E (La Zoreda)



**Fig. 20.** Histórico de caudales, Caudal Total (La Zoreda)

Integrando se obtiene:

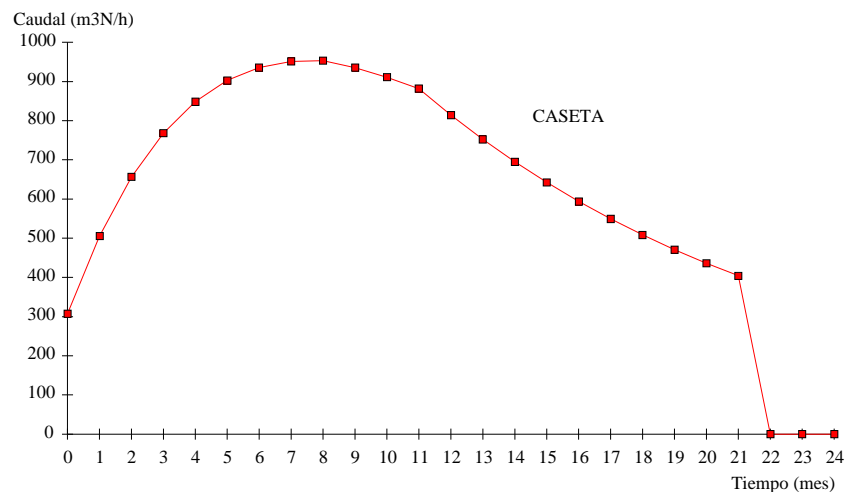
$$N(t) = d(1 - e^{-kt}) \quad [2-15]$$

Los valores de las constantes  $k$  y  $d$  se calculan suponiendo que en  $t=3$  la población bacteriana ha crecido hasta un 40% y que para  $t=12$  hasta un 100%.

Desde el punto de vista del modelo, el crecimiento de los microorganismos hasta la completa colonización de la masa de residuos equivale a desglosar cada vertido en 12 tongadas sucesivas, calculando cada una como  $N(t)-N(t-1)$ .

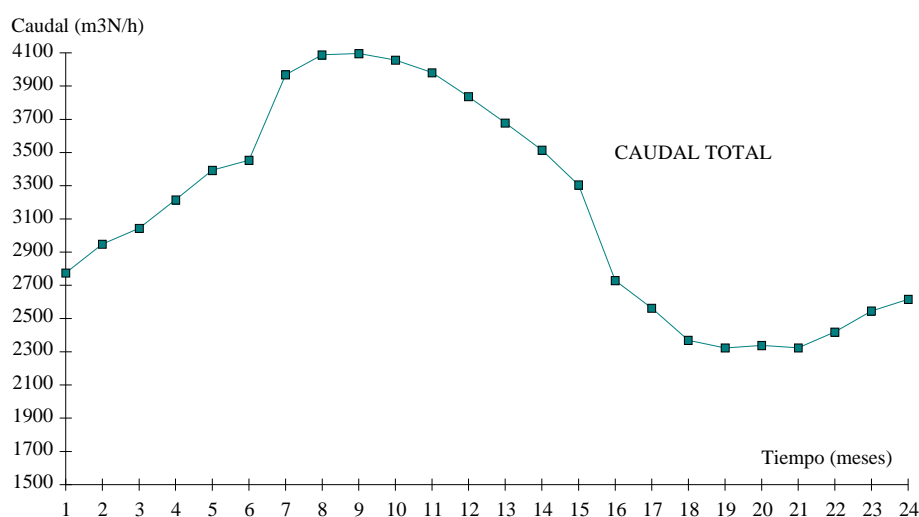
Se ha calculado la producción de biogás mes a mes para una caseta del vertedero de La Zoreda, con las hipótesis señaladas y los datos de composición de los RSU y humedad ya comentados en el apartado anterior. Únicamente señalar que se ha modificado el valor de la eficiencia de recuperación del biogás. Se ha aumentado la eficiencia de un 70% a un 99,8% ya que ahora debemos considerar no la eficiencia de captación del vertedero en su conjunto sino de las zonas donde se haya construida la red de pozos. Para el cálculo de este valor se ha tenido en cuenta la existencia de sólo 5 casetas para 8 zonas de vertido y la imposibilidad de recuperar el biogás durante los 3 meses de vertido en cada caseta.

El resultado se muestra en la Figura 21. El caudal recuperado presenta un máximo de 953  $m^3N/h$  a los 8 meses de vertido, decayendo posteriormente hasta el momento de producirse el nuevo vertido. El resultado es cercano al dato obtenido en las casetas de mayor producción de biogás (A, B y C).



**Fig. 21.** Modelización del caudal de biogás mensual recuperado en una Caseta

También se ha calculado la producción de biogás para el conjunto de 5 casetas, espaciando los vertidos entre ellas de modo que el resultado final sea lo más parecido al período en el que existen datos del vertedero. Se han supuesto vertidos en los trimestres 1, 2, 6, 7 y 8. El resultado se muestra en la Figura 22. El caudal recuperado oscila entre un máximo de 4095 m<sup>3</sup>N/h, superior al experimental, y un mínimo de 2322 m<sup>3</sup>N/h, similar al experimental.



**Fig. 22.** Modelización del caudal total de biogás recuperado

Al no existir un registro histórico de las zonas de vertido, no es posible ajustar aún más este modelo. Hay otros factores que también dificultan este análisis. El más importante hace referencia a la saturación del sistema de recuperación de biogás. Por encima de los 1000 m<sup>3</sup>N/h en una caseta o de los 3500 m<sup>3</sup>N/h en el conjunto, las altas pérdidas de carga en las líneas de conducción hacen insuficiente la presión de aspiración en el vertedero, por lo que no aumentan los valores de biogás recuperado de forma proporcional a posibles aumentos en la generación de metano.

Esta parece ser la causa de la diferencia entre el caudal máximo total que anticipa el modelo, 4095 m<sup>3</sup>N/h, y el caudal máximo de biogás recuperado entre las cinco casetas automáticas, aproximadamente 3200 m<sup>3</sup>N/h. A finales de 1995 se incrementó la capacidad de las instalaciones de La Zoreda instalando un nuevo grupo de aspiración de mayor potencia. Esto hizo aumentar por encima de los 4000 m<sup>3</sup>N/h el caudal de biogás recuperado y permitió instalar en 1996 una nueva caseta de regulación, para el suministro de aproximadamente 800 m<sup>3</sup>N/h de biogás a una Planta de Aprovechamiento de Subproductos Cárnicos.

### **3. MIGRACIONES DE BIOGÁS EN EL INTERIOR DEL VERTEDERO**

---

### 3. MIGRACIONES DE BIOGÁS EN EL INTERIOR DEL VERTEDERO

#### 3.1. El problema de la migración de biogás

La constante generación del biogás en el interior del vertedero implica también una constante fuga al exterior. Los aproximadamente 4000 m<sup>3</sup>N de biogás recuperados en el vertedero de La Zoreda cada hora no pueden quedar retenidos en su interior si el sistema de extracción de biogás fuera desconectado. Aunque inicialmente se acumule el biogás en el vertedero (saturándolo como una esponja), la lógica nos indica que, finalmente, debe escapar al exterior pues, de otra forma, la presión en el interior del vertedero, debida al aumento de la cantidad de gas acumulada, llegaría a ser insoportable. Este hecho está ratificado por la experiencia pues, inmediatamente que cesa la extracción de biogás en un vertedero, comienza a percibirse su olor característico. Incluso se ha medido el incremento de presión en el vertedero. El efecto es similar al de una presa en el cauce de un río: al cerrar las esclusas de desagüe, el nivel de la presa aumenta hasta producirse el rebose.

El biogás migra preferentemente por la superficie del vertedero, pues ésta es más permeable. Sin embargo, hay que advertir, por su peligro, que también son posibles **migraciones laterales** del biogás (Reinhart *et al.*, 1992; EPA, 1994). En este caso, el biogás puede aflorar a cientos de metros del vertedero, con los peligros consiguientes (Gendebien *et al.*, 1992; UK Department of the Environment, 1994).

La saturación del terreno después de una lluvia torrencial, una helada nocturna fuerte y otras causas meteorológicas como inversiones térmicas o altas presiones atmosféricas, provocan de forma natural la *impermeabilización de la superficie* del vertedero. La urbanización de la superficie de un vertedero clausurado (construcción de edificios o carreteras) conduce al mismo problema. Asentamientos y fallas en las paredes laterales del vaso de vertido, una inadecuada impermeabilización del vaso de vertido, tuberías de alcantarillado, conductos de cables telefónicos o eléctricos, etc. provocan o facilitan la salida lateral del biogás.

El conocimiento de las leyes que rigen el flujo del biogás en el interior del vertedero es de suma importancia para su recuperación y posterior aprovechamiento energético. En los apartados siguientes se desarrollará un modelo capaz de predecir este fenómeno. Este modelo es útil para el diseño de pozos de captación más eficientes; la elección del espaciado óptimo entre los pozos; la definición del concepto de radio de influencia del pozo; la interpretación correcta de los resultados obtenidos mediante ensayos para la determinación de la producción total de biogás en un vertedero; etc. Estos aspectos serán desarrollados en los Apartados 4 y 5.



### 3.2. Explicación física del fenómeno

El mecanismo físico de migración del biogás ha sido estudiado por distintos autores desde los inicios del estudio del biogás, en los años 70. Las leyes que rigen la migración del biogás son la ley de la *difusión* y la ley de la *convección*.

La **difusión** es la tendencia de un fluido a distribuirse homogéneamente en un volumen, desplazándose de las zonas de mayor concentración a las de menor concentración. La Ley de Fick expresa este concepto:

$$F = - \frac{D\phi}{\theta} \frac{dC}{dx} \quad [3-1]$$

donde,

**F** es la velocidad de flujo del gas (g/cm<sup>2</sup>s)

**D** es el coeficiente de difusión de metano en aire a 5 °C y 100 kPa de presión, constante (0,194 cm<sup>2</sup>/s)

**ϕ** es la tortuosidad del medio, adimensional

**θ** es la porosidad del medio, adimensional

**dC/dx** es el gradiente de concentraciones en la distancia dx (g/cm<sup>4</sup>)

La **convección** representa el movimiento de un fluido en respuesta a gradientes de presión. A bajas velocidades de flujo (Re < 1, movimiento laminar) es aplicable la ley de Darcy:

$$Q = - A \frac{k}{\eta} \frac{dP}{dx} \quad [3-2]$$

donde,

**Q** es la velocidad de flujo del gas (m<sup>3</sup>/s)

**A** es el área transversal (m<sup>2</sup>)

**k** es la permeabilidad intrínseca del medio (m<sup>2</sup>)

**η** es la viscosidad dinámica (kg/m s)

**dP/dx** el gradiente de presión (Pa / m = kg / m<sup>2</sup> s<sup>2</sup>)

La importancia relativa de la *difusión* y de la *convección* ha sido debatida por distintos autores (Bogner, 1986; Gendebien *et al.*, 1992; Kjeldesen, 1996; Lofy, 1996; Christensen *et al.*, 1996)). El mecanismo de la difusión tiene mayor influencia cuando se estudia la variación de la concentración de los componentes del biogás al aflorar éste al exterior y mezclarse con el aire. La convección explica la distribución de presión en el interior del vertedero y la orientación del flujo del gas hacia chimeneas o fracturas del terreno.

Además de los mecanismos de la convección y la difusión, influyen sobre el flujo del biogás otros fenómenos, como son la oxidación del metano a dióxido de carbono cuando penetra aire en el vertedero o la disolución del biogás en el lixiviado (Christensen *et al.*, 1996).

Cuando en el vertedero se acumulan grandes cantidades de lixiviado, el biogás se disuelve en él. Una vez disuelto en el lixiviado, el biogás puede migrar al exterior del vertedero y aflorar con este en puntos alejados, cuando la presión exterior disminuya, con el consiguiente riesgo. Este es un motivo más para evitar la retención de altas cantidades de lixiviado en el interior de los vertederos.

El modelo propuesto se basa únicamente en el mecanismo de la convección para explicar la migración del biogás. Se considera que el mecanismo de la difusión sólo es imprescindible al estudiar otros casos, como son el movimiento del biogás en la atmósfera o bien el flujo del biogás a través de las barreras de impermeabilización (Martín *et al.*, 1996e).

### 3.3. Modelo de la migración de biogás en un vertedero

Se pretende desarrollar un modelo para conocer, en condiciones estacionarias de equilibrio, los valores de la presión relativa y el caudal (módulo, dirección y sentido) en distintos puntos del vertedero. La solución debe considerar las tres dimensiones espaciales. Como datos de entrada se tendrán: (a) la producción de biogás en cada punto, calculada como función de la antigüedad y composición de los residuos depositados; (b) la presión atmosférica, pues se trabajará en presiones relativas; y (c) la distinta permeabilidad del terreno para cada punto en distintas direcciones. Este modelo se fundamentará en la Ley de Darcy.

El programa de cálculo, desarrollado expresamente para este trabajo por la singularidad del problema planteado, se basa en el método de diferencias finitas. El principal inconveniente para su resolución matemática es que, a diferencia de otros problemas de movimiento de gases, en todos los puntos del vertedero existe generación de biogás continua. Se trata, utilizando la terminología de la Mecánica de Fluidos, de un espacio de puntos donde todos ellos son *fuelle* o *manantial*. La capacidad de generación del biogás en cada fuente no es la misma, pues depende de la antigüedad del residuo. Además, tampoco existe un número discreto de *sumideros*, sino que se comportan como tales todos los puntos de la superficie del vertedero y de las captaciones de biogás si las hubiera.

La condición de fuente o manantial de todos los puntos del vertedero distorsiona notablemente las características de este problema. Generalmente, se plantean situaciones con un número finito de fuentes y un número finito de sumideros. En estos casos, las líneas de caudal parten de las fuentes y terminan en los sumideros. Las líneas de presión constante, isobaras, rodean a las fuentes y a los sumideros. Se cumplen las siguientes propiedades: (a) dos líneas de caudal no se cortan nunca; (b) dos isobaras no se cortan nunca; (c) las líneas de caudal son perpendiculares a las de presión en el punto de corte. Estas propiedades no son formuladas para los puntos fuente y sumidero, donde se cortan (convergen) infinitas líneas de caudal y las líneas de presión degeneran en puntos. En el modelo propuesto del vertedero, a diferencia de estos casos genéricos, al considerar que todos los puntos del espacio son fuente, salvo los de la superficie, que son todos sumidero, no son tampoco aplicables las propiedades de las líneas de caudal y de las de presión.

#### 3.3.1. Planteamiento del fenómeno

Inicialmente se plantea la resolución del problema en dos dimensiones. Para ello, se tomará una sección del vertedero, dividida con una cuadrícula en superficies de control. Cada uno de estos elementos (i,j) vendrá definido, según se muestra en la Figura 23, por:

- **P(i,j)** Presión relativa media del elemento (i,j) - se medirán todas las presiones en relación a la atmosférica -
- **G(i,j)** Caudal que genera de biogás por unidad de tiempo
- **Q<sub>c</sub>(i,j)** Caudal saliente vertical superior (c, columna)

- $Q_c(i+1,j)$  Caudal entrante vertical inferior
- $Q_f(i,j)$  Caudal saliente horizontal izquierda (f, fila)
- $Q_f(i,j+1)$  Caudal entrante horizontal derecha
- $K_c(i,j)$  Pérdida de carga en la dirección vertical superior
- $K_c(i+1,j)$  Pérdida de carga en la dirección vertical inferior
- $K_f(i,j)$  Pérdida de carga en la dirección horizontal izquierda
- $K_f(i,j+1)$  Pérdida de carga en la dirección horizontal derecha

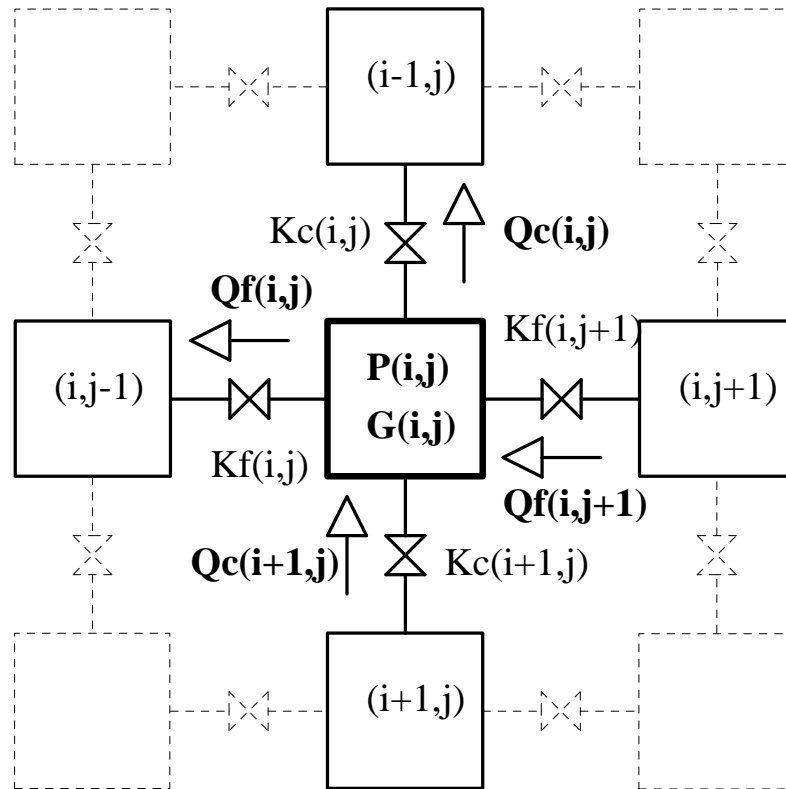


Fig. 23. Representación simbólica de las variables y constantes que definen la superficie de control (i,j)

Las ecuaciones que se deben verificar son:

- **Caudales, Conservación de la Materia**

$$G(i,j) = Q_f(i,j+1) + Q_c(i+1,j) - Q_f(i,j) - Q_c(i,j) \quad [3-3]$$

- **Presiones, Ley de Darcy**

$$P(i,j) - P(i-1,j) = K_c(i,j) \times Q_c(i,j) \quad [3-4]$$

$$P(i,j) - P(i,j-1) = K_f(i,j) \times Q_f(i,j) \quad [3-5]$$

$$P(i,j+1) - P(i,j) = K_f(i,j+1) \times Q_f(i,j+1) \quad [3-6]$$

$$P(i+1,j) - P(i,j) = K_c(i+1,j) \times Q_c(i+1,j) \quad [3-7]$$

Las condiciones de contorno las imponen los puntos de la superficie y el pozo de extracción de biogás.

- **Puntos SUPERFICIE**

$$P(i,j) - 0 = Kc(i,j) \times Qc(i,j) \quad [3-8]$$

- **Punto POZO**

$$P(i,j) - P_{\text{pozo}} = Kc(i,j) \times Qc(i,j) \quad [3-9]$$

### 3.3.2. Resolución del modelo propuesto

El programa informático desarrollado para la resolución de este problema opera de la siguiente forma.

En primer lugar, se inicializa el programa definiendo todas las constantes del problema para cada punto (i,j). Estas son:

- $G(i,j)$  Caudal que genera de biogás por unidad de tiempo
- $Kc(i,j)$  Pérdida de carga en la dirección vertical superior
- $Kf(i,j)$  Pérdida de carga en la dirección horizontal izqda.

Seguidamente, se inicia el proceso de cálculo. Para dotar al programa de una mayor consistencia, es decir, de una mayor capacidad de converger a la solución final, no se opera con todos los puntos de la matriz inicialmente. Se plantea el problema a partir del elemento (1,1) y se resuelve para él, obteniéndose los valores de las variables:

- $P(1,1)$  Presión media del elemento (1,1)
- $Qc(1,1)$  Caudal saliente vertical superior, dependiente de la presión atmosférica
- $Qf(1,1)$  Caudal saliente horizontal izquierda, nulo (aún no se ha considerado más puntos que el (1,1))

Conservando estos valores obtenidos, se incorpora otro punto al problema y se calcula su solución para el nuevo caso, con dos elementos. Resuelto para dos puntos se plantea para tres y así sucesivamente hasta los (n x m) puntos del sistema

El procedimiento de cálculo cada vez que se incorpora un nuevo punto es el siguiente. En primer lugar, el nuevo punto se vincula a aquel de los cuatro elementos (i,j) contiguos que tenga menor presión. A ese elemento le cederá el caudal por él generado,  $G(i,j)$ . La necesidad de que el caudal entrante más el generado en cada punto sea igual al saliente (Conservación de la Materia) hace necesario recalcular los caudales en todos los puntos de la malla. Se supondrá, en los puntos en que se está modificando el caudal por este nuevo aporte, que éste se distribuye de forma proporcional entre los caudales ya existentes.

Una vez recalculados todos los caudales en la malla, se deben recalcular las presiones en cada punto. Para ello se comienza por los puntos de menor presión según la anterior solución del problema. Se recalcula la presión en cada punto. Cuando el punto tenga caudal saliente en dos o tres direcciones puede ocurrir que la presión para él calculada sea distinta según la dirección que se considere. En ese caso debemos modificar su caudal saliente, aumentándolo en una/s dirección/es y disminuyéndolo en otra/s. Eso nos obliga a volver a calcular los caudales en todos los puntos de la malla y empezar de nuevo con el cálculo de presiones.

Una vez que todas las presiones han sido calculadas de forma congruente con los caudales, se incorpora un nuevo punto al problema, hasta completar la malla.

Este método de solución tiene una gran capacidad de convergencia. Hay que tener en cuenta que el problema se plantea sin ningún dato ni de caudal ni de presión inicial.

No obstante, cuando se trabaja con mallas de gran número de puntos, con el objeto de que cada elemento represente una menor porción del vertedero, pueden surgir problemas de doble precisión que dificultan la convergencia del programa. Este inconveniente aparece cuando el caudal aportado por un elemento es inferior al error aceptado como admisible para la solución final en el proceso de cálculo. Una medida de este problema nos la da la diferencia entre la suma de los caudales generados en el vertedero y la suma de los caudales salientes del vertedero, como muestra la fórmula (3-10).

$$\text{ERROR} = \sum_{i,j} G(i, j) - \sum_j Q_c(1, j) \quad [3-10]$$

donde se ha supuesto que la fila  $i=1$  corresponde a la superficie del vertedero, que todo el caudal generado abandona el vertedero por la superficie del mismo y que no hay entrada de aire.

### 3.3.3. Adaptación del método a coordenadas cilíndricas

Tal y como se ha definido el algoritmo de cálculo, este sólo es útil para resolver el problema planteado en dos dimensiones (2D). Para resolver el problema del flujo del biogás alrededor de un pozo vertical debemos hacer la transición entre el problema en 2D y el problema en 3D. Basta para ello reconocer la simetría radial que se produce cuando tomamos como eje de referencia el mismo pozo de captación del biogás, como muestra la Figura 24 , donde  $R_o$  es el radio del pozo de captación.

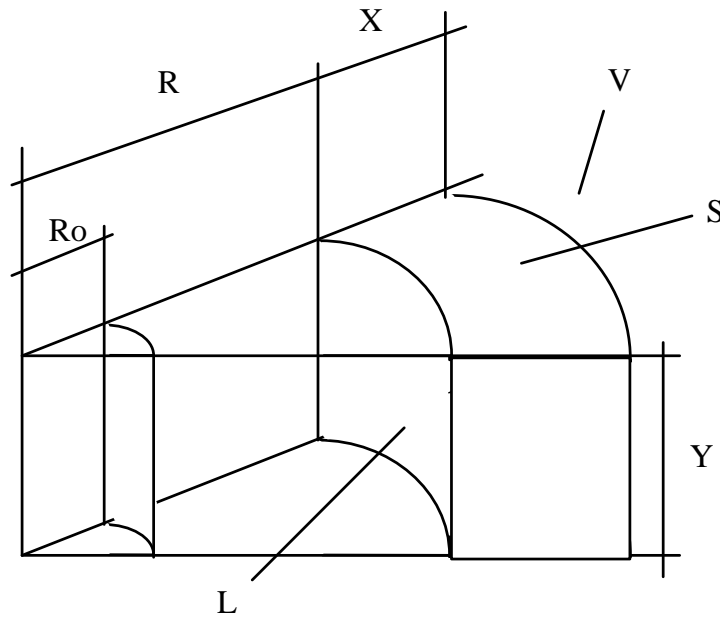


Fig. 24. Adaptación del problema a coordenadas cilíndricas

De este modo, cada cuadrícula en 2D representa en 3D un toro o donut con las siguientes propiedades, siendo  $n$  la columna que estamos analizando:

- **Volumen**

$$V = \pi Y(R + X)^2 - \pi YR^2 \quad [3-11]$$

- **Superficie de la cara interna**

$$L = 2\pi RY \quad [3-12]$$

- **Superficie cara superior**

$$S = \pi(R + X)^2 - \pi R^2 \quad [3-13]$$

Por tanto, tendremos que:

- **Caudal generado por elemento**

El caudal generado en cada elemento, siendo  $g$  el caudal generado por unidad de volumen, será:

$$G = Vg = \left[ \pi Y(R + X)^2 - \pi YR^2 \right] g \quad [3-14]$$

- **Ley de Darcy**

Teniendo en cuenta la variación de la superficie interna de cada elemento con su distancia al pozo de captación, tenemos:

$$dP/dx = Q/(AD) \Rightarrow \Delta P = \Delta x Q/(AD) \Rightarrow K = \Delta x / (AD) \quad [3-15]$$

donde  $\Delta x$  es la distancia entre dos elementos y  $A$  la superficie que estamos considerando ( $S$  para la cara superior,  $L$  para la cara interna)

### 3.3.4. Valor de las distintas constantes

Finalmente, se han adoptado los siguientes valores para las constantes:

- **$R_0$** . El radio de una captación de biogás es de 1 m, teniendo en cuenta que no solamente incluye el radio de la tubería taladrada sino también una parte, al menos, del dren perimetral
- **$D$** . Como se ha comentado,  $D = k/\eta$ , donde  $k$  es la permeabilidad intrínseca del medio y  $\eta$  es la viscosidad dinámica del biogás.

Ira N. Levine (1978), establece un valor para el metano de  $1/\eta$  de 0,36 m<sup>2</sup>/hora y mmca.

Según Clement (1981) (citado por Gendebien et al., 1992), los valores para el metano de  $k/\eta$  son:

- *Grava*: 4,824 m<sup>2</sup>/hora mmca
- *Arena*: 0,207 m<sup>2</sup>/hora mmca
- *Arenisca*: 0,114 m<sup>2</sup>/hora mmca

Se aceptarán los valores siguientes de  $D$ :

- 6,00 m<sup>2</sup>/hora mmca para la captación de biogás, constituidas por neumáticos y grava
  - 0,02 m<sup>2</sup>/hora mmca para la superficie del vertedero, formada por tierra, generalmente arcillosa, fuertemente compactada
  - 0,04 m<sup>2</sup>/hora mmca para las basuras
- **$g$** . La producción total de biogás, al 50% de metano, expresada en m<sup>3</sup>N de biogás por hora y m<sup>3</sup> de RSU, para residuos con una proporción de 50% de restos de comida y 25% de papel y cartón, y con una densidad de 0,8 t/m<sup>3</sup> es, según los cálculos realizados en el Apartado 2.6, de:

$$\begin{aligned} 1^{\text{er}} \text{ año, } g &= (96,71 \times 0,50 + 6,13 \times 0,25) \times 0,8 / (365 \times 24) = \\ &= 4,6 \times 10^{-3} \text{ m}^3\text{N de biogás/h y m}^3 \text{ de RSU} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} 2^{\circ} \text{ año, } g &= (35,58 \times 0,50 + 5,73 \times 0,25) \times 0,8 / (365 \times 24) = \\ &= 1,8 \times 10^{-3} \text{ m}^3\text{N de biogás/m}^3 \text{ de RSU} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 3^{\text{er}} \text{ año, } g &= (13,09 \times 0,50 + 5,36 \times 0,25) \times 0,8 / (365 \times 24) = \\ &= 0,7 \times 10^{-3} \text{ m}^3\text{N de biogás/m}^3 \text{ de RSU} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 4^{\circ} \text{ año, } g &= (4,82 \times 0,50 + 5,02 \times 0,25) \times 0,8 / (365 \times 24) = \\ &= 0,3 \times 10^{-3} \text{ m}^3\text{N de biogás/m}^3 \text{ de RSU} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 5^{\circ} \text{ año, } g &= (1,77 \times 0,50 + 4,69 \times 0,25) \times 0,8 / (365 \times 24) = \\ &= 0,2 \times 10^{-3} \text{ m}^3\text{N de biogás/m}^3 \text{ de RSU} \end{aligned}$$

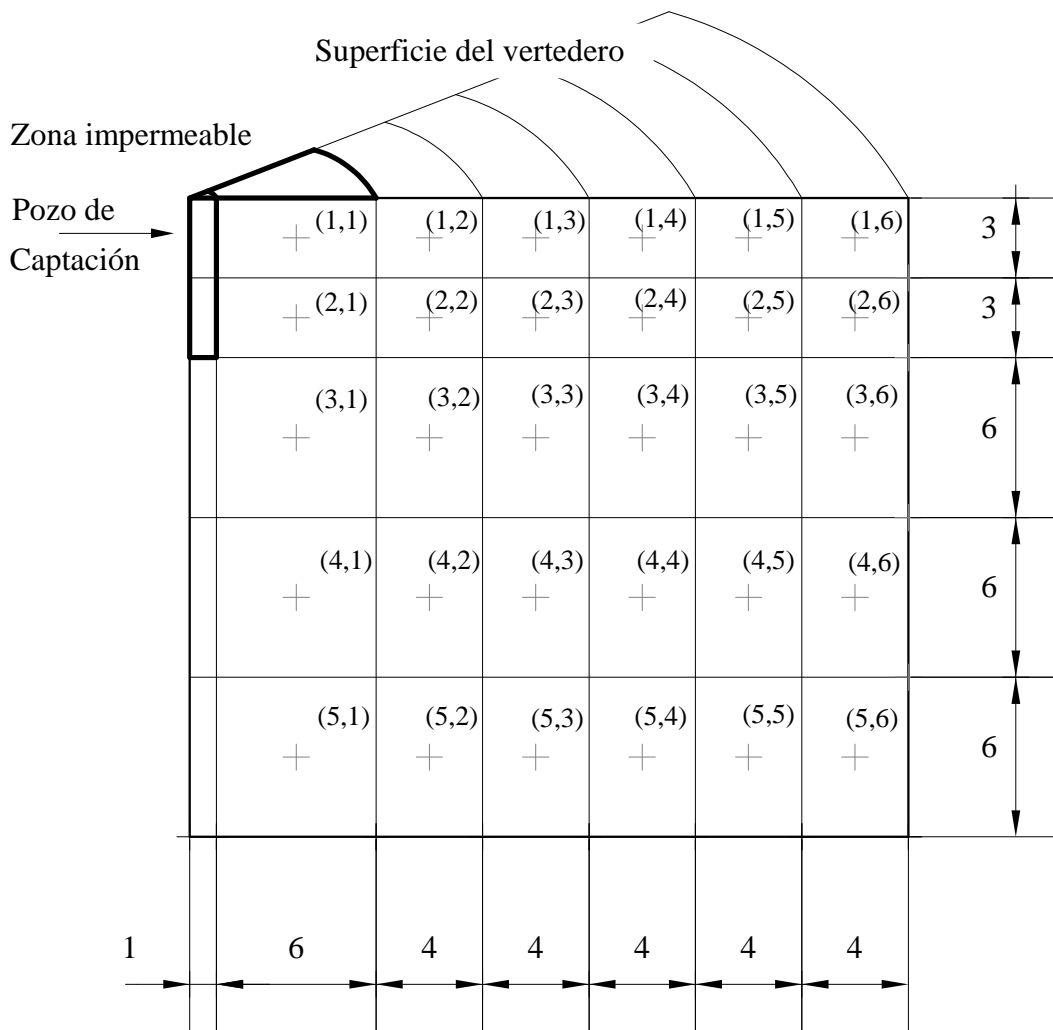
- **R, X, Y.** El valor de la separación de cuadrícula para el cálculo viene limitado por la aparición de problemas de doble precisión. Si se toma un valor muy pequeño, la generación de biogás asociada a ese elemento,  $G(i,j)$ , será menor que el error admisible de caudal, con el consiguiente riesgo de no convergencia del programa.

Además, debido al planteamiento del problema aprovechando la simetría cilíndrica de las captaciones, los elementos más alejados del pozo representan un volumen muy superior a los inmediatamente aledaños al pozo. Para evitar la inestabilidad que ello conlleva, se pueden definir los elementos (i,j) siguiendo una retícula irregular.

### 3.4. Aplicación del modelo de migración del biogás a distintas situaciones

Para la demostración de la capacidad del modelo propuesto y del programa de cálculo desarrollado, se ha modelizado una zona de un vertedero alrededor de un pozo de captación. En esta zona, de 27 m de radio alrededor del pozo, existe una profundidad de los residuos de 24 m, divididos en 4 tongadas de 6 m de espesor cada una, de 1,2,3 y 4 años de antigüedad respectivamente. El pozo vertical tiene una profundidad de 6 m y se ha impermeabilizado una área de 7 m alrededor suyo.

Para la modelización de este caso se ha utilizado una matriz de 6 x 5 elementos. La Figura 25 muestra el área representada por cada elemento.



**Fig. 25.** Retícula utilizada para la modelización de una captación de biogás

En la Tabla 31 se muestran los valores de las constantes  $G(i,j) = g(i,j)V(i,j)$  y  $K = \Delta x / (AD)$  para los distintos elementos en que se ha dividido el área.

**Tabla 31.** Valores de las constantes  $G(i,j)$  y  $K$

	K=0*		K=0,663		K=0,451		K=0,356		K=0,284		K=0,239
K=0,300	G=1,9*	K=0,603	G=2,9	K=0,354	G=4,3	K=0,279	G=5,4	K=0,231	G=6,8	K=0,197	G=8,1
	K=0,498		K=0,332		K=0,225		K=0,178		K=0,142		K=0,119
K=0,300	G=1,9	K=0,603	G=2,9	K=0,354	G=4,3	K=0,279	G=5,4	K=0,231	G=6,8	K=0,197	G=8,1
	K=0,995		K=0,663		K=0,451		K=0,356		K=0,284		K=0,239
	G=1,5	K=0,302	G=2,3	K=0,177	G=3,4	K=0,140	G=4,2	K=0,115	G=5,3	K=0,098	G=6,3
	K=0,995		K=0,663		K=0,451		K=0,356		K=0,284		K=0,239
	G=0,6	K=0,302	G=0,9	K=0,177	G=1,3	K=0,140	G=1,6	K=0,115	G=2,1	K=0,098	G=2,5
	K=0,995		K=0,663		K=0,451		K=0,356		K=0,284		K=0,239
	G=0,3	K=0,302	G=0,4	K=0,177	G=0,6	K=0,140	G=0,7	K=0,115	G=0,9	K=0,098	G=1,1

(\*) Unidades: K [h mmca/m<sup>3</sup>]; G [m<sup>3</sup>/h]

El caudal total generado en la zona modelizada, un cilindro de 27 m de radio y 24 m de altura, es 94,7 m<sup>3</sup>/h.

En los siguientes apartados, se aplicará el modelo a la resolución de los siguientes casos:

1. Vertedero sin captación de biogás
2. Vertedero con chimeneas de venteo
3. Vertedero con extracción forzada de biogás

Finalmente, se discutirá la validez de los resultados obtenidos, aspecto que se retomará en el Apartado 4 al estudiar distintos tipos de ensayos ejecutables en el vertedero.

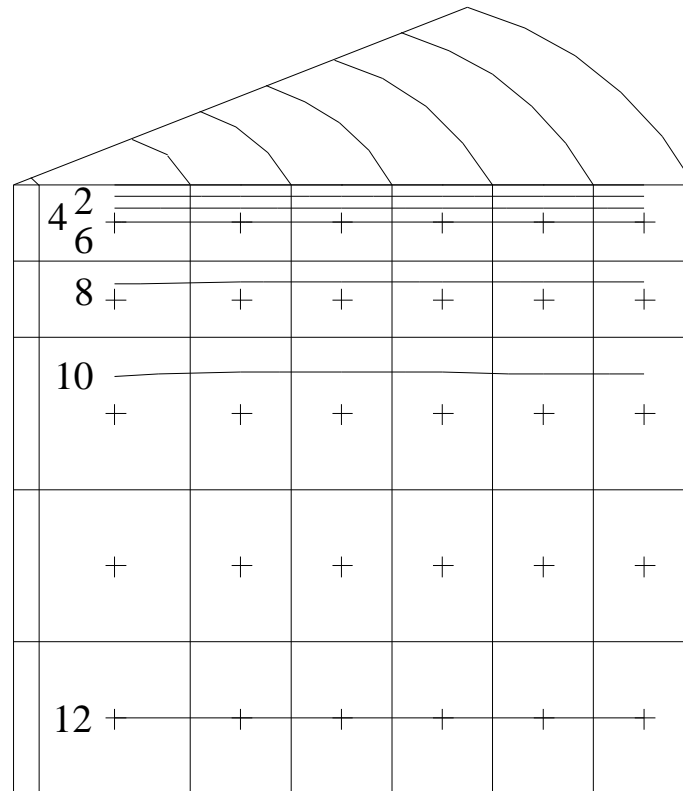
### 3.4.1 Vertedero sin captación de biogás

El resultado se muestra en la Tabla 32 y ha sido representado gráficamente en la Figura 26 (Suárez, 1997).

**Tabla 32.** Resultados del modelo de migración para vertedero sin captación de biogás

	Q=6,3*		Q=9,6		Q=14,0		Q=17,7		Q=22,7		Q=26,6
	P=6,3*	Q=0,1	P=6,3	Q=0,1	P=6,3	Q=0,0	P=6,3	Q=0,0	P=6,3	Q=0,0	P=6,3
	Q=4,4		Q=6,6		Q=9,7		Q=12,2		Q=15,3		Q=18,3
	P=8,4	Q=0,0	P=8,5	Q=0,0	P=8,5	Q=0,0	P=8,5	Q=0,0	P=8,5	Q=0,0	P=8,5
	Q=2,4		Q=3,6		Q=5,3		Q=6,7		Q=8,4		Q=10,1
	P=10,8	Q=0,1	P=10,9	Q=0,0	P=10,9	Q=0,1	P=10,9	Q=0,1	P=10,8	Q=0,0	P=10,8
	Q=0,9		Q=1,3		Q=1,9		Q=2,4		Q=2,9		Q=3,7
	P=11,7	Q=0,0	P=11,7	Q=0,0	P=11,7	Q=0,0	P=11,7	Q=0,0	P=11,7	Q=0,0	P=11,7
	Q=0,3		Q=0,4		Q=0,6		Q=0,7		Q=0,9		Q=1,1
	P=12,0	Q=0,0	P=12,0	Q=0,0	P=12,0	Q=0,0	P=12,0	Q=0,0	P=12,0	Q=0,1	P=12,0

(\*) Unidades: Q [m<sup>3</sup>/h]; P [mmca]. Sentidos de caudal positivos: ascendente y dcha. a izqda.



**Fig. 26.** Resultados del modelo de migración para vertedero sin captación de biogás

El modelo predice un flujo vertical del biogás, que abandona el vertedero por la superficie. El flujo superficial de biogás es de  $0,04 \text{ m}^3\text{N}$  de biogás por  $\text{m}^2$  y hora. La presión aumenta con la profundidad, siendo las superficies de igual presión paralelas a la superficie.

Una medida del grado de fiabilidad del programa, desde el punto de vista estrictamente matemático, nos la da la diferencia entre el valor del caudal generado, de acuerdo con los valores de  $G(i,j)$  introducidos en el programa, y la suma de los caudales que escapan por la superficie del vertedero, calculados por el programa. En este caso, esta diferencia porcentual es de:

$$\text{ERROR} = 100 \times [(6,3 + 9,6 + 14,0 + 17,7 + 22,2 + 26,6) - 94,7] / (94,7) = -0,32\%$$

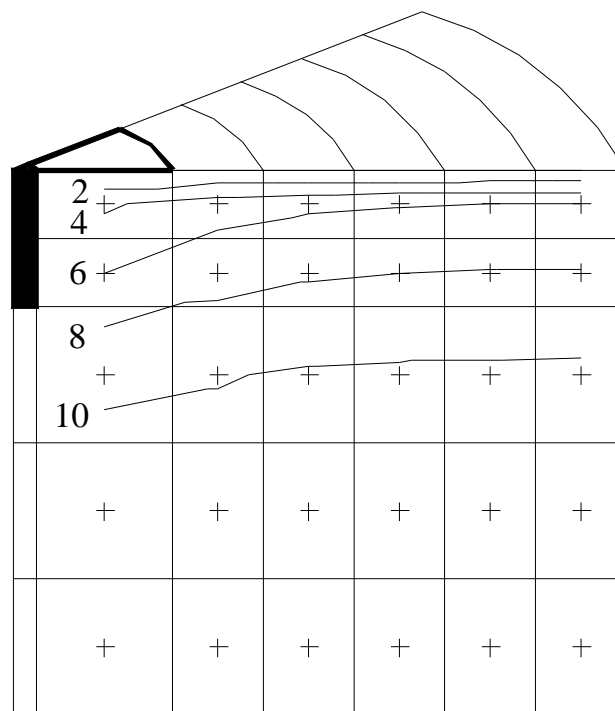
### 3.4.2 Vertedero con chimeneas de venteo

En primer lugar, se ha resuelto el problema para el caso más habitual, con la chimenea de venteo abierta. El resultado se muestra en la Tabla 33 y en la Figura 27.

**Tabla 33.** Resultados del modelo de migración con captación de venteo abierta

			Q=7,9*		Q=12,7		Q=16,7		Q=21,3		Q=25,4
Q=12,3	P=3,7*	Q=2,6	P=5,2	Q=1,4	P=5,7	Q=0,7	P=5,9	Q=0,4	P=6,0	Q=0,2	P=6,1
	Q=7,7		Q=6,1		Q=9,0		Q=11,6		Q=14,6		Q=17,4
	P=6,0	Q=2,2	P=7,3	Q=1,3	P=7,8	Q=0,7	P=8,0	Q=0,4	P=8,1	Q=0,2	P=8,1
	Q=3,7		Q=4,0		Q=5,2		Q=6,4		Q=7,9		Q=9,4
	P=9,7	Q=1,0	P=9,9	Q=1,1	P=10,2	Q=0,9	P=10,3	Q=0,6	P=10,3	Q=0,3	P=10,4
	Q=1,2		Q=1,5		Q=1,9		Q=2,3		Q=2,8		Q=3,3
	P=10,9	Q=0,3	P=10,9	Q=0,4	P=11,0	Q=0,4	P=11,1	Q=0,4	P=11,1	Q=0,3	P=11,1
	Q=0,4		Q=0,5		Q=0,6		Q=0,7		Q=0,8		Q=1,0
	P=11,2	Q=0,1	P=11,2	Q=0,2	P=11,3	Q=0,2	P=11,3	Q=0,2	P=11,3	Q=0,1	P=11,3

(\*) Unidades: Q [m<sup>3</sup>/h]; P [mmca]. Sentidos de caudal positivos: ascendente y dcha. a izqda.



**Fig. 27.** Resultados del modelo de migración con captación de venteo abierta

En este caso, el error cometido por el programa de cálculo, de acuerdo al criterio expuesto en el apartado anterior, es de + 1,69 %.

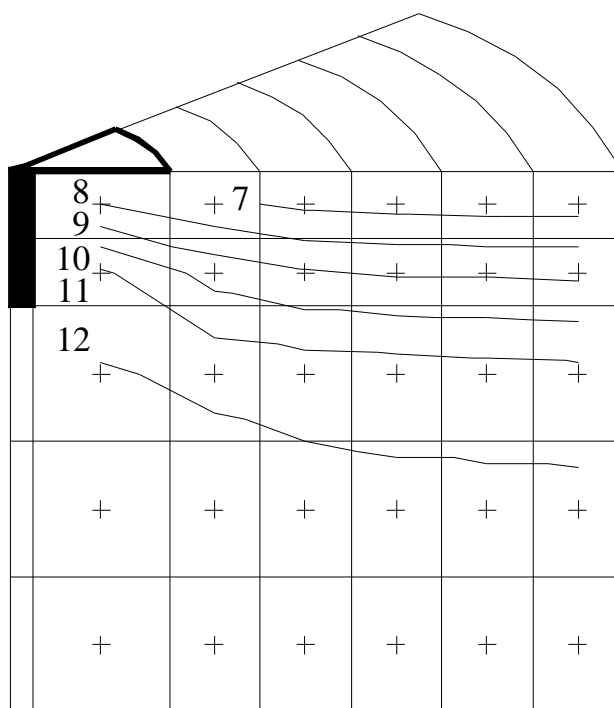
El rendimiento de recuperación de biogás se calcula como la relación entre el Caudal Gas de Vertedero Recuperado y el Caudal Total que se genera en el área considerada. En este caso, su valor es del 12,77 %

En segundo lugar, se ha resuelto el problema en el caso de que la chimenea de venteo esté obstruida o cerrada. El resultado se muestra en la Tabla 34 y en la Figura 28.

**Tabla 34.** Resultados del modelo con captación de venteo cerrada

			Q=10,9		Q=15,2		Q=18,8		Q=23,2		Q=27,3
Q=0,8*	P=8,0*	Q=-1,4	P=7,2	Q=-1,0	P=6,8	Q=-0,5	P=6,7	Q=-0,2	P=6,6	Q=-0,1	P=6,6
	Q=0,3		Q=7,5		Q=10,3		Q=13,0		Q=16,2		Q=19,0
	P=11,2	Q=-2,5	P=9,6	Q=-1,4	P=9,1	Q=-0,8	P=8,9	Q=-0,3	P=8,9	Q=-0,1	P=8,8
	Q=0,9		Q=3,3		Q=5,4		Q=7,0		Q=9,0		Q=10,7
	P=12,1	Q=-1,0	P=11,8	Q=-1,0	P=11,6	Q=-1,0	P=11,5	Q=-0,8	P=11,4	Q=-0,3	P=11,3
	Q=0,5		Q=1,1		Q=1,8		Q=2,5		Q=3,2		Q=3,9
	P=12,5	Q=-0,3	P=12,5	Q=-0,4	P=12,4	Q=-0,4	P=12,3	Q=-0,3	P=12,3	Q=-0,2	P=12,3
	Q=0,1		Q=0,3		Q=0,6		Q=0,8		Q=1,0		Q=1,2
	P=12,7	Q=-0,2	P=12,6	Q=-0,2	P=12,6	Q=-0,3	P=12,6	Q=-0,2	P=12,5	Q=-0,1	P=12,5

(\*) Unidades: Q [m<sup>3</sup>/h]; P [mmca]. Sentidos de caudal positivos: ascendente y dcha. a izqda.



**Fig. 28.** Resultados del modelo de migración con captación de venteo cerrada

En este ejemplo el error cometido por el programa ha sido de +1,58%. La presión en el pozo de venteo ha subido, debido al cierre a la salida del biogás, hasta +8 mmca.

### 3.4.3 Vertedero controlado (con captaciones de extracción forzada)

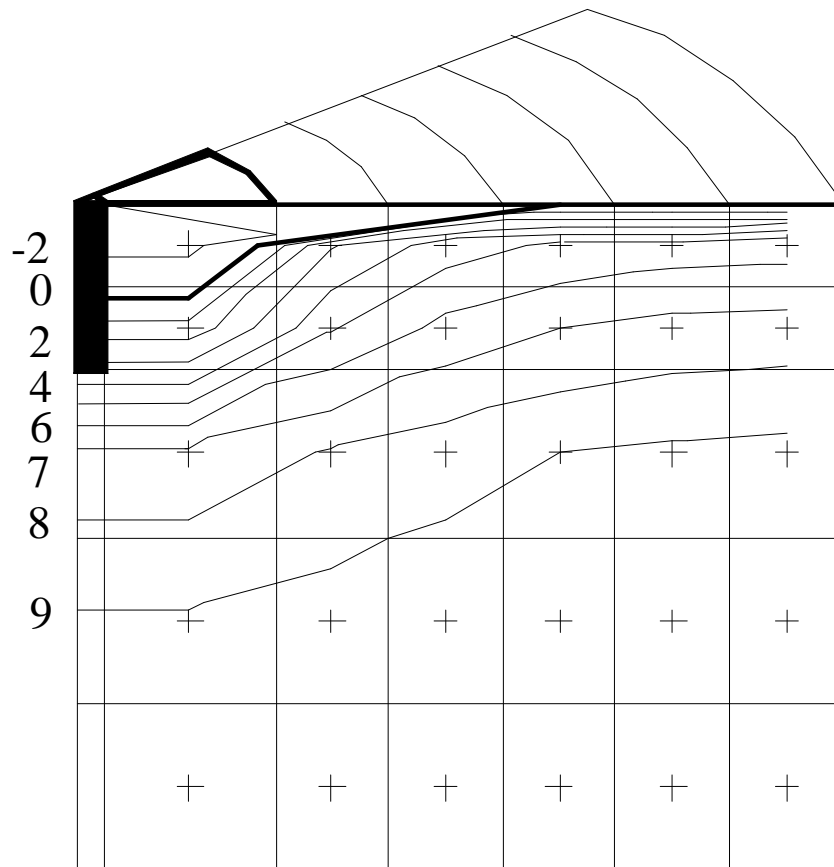
A continuación se resuelve el problema para un vertedero con captación forzada de biogás. Se ha repetido el cálculo para distintas presiones de aspiración en el pozo: -10, -20, -30, -40, -50 y -60 mmca. Los resultados se muestran en las Tablas 35 a 40, así como en las Figuras 29 a 34.

Con una **presión de aspiración de -10 mmca** los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 35 y en la Figura 29. El error cometido por el programa ha sido de +1,58%. El rendimiento de recuperación del gas de vertedero ha aumentado al 25,57%.

**Tabla 35.** Resultados del modelo de migración con captación,  $P_{\text{pozo}} = -10 \text{ mmca}$

			Q=4,4		Q=10,1		Q=14,7		Q=19,2		Q=23,2
Q=24,6	P=-2,6	Q=9,2	P=2,9	Q=4,6	P=4,5	Q=2,3	P=5,2	Q=1,3	P=5,5	Q=0,6	P=5,6
	Q=13,5		Q=6,0		Q=7,9		Q=10,2		Q=13,0		Q=15,6
	P=1,4	Q=5,8	P=4,9	Q=4,0	P=6,3	Q=2,4	P=7,0	Q=1,4	P=7,3	Q=0,6	P=7,4
	Q=5,9		Q=4,80		Q=5,1		Q=5,7		Q=6,9		Q=8,0
	P=7,3	Q=2,6	P=8,1	Q=3,1	P=8,6	Q=2,6	P=9,0	Q=1,9	P=9,2	Q=1,0	P=9,3
	Q=1,9		Q=1,9		Q=2,1		Q=2,2		Q=2,4		Q=2,6
	P=9,1	Q=0,7	P=9,4	Q=1,1	P=9,6	Q=1,2	P=9,7	Q=1,1	P=9,8	Q=0,7	P=9,9
	Q=0,5		Q=0,6		Q=0,7		Q=0,7		Q=0,7		Q=0,7
	P=9,7	Q=0,2	P=9,8	Q=0,5	P=9,8	Q=0,6	P=9,9	Q=0,6	P=10,0	Q=0,4	P=10,0

(\*) Unidades: Q [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]; P [mmca]. Sentidos de caudal positivos: ascendente y dcha. a izqda.



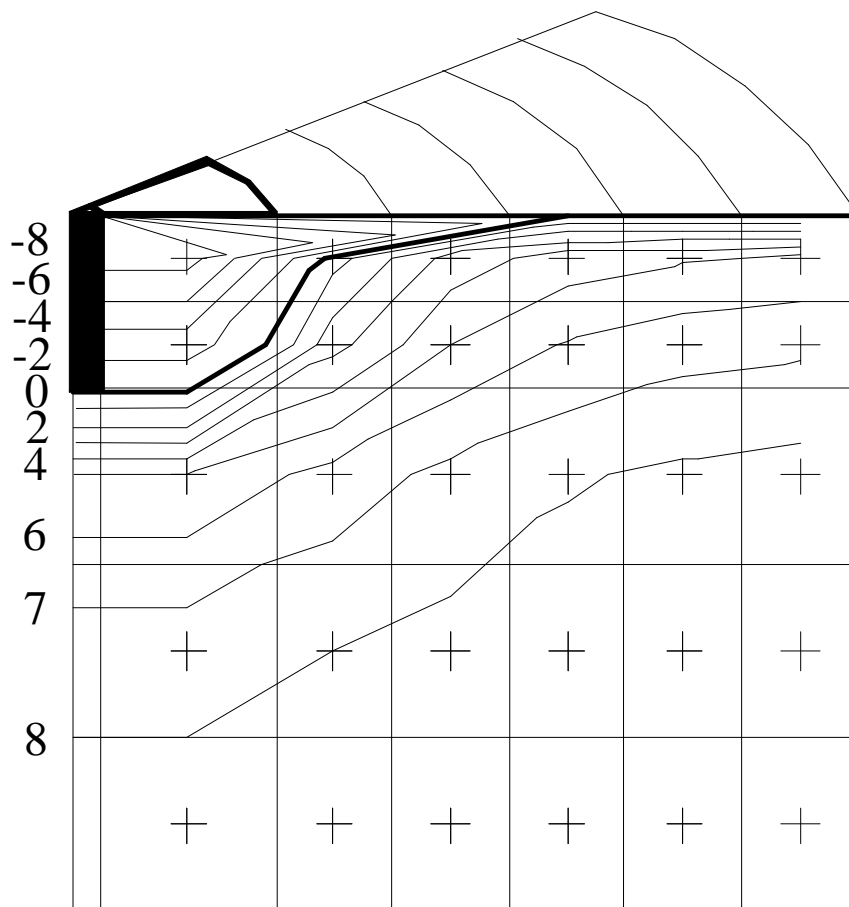
**Fig. 29.** Resultados del modelo de migración con captación,  $P_{\text{pozo}} = -10 \text{ mmca}$

Al aumentar la **presión de aspiración en el pozo a -20 mmca** se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 36 y en la Figura 30. El error cometido por el programa es de +1,58%. El rendimiento de la captación es del 38,57%.

**Tabla 36.** Resultados del modelo de migración con captación,  $P_{\text{pozo}} = -20 \text{ mmca}$

		Q=0,9	Q=7,4	Q=12,4	Q=17,2	Q=21,2					
Q=37,1	P=-8,9	Q=15,7	P=0,6	Q=7,8	P=3,4	Q=3,9	P=4,5	Q=2,0	P=4,9	Q=0,9	P=5,1
	Q=19,5		Q=5,9		Q=6,9		Q=8,8		Q=11,4		Q=13,9
	P=-3,0	Q=9,4	P=2,6	Q=6,6	P=5,0	Q=4,0	P=6,1	Q=2,2	P=6,6	Q=1,0	P=6,8
	Q=8,2		Q=5,6		Q=5,1		Q=5,0		Q=5,8		Q=6,7
	P=5,1	Q=4,2	P=6,4	Q=5,1	P=7,3	Q=4,4	P=7,9	Q=3,2	P=8,2	Q=1,7	P=8,4
	Q=2,5		Q=2,4		Q=2,3		Q=1,9		Q=1,9		Q=2,0
	P=7,6	Q=1,2	P=8,0	Q=1,9	P=8,3	Q=2,1	P=8,6	Q=1,8	P=8,8	Q=1,1	P=8,9
	Q=0,7		Q=0,8		Q=0,8		Q=0,7		Q=0,4		Q=0,5
	P=8,4	Q=0,5	P=8,5	Q=0,9	P=8,6	Q=1,1	P=8,8	Q=1,1	P=8,9	Q=0,6	P=9,0

(\*) Unidades: Q [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]; P [mmca]. Sentidos de caudal positivos: ascendente y dcha. a izqda.



**Fig. 30.** Resultados del modelo de migración con captación,  $P_{\text{pozo}} = -20 \text{ mmca}$



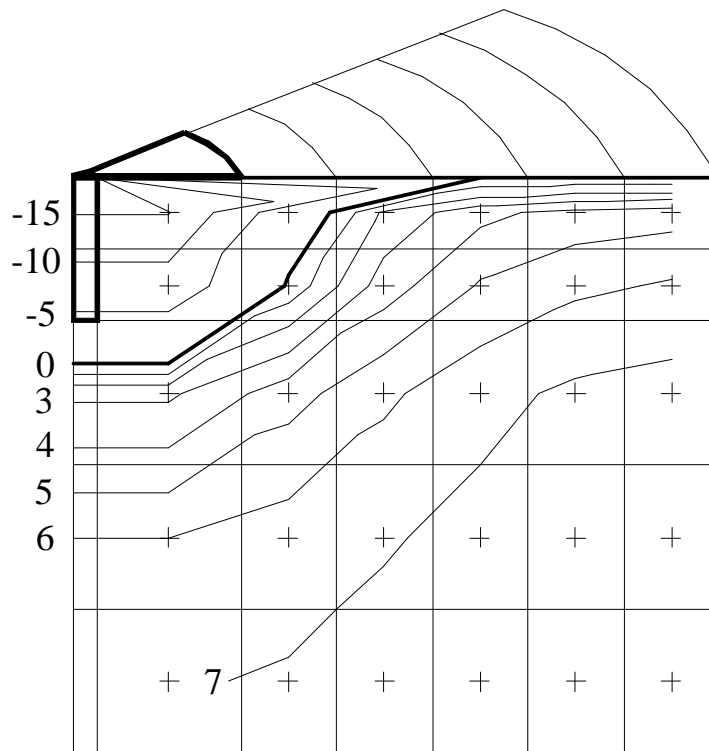
Con una **presión de aspiración de -30 mmca** se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 37 y la Figura 31. El error cometido es de +1,69%. El rendimiento de la captación en la recuperación del gas de vertedero es del 48,70%.

La entrada de aire, en concreto 2,6 m<sup>3</sup>/h, provoca un empobrecimiento en metano del biogás recuperado respecto del contenido en el gas de vertedero, así como la aparición de un cierto porcentaje de oxígeno. Tomando como contenido en metano del gas de vertedero un 57,0% en volumen de gas seco y como contenido en oxígeno un 0%, la composición del biogás recuperado será ahora del 54,0% de metano y 1,1% de oxígeno.

**Tabla 37.** Resultados del modelo de migración con captación, P<sub>pozo</sub>=-30 mmca

			Q=-2,6		Q=4,7		Q=10,3		Q=15,2		Q=19,2
Q=49,5	P=-15,1	Q=22,3	P=-1,7	Q=10,9	P=2,2	Q=5,5	P=3,7	Q=2,8	P=4,4	Q=1,2	P=4,6
	Q=25,3		Q=5,8		Q=5,8		Q=7,5		Q=9,9		Q=12,2
	P=-7,6	Q=13,0	P=0,3	Q=9,2	P=3,5	Q=5,6	P=5,1	Q=3,2	P=5,8	Q=1,4	P=6,1
	Q=10,4		Q=6,5		Q=5,0		Q=4,4		Q=4,7		Q=5,4
	P=2,8	Q=5,8	P=4,6	Q=7,1	P=5,8	Q=6,1	P=6,7	Q=4,4	P=7,2	Q=2,3	P=7,4
	Q=3,2		Q=2,9		Q=2,5		Q=1,8		Q=1,4		Q=1,3
	P=6,0	Q=1,6	P=6,5	Q=2,6	P=6,9	Q=2,9	P=7,3	Q=2,5	P=7,6	Q=1,4	P=7,8
	Q=1,0		Q=1,0		Q=0,9		Q=0,6		Q=0,3		Q=0,2
	P=6,9	Q=0,7	P=7,1	Q=1,3	P=7,4	Q=1,6	P=7,6	Q=1,5	P=7,8	Q=0,9	P=7,8

(\*) Unidades: Q [m<sup>3</sup>/h]; P [mmca]. Sentidos de caudal positivos: ascendente y dcha. a izqda.



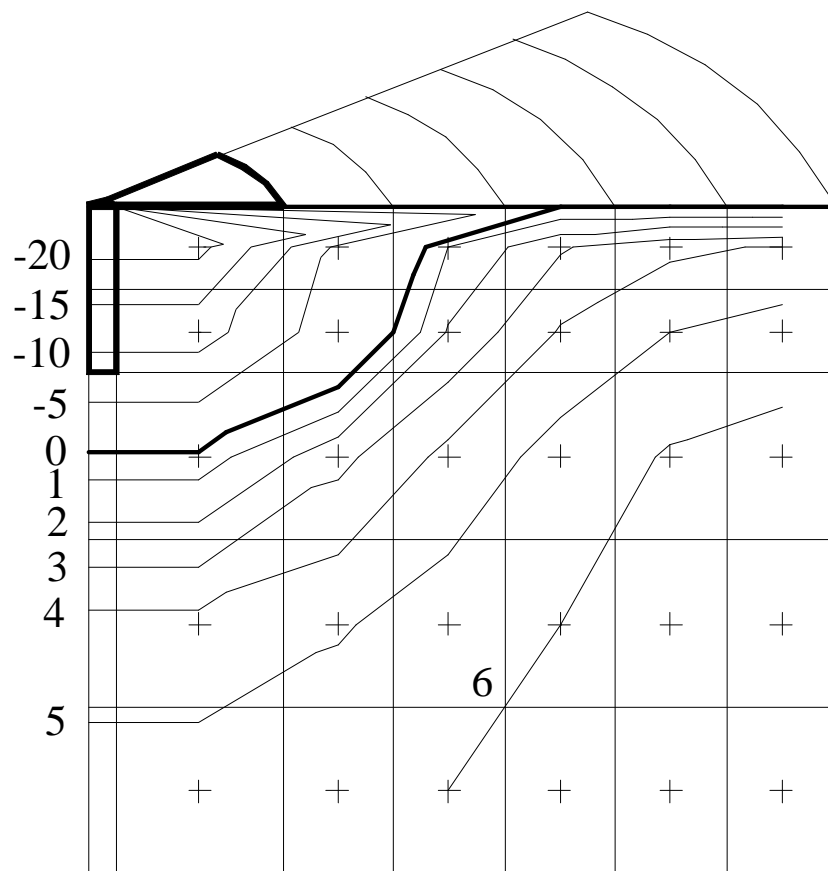
**Fig. 31.** Resultados del modelo de migración con captación, P<sub>pozo</sub>=-30 mmca

Con una **presión de aspiración en el pozo de -40 mmca** se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 38 y la Figura 32. El error cometido por el programa en este ejemplo es de +1,80%. Se recuperan 55,8 m<sup>3</sup>/h de gas de vertedero, lo que supone un rendimiento de 57,88%. La entrada de aire provoca que la composición del biogás recuperado sea de 51,4% de metano y 2,1% de oxígeno.

**Tabla 38.** Resultados del modelo de migración con captación, P<sub>pozo</sub>=-40 mmca

			Q=-6,1		Q=2,1		Q=8,2		Q=13,2		Q=17,1
Q=61,9	P=-21,4	Q=28,9	P=-4,0	Q=14,1	P=1,0	Q=7,1	P=2,9	Q=3,6	P=3,8	Q=1,6	P=4,1
	Q=31,1		Q=5,6		Q=4,7		Q=6,1		Q=8,4		Q=10,4
	P=-12,1	Q=16,5	P=-2,1	Q=11,9	P=2,1	Q=7,2	P=4,1	Q=4,0	P=5,0	Q=1,8	P=5,4
	Q=12,7		Q=7,3		Q=5,0		Q=3,7		Q=3,7		Q=4,1
	P=0,5	Q=7,3	P=2,7	Q=9,1	P=4,3	Q=7,9	P=5,4	Q=5,7	P=6,1	Q=3,0	P=6,4
	Q=3,8		Q=3,3		Q=2,7		Q=1,7		Q=1,0		Q=0,7
	P=4,3	Q=2,1	P=4,9	Q=3,3	P=5,5	Q=3,7	P=6,0	Q=3,2	P=6,4	Q=1,8	P=6,6
	Q=1,2		Q=1,1		Q=1,0		Q=0,6		Q=0,2		Q=-0,1
	P=5,5	Q=0,9	P=5,7	Q=1,6	P=6,0	Q=1,9	P=6,3	Q=1,8	P=6,5	Q=1,1	P=6,6

(\*) Unidades: Q [m<sup>3</sup>/h]; P [mmca]. Sentidos de caudal positivos: ascendente y dcha. a izqda.



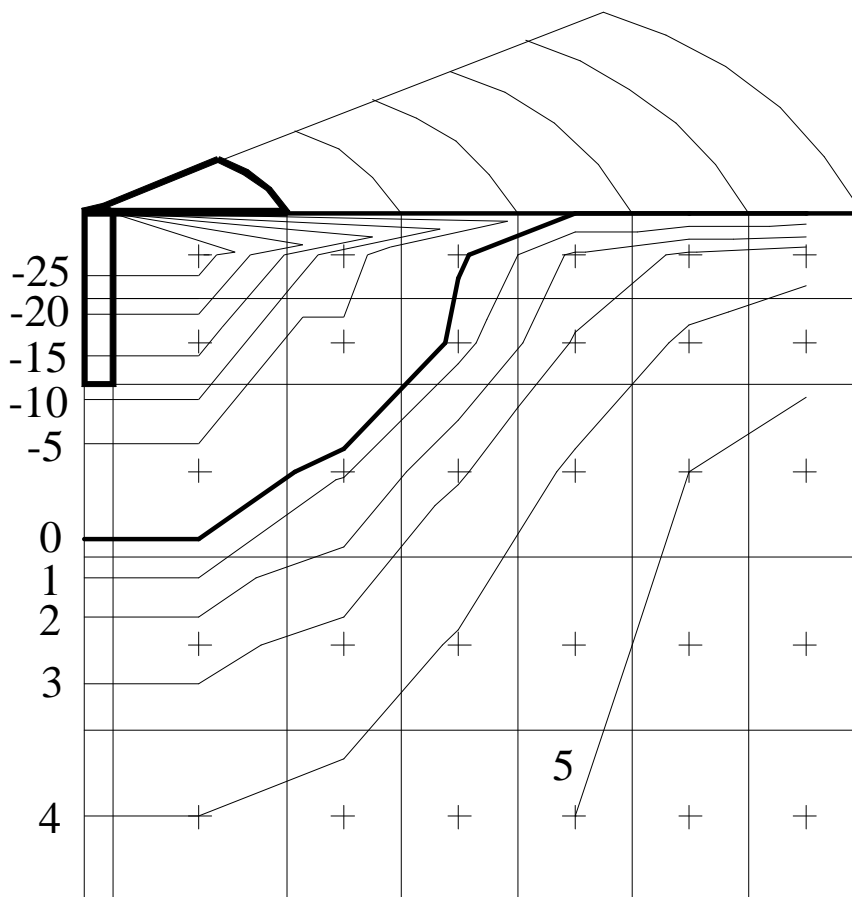
**Fig. 32.** Resultados del modelo de migración con captación, P<sub>pozo</sub>=-40 mmca

Con una **presión de aspiración de -50 mmca** el resultado obtenido es el que se muestra en la Tabla 39 y en la Figura 33. El error cometido por el programa ha sido de +1,80%. El rendimiento de la captación alcanza el 66,49%. El contenido en metano del biogás recuperado ha bajado al 49,2%, mientras que el contenido en oxígeno aumenta hasta el 2,9%.

**Tabla 39.** Resultados del modelo de migración con captación,  $P_{\text{pozo}}=-50$  mmca

		Q=-9,6	Q=-0,6	Q=6,1	Q=11,2	Q=15,0					
Q=74,3	P=-27,7	Q=35,5	P=-6,3	Q=17,3	P=-0,2	Q=8,7	P=2,2	Q=4,4	P=3,2	Q=1,9	P=3,6
	Q=36,9		Q=5,5		Q=3,7		Q=4,8		Q=6,8		Q=8,7
	P=-16,6	Q=20,1	P=-4,5	Q=14,5	P=0,6	Q=8,8	P=3,1	Q=5,0	P=4,2	Q=2,3	P=4,7
	Q=14,9		Q=8,1		Q=4,9		Q=3,1		Q=2,6		Q=2,8
	P=-1,8	Q=9,0	P=0,9	Q=11,0	P=2,9	Q=9,6	P=4,2	Q=6,9	P=5,0	Q=3,6	P=5,4
	Q=4,5		Q=3,8		Q=2,8		Q=1,5		Q=0,5		Q=0,0
	P=2,7	Q=2,5	P=3,4	Q=4,1	P=4,1	Q=4,5	P=4,8	Q=3,8	P=5,2	Q=2,2	P=5,4
	Q=1,3		Q=1,3		Q=1,1		Q=0,6		Q=0,0		Q=-0,4
	P=4,0	Q=1,0	P=4,3	Q=1,9	P=4,6	Q=2,4	P=5,0	Q=2,3	P=5,2	Q=1,5	P=5,4

(\*) Unidades: Q [m<sup>3</sup>/h]; P [mmca]. Sentidos de caudal positivos: ascendente y dcha. a izqda.



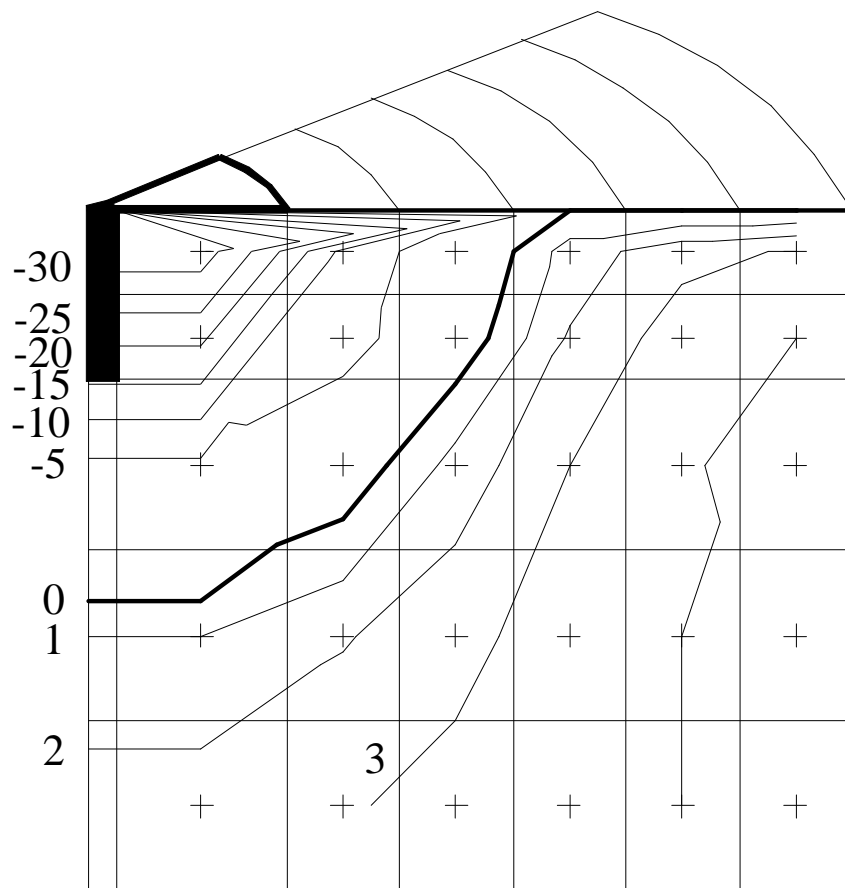
**Fig. 33.** Resultados del modelo de migración con captación,  $P_{\text{pozo}}=-50$  mmca

Finalmente, con una **presión de aspiración de -60 mmca**, se ha obtenido el resultado mostrado en la Tabla 40 y en la Figura 34. El error cometido ha sido de +1,80%. El rendimiento de recuperación ha sido del 73,03%. El biogás recuperado tiene un 46,3% de metano y un 3,9% de oxígeno.

**Tabla 40.** Resultados del modelo de migración con captación,  $P_{\text{pozo}}=-60$  mmca

			Q=-13,1		Q=-3,2		Q=3,9		Q=9,2		Q=12,9
Q=86,7	P=-34,0	Q=42,0	P=-8,7	Q=20,5	P=-1,4	Q=10,3	P=1,4	Q=5,3	P=2,7	Q=2,3	P=3,1
	Q=42,8		Q=5,4		Q=2,6		Q=3,4		Q=5,3		Q=7,0
	P=-21,2	Q=23,7	P=-6,9	Q=17,1	P=-0,8	Q=10,4	P=2,1	Q=5,9	P=3,5	Q=2,7	P=4,0
	Q=17,2		Q=9,0		Q=4,9		Q=2,5		Q=1,6		Q=1,4
	P=-4,1	Q=10,5	P=-0,9	Q=13,0	P=1,4	Q=11,4	P=3,0	Q=8,3	P=3,9	Q=4,4	P=4,4
	Q=5,1		Q=4,2		Q=2,9		Q=1,3		Q=0,1		Q=-0,6
	P=1,0	Q=3,0	P=1,9	Q=4,8	P=2,7	Q=5,3	P=3,5	Q=4,4	P=4,0	Q=2,6	P=4,2
	Q=1,5		Q=1,5		Q=1,2		Q=0,5		Q=0,1		Q=-0,6
	P=2,5	Q=1,2	P=2,9	Q=2,3	P=3,3	Q=2,8	P=3,7	Q=2,7	P=4,0	Q=1,7	P=4,1

(\*) Unidades: Q [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]; P [mmca]. Sentidos de caudal positivos: ascendente y dcha. a izqda.



**Fig. 34.** Resultados del modelo de migración con captación,  $P_{\text{pozo}}=-60$  mmca

### 3.5. Discusión de resultados

La enorme información que este modelo facilita sobre el vertedero no ha podido ser contrastada con datos experimentales de campo. Serían necesario disponer, entre otras cosas, de un sistema de sondas para medir la presión a distintas profundidades así como para medir el caudal de biogás.

No obstante, el comportamiento externo del vertedero sí ha sido analizado mediante ensayos de campo, como se desarrollará en el Apartado 4. El Ensayo Presión/Tiempo y el Ensayo Caudal Aire/Caudal Gas han permitido corroborar resultados anticipados por este modelo. El método de control de extracción del biogás, desarrollado en el Apartado 6, es también congruente con los resultados anticipados por el modelo.

Estos resultados positivos han permitido realizar ciertas consideraciones sobre la captación de gas que afectan tanto al diseño de los pozos de biogás como a la interpretación de los ensayos mediante sondas para el cálculo de la producción de biogás en un nuevo vertedero, matizando el concepto, a veces confuso, de Radio o Zona de Influencia. Estos aspectos se comentarán en los Apartados 4 y 5.

Este modelo explica el problema de la migración lateral del biogás, de forma congruente con las observaciones recogidas de distintos autores y comentadas en el Apartado 3. Las migraciones laterales son posibles y dependen de la aparición de estos factores: (a) la impermeabilización natural o artificial de la superficie del vertedero y (b) la aparición de caminos de alta permeabilidad laterales.

Sin embargo, el modelo no predice una influencia de episodios de fuerte y repentino aumento de la presión atmosférica, fenómeno que algunos autores consideran equiparable a una impermeabilización superficial del vertedero (Christensen *et al.*, 1996). Ello se debe a que el modelo no considera los fenómenos transitorios y, por tanto, no puede interpretar estos casos. De cualquier forma, el hecho de que sea suficiente conocer las presiones *relativas* para predecir el flujo del biogás, nos indica que este flujo sólo cambia cuando evolucionan de forma distinta la presión atmosférica y la presión, bien en los pozos de captación de biogás o bien en un nuevo punto de afloramiento del biogás. Sólo entonces existirán diferenciales de presión que modifiquen el sentido del flujo del gas. Por tanto, según este modelo, la influencia de variaciones en la presión atmosférica queda delimitada a unos escenarios muy concretos. Por ejemplo, para una correcta extracción del biogás, el sistema de control debe mantener constante en los pozos la presión de aspiración *relativa* y no la *absoluta*, al menos mientras no se modifiquen otras variables que indican cambios en la generación de biogás, tal y como se explicará en el Apartado 5.

El modelo de migración no estudia los *fenómenos transitorios* en el vertedero, que pueden ser provocados por cambios bruscos en la presión atmosférica, en la presión de aspiración en los pozos, fenómenos de transporte de lixiviados debidos al vacío generado en los pozos, lluvia, etc. En el Apartado 4.4 se propone un modelo, más sencillo, adecuado para estudiar la captación del biogás, que sí es capaz de estudiar estados transitorios.

## **4. ANÁLISIS DE LA CAPTACIÓN DEL BIOGÁS**

---

## 4. ANÁLISIS DE LA CAPTACIÓN DEL BIOGÁS

### 4.1. Tipos de captaciones de biogás

En la literatura generalmente se distinguen dos tipos de captaciones de biogás, según la disposición espacial de la tubería: las **captaciones verticales** y las **captaciones horizontales**. No obstante, es difícil establecer un límite entre ambas pues, a menudo, la captación vertical dispone de un sistema radial horizontal de tuberías o bien está conectada a las líneas horizontales de evacuación de lixiviados. De hecho, este último diseño, mostrado en la Figura 35, es el más lógico y recomendable.

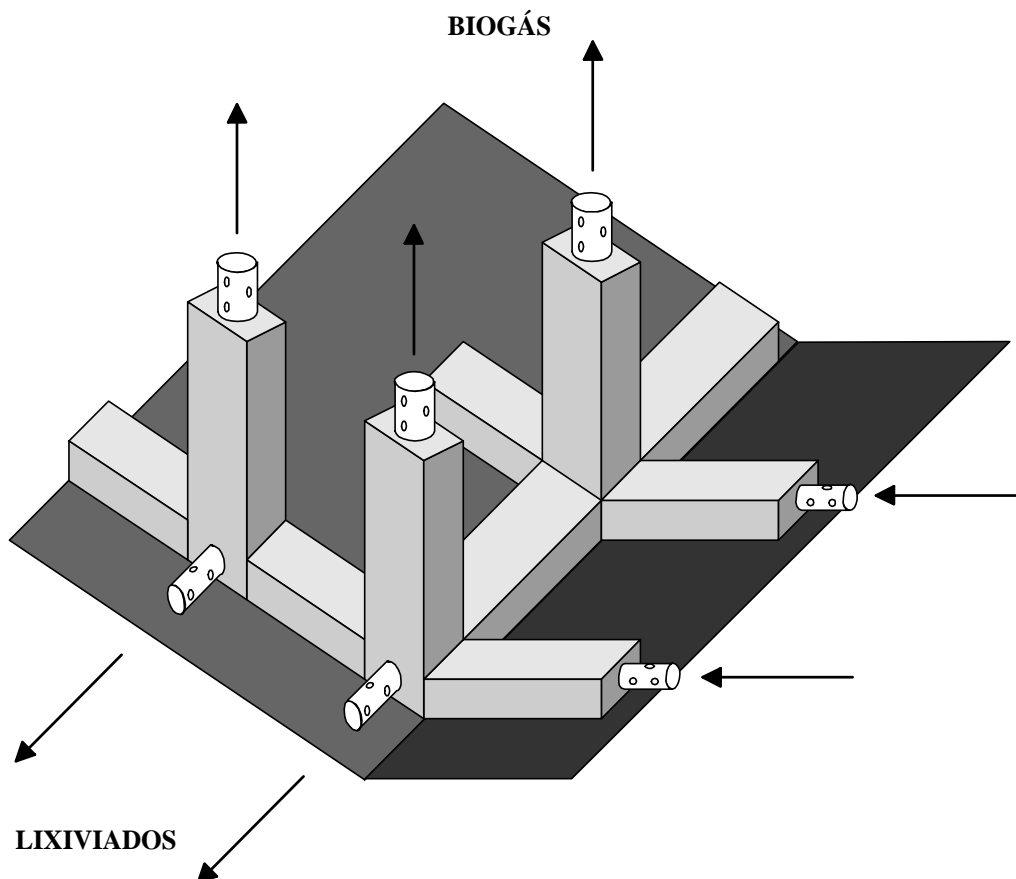


Fig. 35. Drenaje conjunto de biogás y lixiviados

Una captación de biogás debe combinar varios criterios en su diseño:

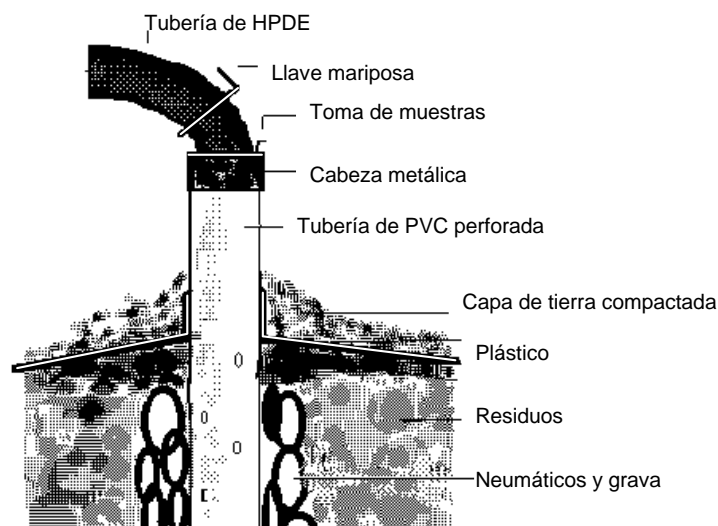
- (a) Lograr una **zona de influencia** del pozo amplia
- (b) Evitar la **entrada de aire**
- (c) Evitar la **acumulación de agua**
- (d) Bajo **coste**
- (e) **Sencillez** de instalación
- (f) Diseño **robusto**

El sistema más habitualmente utilizado en los vertederos es el de captación vertical (Willumsen en Christensen *et al.*, 1996). La Figura 36 muestra el esquema de un pozo estándar, similar a los utilizados en La Zoreda y Bratovo en este trabajo.

Para la construcción de una nueva sonda se debe abrir un pozo en la superficie del vertedero. Una retroexcavadora es capaz de hacer una perforación de unos 6 metros de profundidad. Empleando un taladro tipo Tornillo de Arquímedes es posible profundizar aún más y romper las superficies divisorias entre capas de vertido, aumentando el rendimiento de la captación.

En el pozo abierto se introduce una tubería con perforaciones múltiples al tresbolillo. Estas perforaciones no deben llegar a su extremo superior, dejando libre al menos 1,5 metros. El espacio vacío circundante se rellena con algún material de alta permeabilidad al paso del gas y que no obstruya las perforaciones de la tubería. Este material actuará además como drenaje, evitando la acumulación de agua en la tubería de extracción. Finalmente, se impermeabiliza el área alrededor del pozo utilizando, por ejemplo, un plástico a modo de paraguas.

El sellado superficial es de suma importancia, ya que la chimenea orienta el flujo de biogás hacia sí misma gracias a la aplicación de una ligera depresión. La única barrera a la entrada de aire la constituye la baja permeabilidad de los residuos. Por ello, se recomienda taladrar la tubería de captación sólo a partir de una cierta distancia de la superficie del vertedero. Mediante la impermeabilización plástica de la superficie circundante al pozo se logra una mejora complementaria. Al disminuir la entrada de aire aumenta la zona de influencia de cada pozo. En el caso extremo, si el vertedero fuera perfectamente estanco, un solo pozo recuperaría todo el caudal generado.



**Fig. 36.** Corte esquemático de una captación vertical de biogás



En la Figura 36 también puede observarse el punto de toma de muestras para la medida de la composición del biogás, la temperatura y la presión.

Con objeto de aumentar la zona de influencia de las captaciones verticales y evitar la acumulación de agua en su interior, se puede construir un drenaje radial complementario. Así, en el momento de iniciar un nuevo vertido, se abren zanjas radiales al pozo en la superficie del vertedero, introduciendo algún material drenante o incluso tuberías perforadas. Estas zanjas son tapadas con los residuos de la nueva tongada.

Dentro aún de los pozos verticales, la Fotografía 9 muestra otras alternativas constructivas. Se trata en este caso de pozos de *venteo* del biogás a la atmósfera. En todos ellos existe una tubería central taladrada, aunque de pequeño diámetro (200 mm aproximadamente), lo que haría poco eficiente una extracción forzada del biogás. En los dos primeros casos, Doña Juana (Bogotá) y Curva de Rodas (Medellín), la tubería ha sido rodeada de piedras sujetas formando bloques cúbicos por una malla metálica. Al menos en el caso de Doña Juana, estas canalizaciones verticales del biogás están construidas sobre las horizontales de los lixiviados, formando el conjunto una maya tridimensional cuadrada que abarca todo el vertedero. En el último caso, correspondiente al vertedero de Cerro Patacón (Área Metropolitana de Panamá), las tuberías han sido protegidas con una geomalla, de dudosa permeabilidad al paso del biogás.



**Fotografía 9a.** Distintas chimeneas de venteo del biogás: (a) Doña Juana, Bogotá

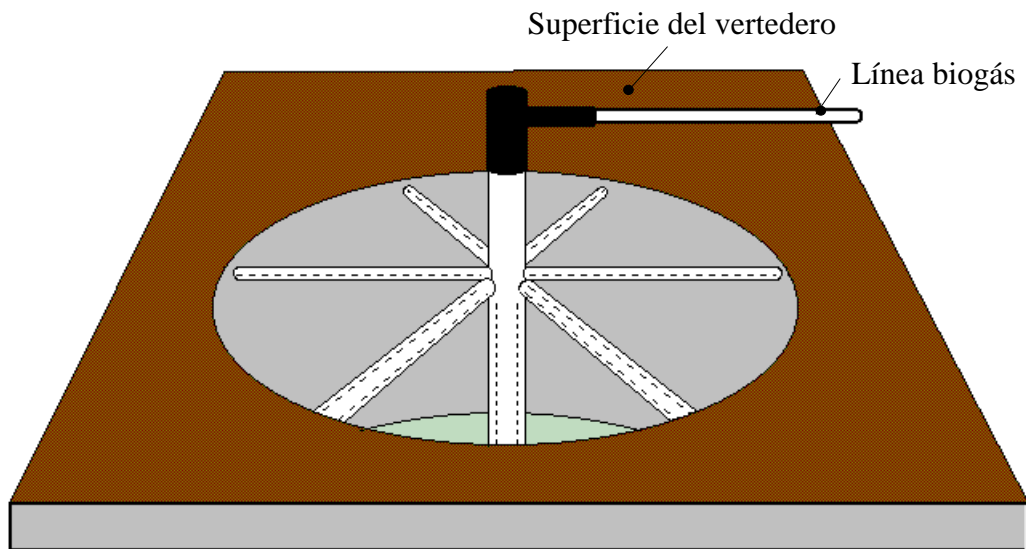


**Fotografía 9b.** Distintas chimeneas de venteo del biogás: (b) Curva de Rodas, Medellín



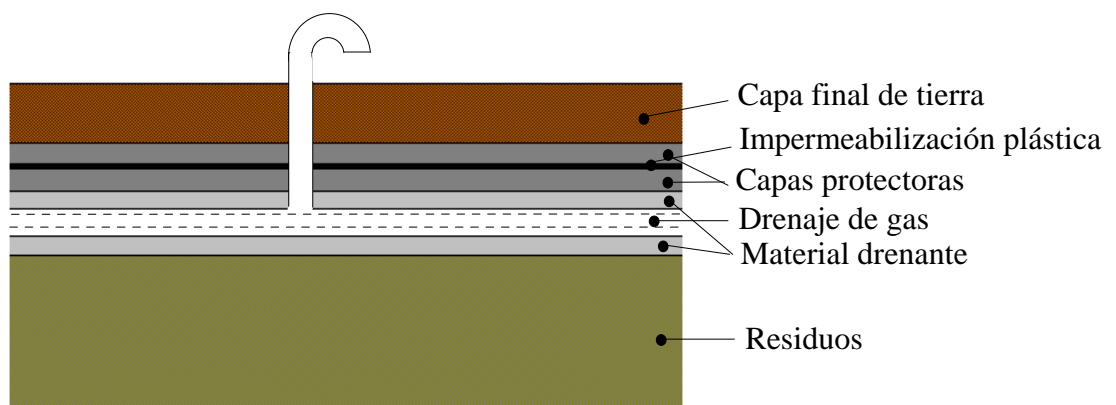
**Fotografía 9c.** Distintas chimeneas de venteo del biogás: (c) Cerro Patacón, Panamá

Como ejemplo de otros tipos de sistemas, la Figura 37 muestra las captaciones radiales utilizadas en el vertedero de Aranguren (Mancomunidad de Pamplona). Este tipo de sondas presentan tres inconvenientes. El primero, la mayor complejidad de instalación, que entorpece las labores de vertido. En segundo lugar, el mayor coste de instalación. Finalmente, la menor capacidad de regulación de la extracción del biogás, pues son pozos de gran tamaño, con un sólo punto de regulación de la depresión, y reemplazan a un cierto número de sondas verticales, cada una de las cuales puede ser regulada independientemente.



**Fig. 37.** Captación radial de biogás

Finalmente, en vertederos ya clausurados, el diseño del sistema de captación de biogás se integra en la obra de clausura del vertedero, tal y como muestra la Figura 38.



**Fig. 38.** Captación de biogás en un vertedero clausurado

## 4.2. Análisis y medida de las variables que intervienen en la captación del biogás

En este apartado se analizan experimentalmente las distintas variables que entran en juego al someter una captación de biogás a una presión relativa negativa. Para ello se proponen diferentes ensayos.

Con los datos obtenidos, se avanzará en la validación del modelo propuesto en el Capítulo 3 sobre la migración del biogás en el vertedero. Asimismo, se propondrá un modelo simplificado, aunque capaz de estudiar fenómenos transitorios, para una captación de biogás.

Las variables que hemos considerado en el estudio experimental son:

- **Presión**
- **Caudal**
- **Composición (metano y oxígeno)**
- **Tiempo**
- **Longitud**

Los equipos necesarios para el análisis de la composición del biogás ya han sido descritos en el Apartado 2.4.4. A continuación se describen los equipos utilizados en la medida de la presión y del caudal.

No se han evaluado numéricamente, por falta de recursos y/o carencia de fuentes fiables de información, otras variables que influyen en la captación del biogás, como son la antigüedad de los residuos, profundidad del vertedero, materiales de recubrimiento, diseño de las captaciones, etc. No obstante, se ha analizado su influencia y, en algunos casos, se realiza una aproximación.

### 4.2.1. Descripción de los equipos de medida

A continuación se describen los equipos utilizados en la medida de la presión y del caudal en los vertederos de La Zoreda y Bratovo: los manómetros en "U" y el Extractor Portátil de Biogás.

#### 4.2.1.1. Presión relativa en el pozo de extracción

Debido a la constante generación de biogás, en un vertedero donde no haya un sistema de extracción, existirá una sobrepresión relativa que forzará la salida del biogás a la atmósfera. El valor de esta sobrepresión está condicionado fundamentalmente por la actividad metanogénica. Provocan también modificaciones en esta presión los movimientos del lixiviado dentro del vertedero y los cambios en el nivel freático exterior (UK Department of the Environment, 1994). Ensayos realizados en el vertedero de La Zoreda muestran sobrepresiones en los pozos entre unos pocos milímetros de columna de agua hasta 130 mm.c.a. (1 mm.c.a.  $\approx$  0,1 Pa  $\approx$  10 mbar).

Al instalar el sistema de desgasificación, se somete a la biomasa a una pequeña depresión relativa, para orientar el flujo del biogás hacia los pozos. Esta depresión es inferior normalmente a -40 mm.c.a. según las medidas realizadas en el vertedero de La Zoreda. Una depresión excesiva provoca la entrada de aire a través del terreno hacia el vertedero (Eden, 1990; Brown y Maunder, 1993). Naturalmente estos valores pueden verse modificados si las captaciones de biogás tienen otro diseño y logran un sellado más impermeable del vertedero. Esta depresión se incrementa aguas arriba de la línea de aspiración, hasta entre -1000 y -2000 mm.c.a. en los turboaspiradores (Straka *et al.*, 1995).

Atendiendo a estos requerimientos, el manómetro utilizado debe tener las siguientes características:

- Rango de medida: -200 mm.c.a. a +200 mm.c.a.
- Precisión: 1 mm.c.a.
- Portátil y preparado para trabajar en intemperie

Se recomienda la utilización de manómetros o vacuómetros en "U" por su sencillez de manejo, fiabilidad y bajo coste. Deben tener válvulas de retención para evitar derrames del líquido indicador e imanes, o cualquier otro sistema de sujeción, para facilitar el manejo.

Para la medida de la presión en el pozo, se utiliza la llave de toma de muestras situada en el cabezal metálico que empalma el pozo con la línea de conducción de polietileno, según se ha mencionado en el Apartado 4.1.

#### 4.2.1.2. Caudal de biogás: Extractor Portátil de Biogás

Para la determinación del caudal de biogás recuperable en el vertedero se recomienda la construcción de sondas de captación, con objeto de simular unas condiciones similares a las del sistema de extracción final. Para ello, la opción más lógica es la construcción de sondas del mismo tipo al usado para la recuperación del biogás en el sistema de aprovechamiento. Se construirán en número naturalmente inferior al de la futura red de captación.

Sin provocar una extracción forzada del biogás, no es posible determinar con precisión el caudal de biogás recuperable. Algunos parámetros, como la pequeña corriente de biogás que se observa en una sonda recién construida o la sobrepresión que se alcanza al taptarla, pueden orientar cualitativamente sobre la existencia de biogás, pero difícilmente darán un resultado fiable. Lo mismo podría decirse de otros sistemas, como la medida de fugas superficiales por medio de cámaras de flujo (Reinhart *et al.*, 1992), la realización de fotografía en infrarrojo y termografía aérea (Crowhurst y Manchester, 1993) o la aplicación de métodos geofísicos. Estas estrategias, por si solas, tienen limitada utilidad, precisamente porque se alejan de la situación final de extracción forzada, aunque de forma combinada pueden ser muy útiles.

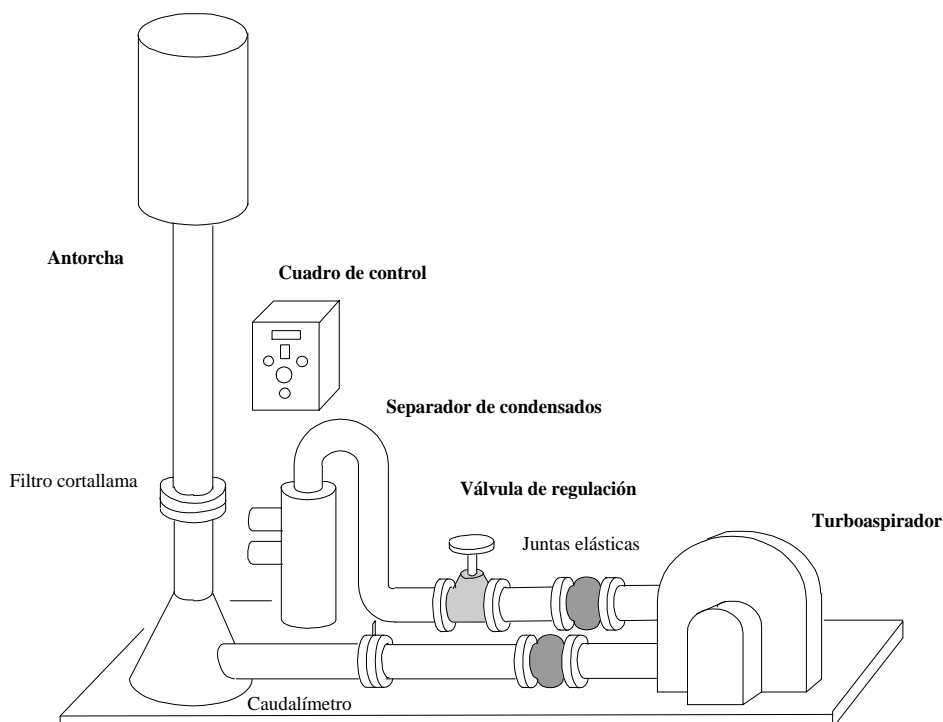
El **Equipo Portátil de Extracción de Biogás** se concibe como una *mini* estación de *extracción, control e incineración* de biogás. Evita falsear la realidad final, pues conectada a un pozo simple crea las mismas condiciones que existirán cuando se ponga en marcha la red definitiva de extracción de biogás.

El Extractor Portátil consta de cuatro elementos básicos: la *antorcha de incineración*, el *turboaspirador*, la *válvula de regulación del caudal* y el *separador de condensados*. El equipo se completa con caudalímetros, sistemas de encendido de llama, de control de combustión, etc. (Martín *et al.*, 1995e).

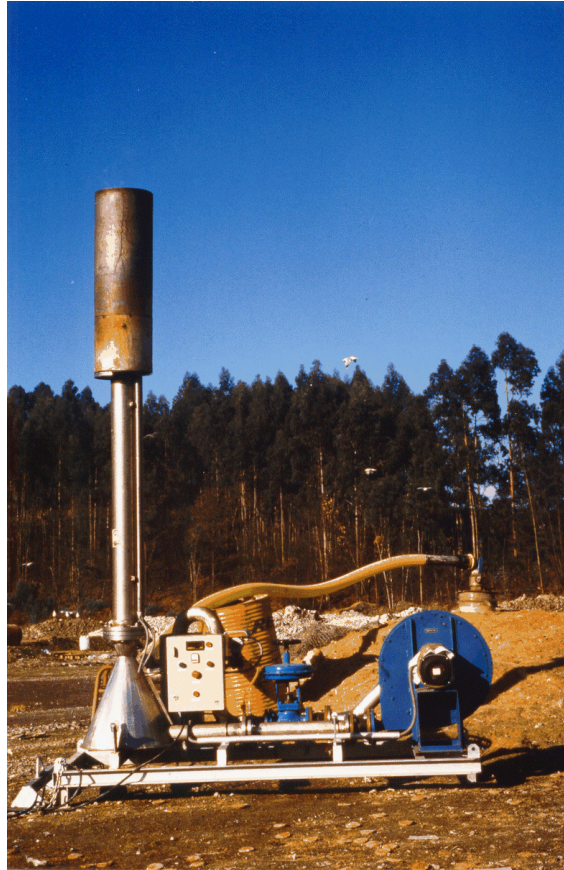
El Extractor Portátil debe estar preparado para el trabajo en un amplio margen de caudal de biogás. En el equipo utilizado en este trabajo se han establecido los **límites de funcionamiento** en  $10 \text{ m}^3\text{N/h}$  y  $100 \text{ m}^3\text{N/h}$  de biogás al 55% de metano en volumen. El contenido en metano real, no obstante, será variable entre distintos vertederos, distintos pozos de un mismo vertedero y distintas depresiones de aspiración para un mismo pozo.

El equipo también debe estar preparado para trabajar tanto a *régimen variable*, en ensayos cortos, como a *régimen permanente*, en ensayos de varios días de duración. Se entiende, no obstante, que no se trata de un equipo diseñado para la *desgasificación de vertederos* sino para la *evaluación del potencial de generación de biogás en vertederos* mediante ensayos.

La Figura 39 representa esquemáticamente los elementos que constituyen el Extractor Portátil. La Fotografía 10 muestra el Extractor Portátil de Biogás desarrollado para la ejecución de los ensayos definidos en este estudio.



**Fig. 39.** Extractor Portátil de Biogás



**Fotografía 10.** Extractor Portátil de Biogás

#### 4.2.2. Ensayo Presión/Tiempo

Este es el primero y más sencillo de una serie de ensayos propuestos. Proporciona una información muy valiosa que incluso es útil para introducir algunos conceptos del modelo de captación de biogás.

##### 4.2.2.1. Descripción del ensayo

Se trata de un ensayo original. Para el ensayo disponemos de un pozo en régimen de extracción forzada, con una llave todo/nada en cabeza, inicialmente abierta. Se cierra rápidamente esta llave, cesando la aspiración, y se registra la variación de la presión con el tiempo (Martín *et al.*, 1994). En régimen de extracción, la presión relativa medida en el cabezal del pozo es de -10 mm de columna de agua aproximadamente. Al cerrarlo, esta depresión pasa rápidamente (en un minuto aproximadamente) a una sobrepresión relativa de unos 10 mmca, donde queda estabilizada.

##### 4.2.2.2. Resultados experimentales

Las Figuras 40 a 45 muestran ejemplos de distintos ensayos Presión/Tiempo llevados a cabo en el vertedero de La Zoreda.

En la Tabla 41 se muestran los valores de la sobrepresión final obtenida en distintos Ensayos Presión/Tiempo en distintos pozos del vertedero de La Zoreda. En la Tabla 42 se muestran una serie de medidas de la presión del biogás en el interior de vertederos recogidas de la bibliografía. Únicamente los valores registrados por Campbell (1989) parecen excesivamente altos.

**Tabla 41.** Ensayos Presión/Tiempo (vertedero de La Zoreda)

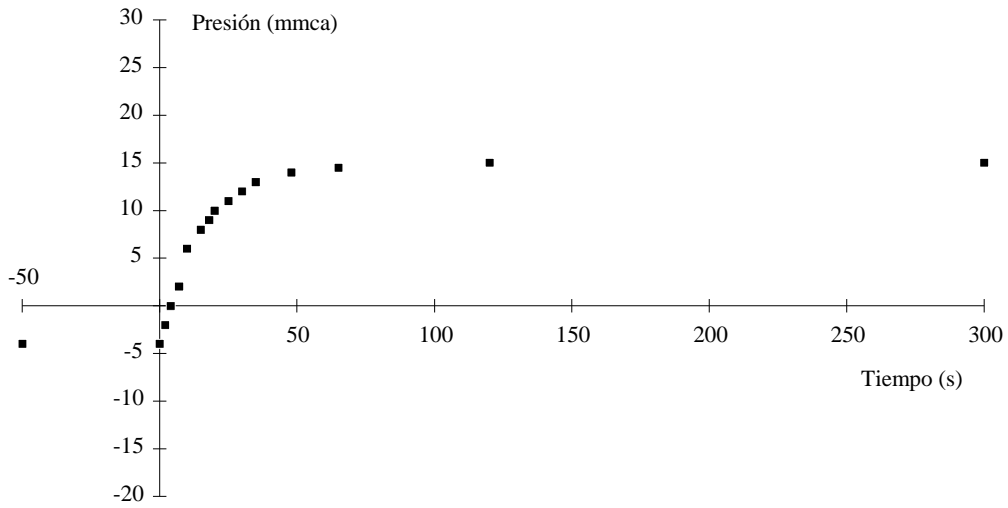
Pozo	Fecha	P <sub>aspiración</sub> (mm.c.a.)	P <sub>cerrado</sub> (mm.c.a.)
F7	24.11.93	-4	+5
	9.12.93	-3	+6
	13.12.93	-3.5	+6.5
F5	9.12.93	-4	+15
	13.12.93	-3.5	+15.5
F11	9.12.93	-14.5	+22
	13.12.93	-13	+18
B5-II (doble)	3.2.94	+1	+40
	4.2.94	-1.5	+40
	7.2.94	-1	+37
	10.2.94	-4	+36
A8-I (doble)	3.2.94	-25	+130
	4.2.94	-38	+125
	7.2.94	-37	+125
A2-II (doble)	3.2.94	-12	+50
	4.2.94	-20	+40
	7.2.94	-19	+33
A2-I (doble)	3.2.94	-10	+20
	4.2.94	--	+15
	7.2.94	-31	+14
B11-I (doble)	4.2.94	+26	+30

(\*) Notación de los pozos: La letra indica la caseta de regulación a la que pertenece el pozo (A, B... F); después se indica la línea a la que está conectado (1,2... 12); finalmente, si hay más de un pozo en una misma línea, se indica su posición (I, II ó III)

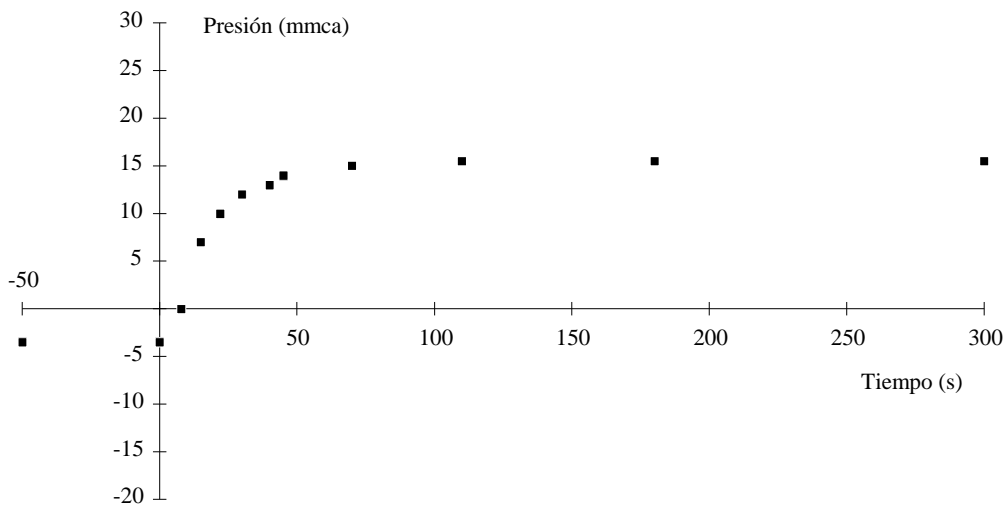
**Tabla 42.** Presión del biogás en el interior del vertedero según distintos autores (según Peter Kjeldsen, del libro de Christensen *et al.*, 1996)

Autor	Sobrepresión (mmca)
Bogner <i>et al.</i> (1988)	50 - 200
Campbell (1989)	> 800
Jones <i>et al.</i> (1988)	1 - 3
Kerfoot (1993)	200 - 250
Kjeldsen y Fischer (1995)	20 - 200
Mc Omber <i>et al.</i> (1982)	< 100
Williams y Aitkenhead (1991)	200
Wittman (1985)	30 - 300

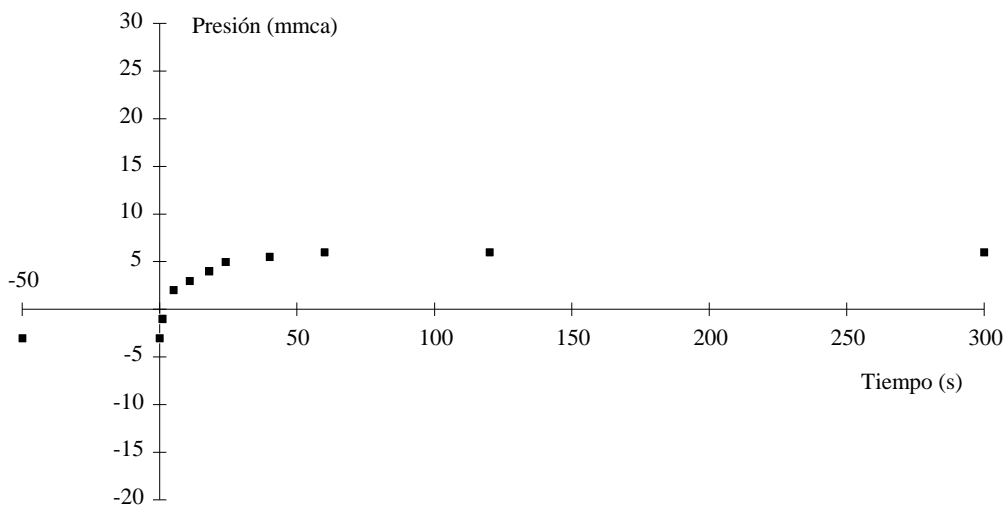




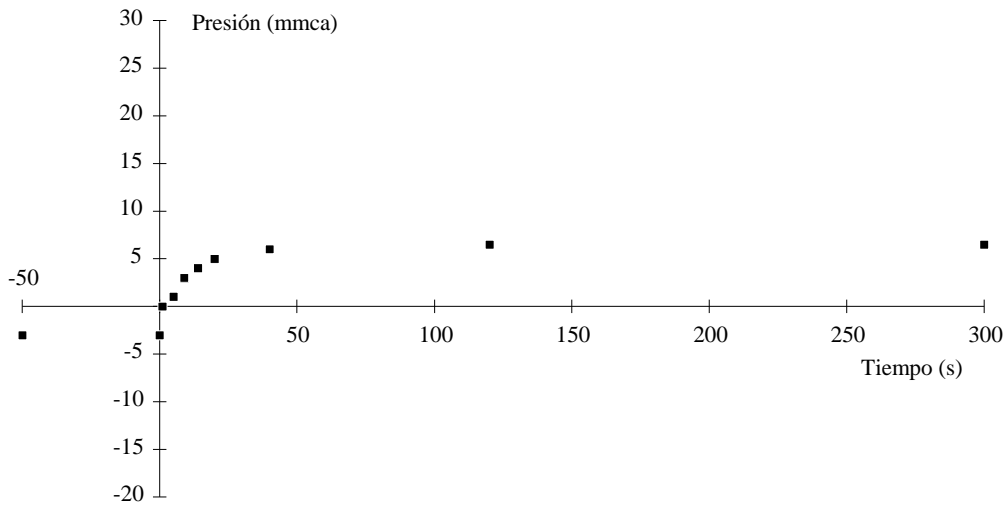
**Fig. 40.** Ensayo Presión/Tiempo, Pozo F5, 9/12/93



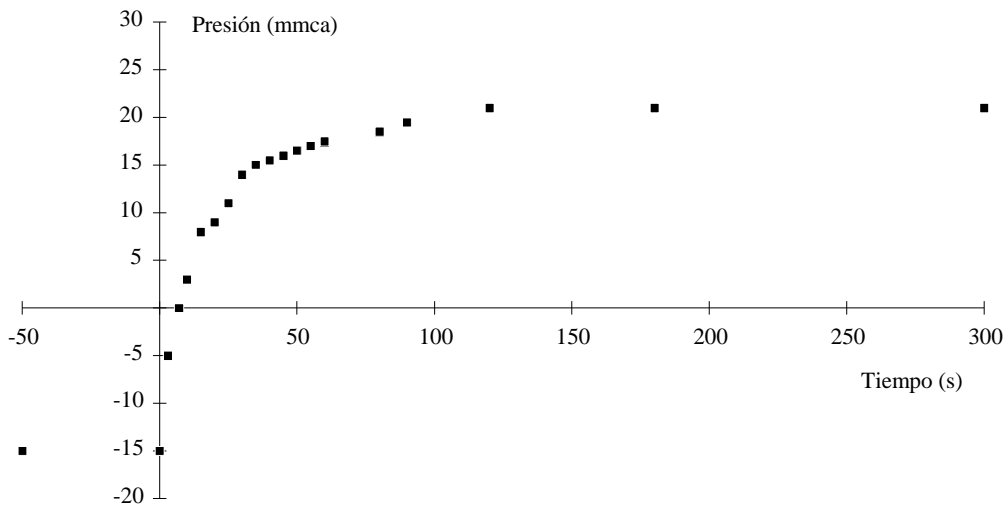
**Fig. 41.** Ensayo Presión/Tiempo, Pozo F5, 13/12/93



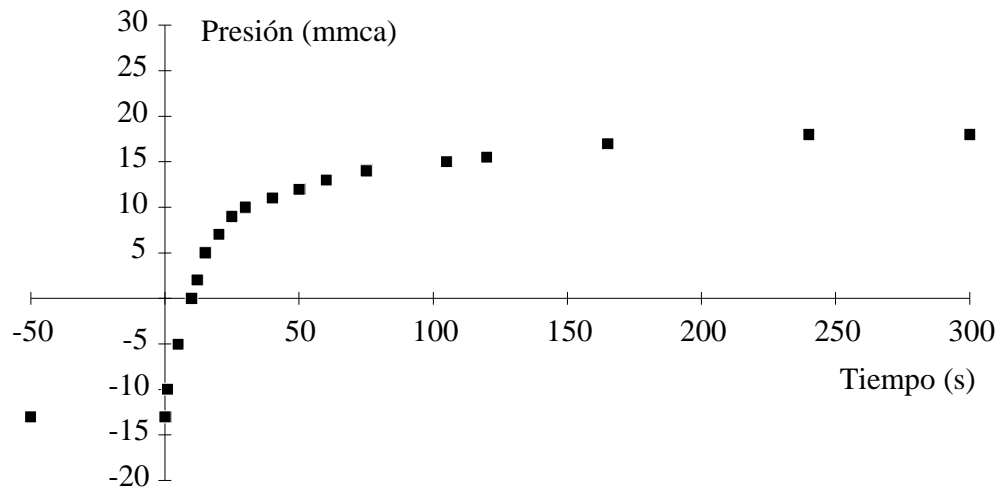
**Fig. 42.** Ensayo Presión/Tiempo, Pozo F7, 9/12/93



**Fig. 43.** Ensayo Presión/Tiempo, Pozo F7, 13/12/93



**Fig. 44.** Ensayo Presión/Tiempo, Pozo F11, 9/12/93



**Fig. 45.** Ensayo Presión/Tiempo, Pozo F11, 13/12/93

4.2.2.3. Interpretación de resultados experimentales

Considerando el vertedero como un depósito cerrado de volumen y temperatura constantes y el biogás como gas ideal, se demuestra que la rampa de subida de la gráfica Presión/Tiempo es directamente proporcional a la velocidad de generación de biogás en la zona.

$$P(t) V = n(t) R T \Rightarrow P = k n(t) \quad [4-1]$$

donde,

**k** es una constante de proporcionalidad, inversamente proporcional al volumen de vertedero afectado por el pozo

**n(t)** la cantidad de biogás contenida en el vertedero en el instante  $t$ , variable con el tiempo debido a su generación constante.

Podemos calcular  $n(t)$  como:

$$n(t) = n_0 + V g t \quad [4-2]$$

donde,

**n<sub>0</sub>** es la cantidad de biogás inicial

**g** el caudal de biogás generado por unidad de volumen y de tiempo en el vertedero

Derivando la expresión (4-1) respecto del tiempo y sustituyendo la ecuación (4-2) obtenemos:

$$dP/dt = k dn/dt = k V g \quad [4-3]$$

Inicialmente, mientras la presión relativa del vertedero es negativa, la variación de presión es debida a la generación de gas y a la posible entrada de aire desde el exterior. Es decir, el producto  $Vg$  se calcula como suma entre el caudal de biogás generado,  $Q_{generado}$ , y el caudal de aire que penetra a través del terreno,  $Q_{aire}$ .

Una vez que la presión relativa es positiva, el producto  $Vg$  se calcula como diferencia entre el caudal de biogás generado,  $Q_{generado}$ , menos el caudal de fugas a través del terreno,  $Q_{fugas}$ . Por tanto, sustituyendo en la expresión (4-3) tendremos:

$$\frac{dP}{dt} = \begin{cases} k(Q_{generado} + Q_{aire}) & P < 0 \\ k(Q_{generado} - Q_{fugas}) & P > 0 \end{cases} \quad [4-4]$$

Por otra parte, si consideramos de nuevo el vertedero como un depósito cerrado con salida a la atmósfera, con una pérdida de carga dependiente del recubrimiento superficial en la zona, podremos escribir que:

$$P(t) = \begin{cases} -k_{terreno} Q_{aire} & P < 0 \\ k_{terreno} Q_{fugas} & P > 0 \end{cases} \quad [4-5]$$

Despejando en esta última expresión  $Q_{fugas}(t)$  y  $Q_{aire}(t)$  y sustituyéndolo en (4-4) tendremos:

$$\frac{dP}{dt} = k(Q_{\text{generado}} - \frac{P(t)}{k_{\text{terreno}}}) \quad \forall P \quad [4-6]$$

Resolviendo esta ecuación diferencial, obtenemos:

$$P(t) = Q_{\text{generado}}(k_{\text{terreno}} - e^{-t \frac{k}{k_{\text{terreno}}}}) = P_{\text{final}} - [P_{\text{final}} - P(0)]e^{-t \frac{k}{k_{\text{terreno}}}} \quad [4-7]$$

donde se ha aplicado la condición de contorno  $P(\infty) = P_{\text{final}}$ .

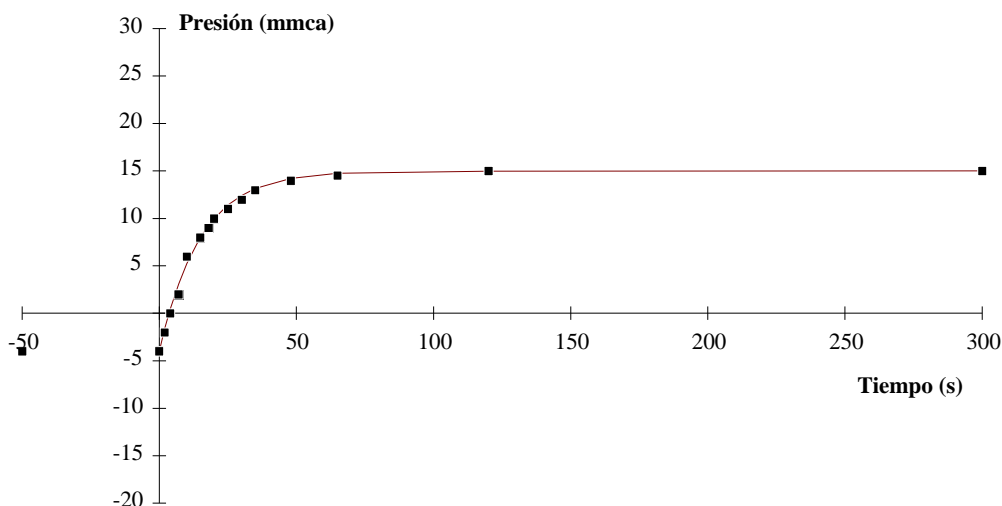
Es posible calcular  $k_{\text{terreno}}/k$  a partir de los resultados del Ensayo Presión/Tiempo, teniendo en cuenta que para  $t = k_{\text{terreno}} / k$  tenemos que  $P(t) = 0,632 P_{\text{final}} + 0,368 P(0)$ .

La constante  $k$  depende inversamente del volumen de vertedero dominado por la sonda. Un valor de  $k$  bajo supone una gráfica Presión/Tiempo con poca pendiente inicial y debe producirse cuando el pozo tiene una zona de influencia alta y, por tanto, suministra un alto caudal de biogás.

De igual forma, al comparar dos pozos en los que el sellado superficial sea de similar permeabilidad, aquél que alcance un mayor valor de la sobrepresión final debe ser capaz de extraer un mayor caudal de biogás.

La Figura 46 muestra el resultado de superponer los datos experimentales obtenidos para el pozo F11 el día 9/12/93 y esta curva exponencial. El notable grado de ajuste, pese a la sencillez de las hipótesis utilizadas, justificará el desarrollo de un sencillo modelo de las captaciones de biogás, modelo que será planteado en el Apartado 4.4. Es importante resaltar que la curva exponencial propuesta se ha obtenido suponiendo que la variación de la presión observada en el ensayo únicamente es debida a la actividad metanogénica en el vertedero. Experiencias posteriores en el vertedero de La Zoreda han permitido comprobar la relación que existe entre el valor de la sobrepresión final y el caudal que es posible recuperar en un pozo (Sastre *et al.*, 1997).

En resumen, el Ensayo Presión/Tiempo nos permite, disponiendo únicamente de un manómetro y de las sondas de captación de biogás, tener una primera orientación sobre la producción de biogás en un pozo. Así, por ejemplo, ha sido utilizado con éxito para seleccionar, entre un grupo, el mejor pozo para la realización de los Ensayos Qaire/Qgas en el vertedero de La Zoreda.



**Fig. 46.** Superposición de los datos experimentales del Pozo F5 (9/12/93) y una función exponencial

#### 4.2.3. Ensayo Caudal Aire/Caudal Gas

##### 4.2.3.1. Descripción del ensayo

En este ensayo se registra el **caudal** de biogás recuperado y su **composición** al aplicar distintas **depresiones** en el pozo. El registro de la composición del biogás permite discernir, dentro del caudal de *biogás*, entre el correspondiente a *gas de vertedero* y el correspondiente a entrada de *aire* en cada punto, según se ha explicado en el Apartado 2.4.4. Para estos ensayos se ha utilizado el **Extractor Portátil de Biogás**.

El ensayo se inicia con la válvula de regulación del caudal completamente cerrada, de modo que el caudal de biogás será nulo y la presión en el pozo será positiva, como se explicó en el Ensayo Presión/Tiempo. En el transcurso del ensayo, se abre progresivamente la válvula de regulación y se anotan las diferentes variables consideradas (*presión relativa en el pozo, posición de la válvula de regulación, caudal recuperado y composición del biogás* -metano, dióxido de carbono y oxígeno-). Entre medida y medida se esperan 15 minutos para permitir la estabilización de las variables en el pozo. Se finaliza cuando la válvula está totalmente abierta o se observa una entrada de aire muy alta (un nivel de oxígeno superior al 5%). En este punto, el ensayo se continúa a la inversa cerrando ahora la válvula de regulación. De este modo, se obtienen dos valores distintos de composición para cada valor de la depresión aplicada. La discrepancia entre ambos, debida a fenómenos de histéresis, es decir, a inercias en el pozo, nos indica el grado de fiabilidad del ensayo. La duración total de un ensayo es de cuatro horas aproximadamente.

## 4.2.3.2. Resultados experimentales

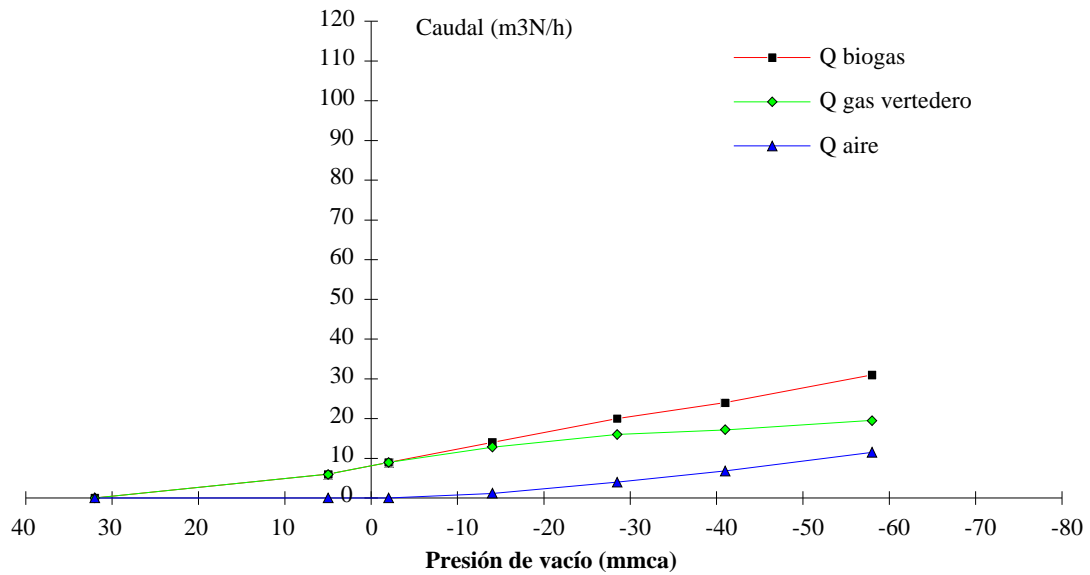
En las siguientes páginas mostramos los resultados experimentales de diversos ensayos de este tipo realizados tanto en el vertedero de La Zoreda como en el de Bratovo, numéricamente en las Tablas 43 y 44 y gráficamente en las Figuras 47 a 55 .

**Tabla 43.** Resultados obtenidos en Ensayos Caudal Aire/Caudal Gas en el vertedero de La Zoreda

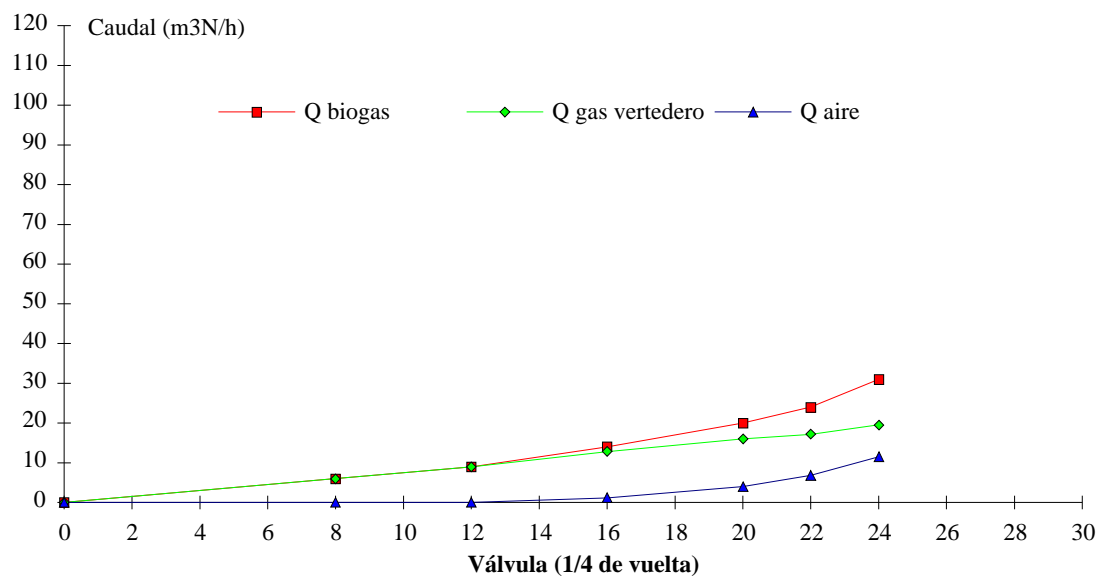
FECHA	HORA	P (mmca)	VAL	Q (m <sup>3</sup> N/hora)	CH4	CO2	O2	Qgas	Qaire
16.05.94		31	0	0	64	36	0	0	0
B5 - II	10:15	7	2	6	64	36	0	6	0
	10:35	-4	2,5	10	64	36	0	10	0
	10:53	-13,5	3,25	14	60,7	36,2	0,5	13,65	0,35
	10:56	-23	4	19	52,6	32,4	2,4	16,72	2,28
	11:15	-37	4,75	25	46,1	29,4	4,5	19,375	5,625
	11:35	-47	5	30	43,7	25,7	5,8	21,3	8,7
FECHA	HORA	P (mmca)	VAL	Q (m <sup>3</sup> N/hora)	CH4	CO2	O2	Qgas	Qaire
23.05.94	10:15	32	0	0	64	35	0	0	0
B5 - II	10:45	5	2	6	64	35	0	6	0
	10:55	-2	3	9	64	35	0	9	0
	11:00	-14	4	14	57,6	33,1	1,7	12,81	1,19
	11:15	-28,5	5	20	47,6	30,6	4	16	4
	11:30	-41	5,5	24	45	27,8	5,7	17,16	6,84
	11:45	-58	6	31	40,5	24,3	7,4	19,53	11,47
FECHA	HORA	P (mmca)	VAL	Q (m <sup>3</sup> N/hora)	CH4	CO2	O2	Qgas	Qaire
22.02.94		30	0	0	61,8	34,9	0	0	0
A2-II		19,5	0	0	61,8	34,9	0	0	0
		17	1	4	61,8	34,9	0	4	0
		15	2	5	61,8	34,9	0	5	0
		9	3	9	61,8	34,9	0	9	0
		5	3,5	11	61,8	34,9	0	11	0
		1	4	15	61,8	34,9	0	15	0
		-7	5	22	61,8	34,9	0	22	0
		-25	6	40	57,7	33,9	1	38	2
		-33	6,5	52	54,9	32,6	1,8	47,32	4,68
		-55	7	69	51,5	30,7	2,8	59,34	9,66
		-68	7,5	81	49,3	28,9	3,5	66,825	14,175

**Tabla 44.** Resultados obtenidos en Ensayos Caudal Aire/Caudal Gas en el vertedero de Bratovo

FECHA	HORA	P (mmca)	VAL	Q (m <sup>3</sup> N/hora)	CH4	CO2	O2	Qgas	Qaire
2.11.95	9.50		0	0,0	47,0	31,5	1,8	0,0	0,0
I	10.12		0	0,0	48,0	33,0	1,5	0,0	0,0
BRATOV	10.20		6	8,0	52,9	35,2	0,7	7,7	0,3
O	10.35		9	15,0	52,1	35,0	0,8	14,4	0,6
	10.40		13	25,0	48,8	32,3	1,3	23,4	1,6
	10.50		15	35,0	45,7	31,7	2,4	30,8	4,2
	11.00		16	45,0	45,0	31,0	3,0	38,3	6,8
	11.10		17	55,0	44,0	30,9	3,3	45,9	9,1
	11.25		15	30,0	42,2	30,1	3,5	24,8	5,3
FECHA	HORA	P (mmca)	VAL	Q (m <sup>3</sup> N/hora)	CH4	CO2	O2	Qgas	Qaire
3.11.95	10.30		0	0,0	48,6	30,5	2,1	0,0	0,0
II	11.00		0	0,0	46,8	30,3	2,3	0,0	0,0
BRATOV	11.15		12	9,0	49,2	32,1	1,9	8,1	0,9
O	11.30		16	14,0	45,0	29,4	2,5	12,3	1,8
	11.45		18	17,0	41,2	27,0	3,7	13,9	3,1
	12.00		16	14,0	40,5	26,4	4,3	11,0	3,0
	12.15		10	7,0	42,6	28,5	3,7	5,7	1,3
FECHA	HORA	P (mmca)	VAL	Q (m <sup>3</sup> N/hora)	CH4	CO2	O2	Qgas	Qaire
7.11.95	12.00		2	5,0	51,9	33,5	0,0	5,0	0,0
III	12.20		8	11,0	51,6	34,4	0,0	11,0	0,0
BRATOV	12.45		12	22,0	46,0	26,1	2,7	19,0	3,0
O	13.00		10	15,0	48,1	27,8	1,9	13,6	1,4
	13.20		13	27,0	42,8	24,6	3,6	22,1	4,9
FECHA	HORA	P (mmca)	VAL	Q (m <sup>3</sup> N/hora)	CH4	CO2	O2	Qgas	Qaire
8.11.95	12.30		6	12,0	51,9	32,8	0,0	12,0	0,0
IV	12.55		2	15,0	54,3	32,9	0,0	15,0	0,0
BRATOV	13.20		10	23,0	50,6	31,5	0,7	22,2	0,8
O	13.45		12	33,0	51,0	31,4	0,5	32,2	0,8
	14.05		14	48,0	50,7	31,5	0,5	46,8	1,2
	14.25		16	67,0	48,3	30,0	1,2	63,0	4,0
	14.55		19	106,0	46,1	27,6	2,1	94,9	11,1



**Fig. 47.** Ensayo Caudal Aire/Caudal Gas, presiones, pozo B5 - II, 23/05/94 (La Zoreda)



**Fig. 48.** Ensayo Caudal Aire/Caudal Gas, apertura de válvula, pozo B5 - II, 23/05/94 (La Zoreda)



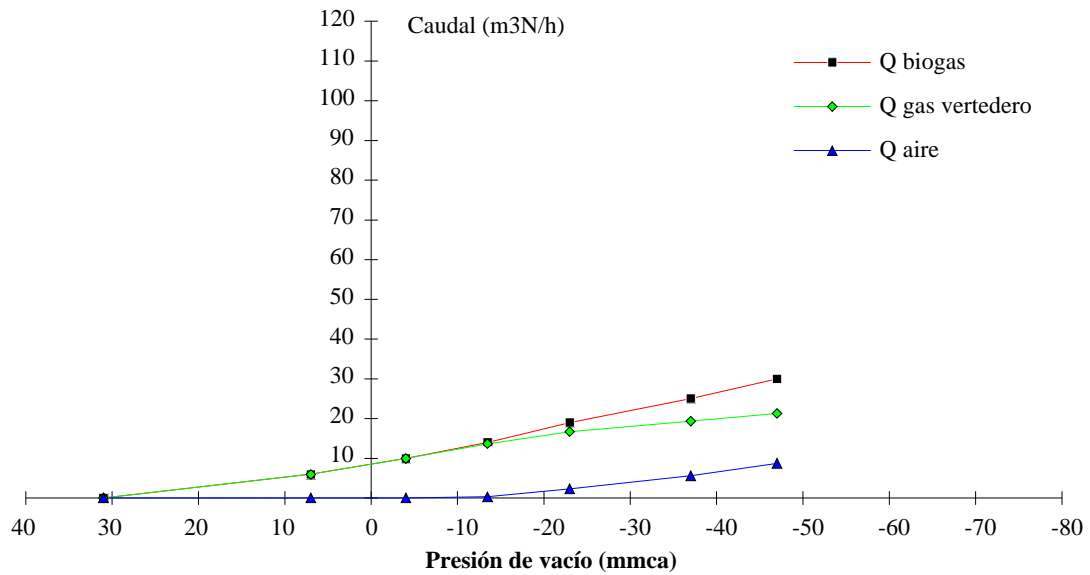


Fig. 49. Ensayo Caudal Aire/Caudal Gas, presiones, pozo B5 - II, 16/05/94 (La Zoreda)

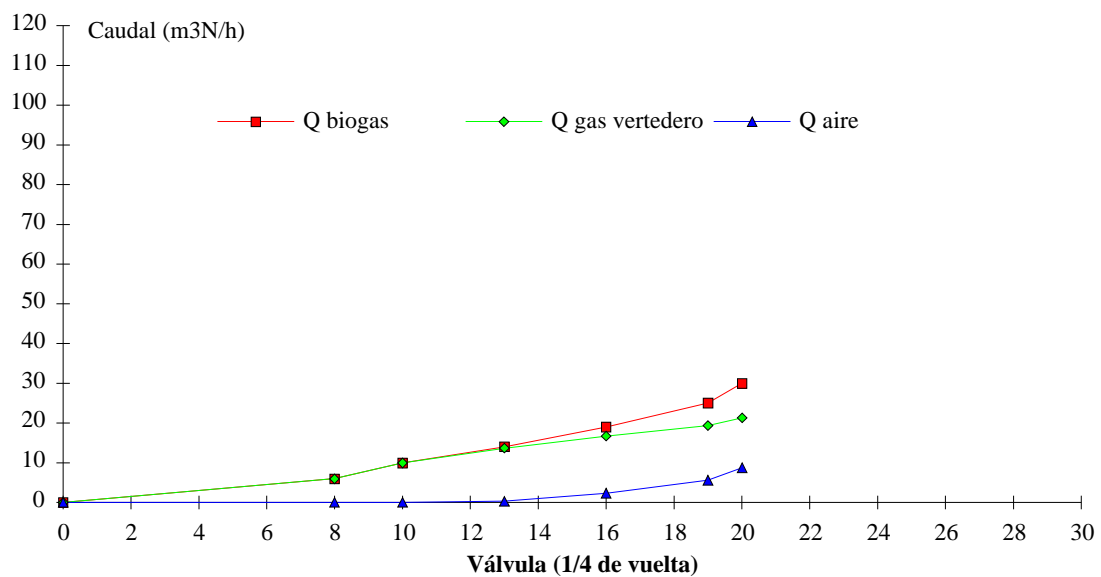
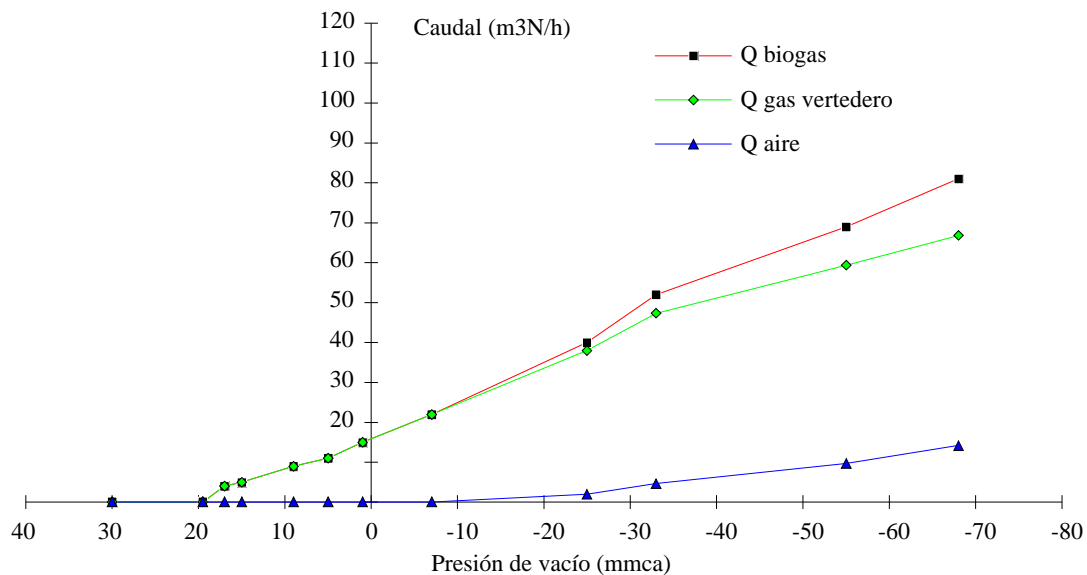
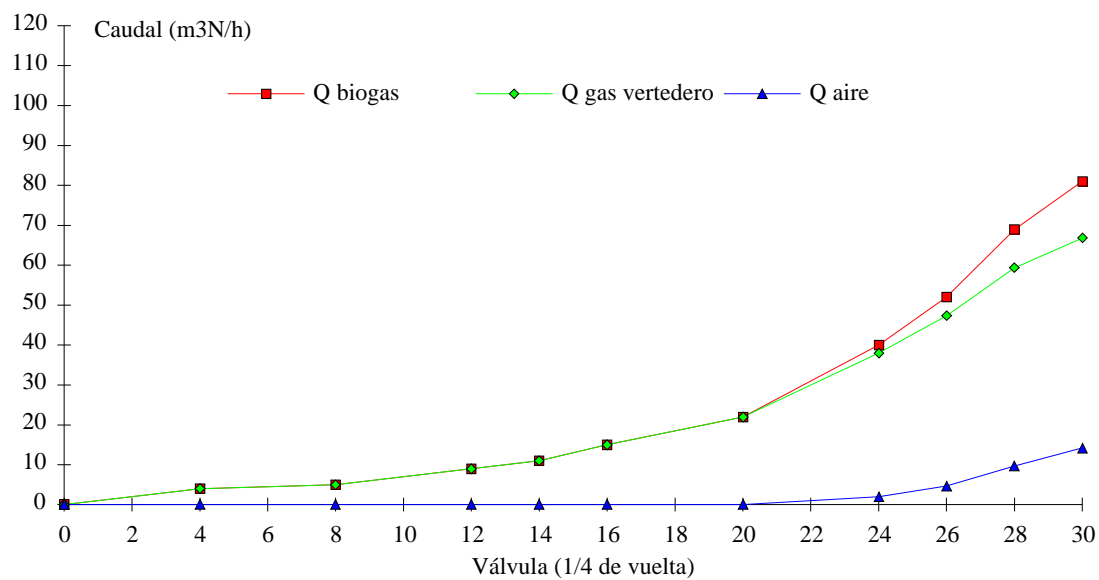


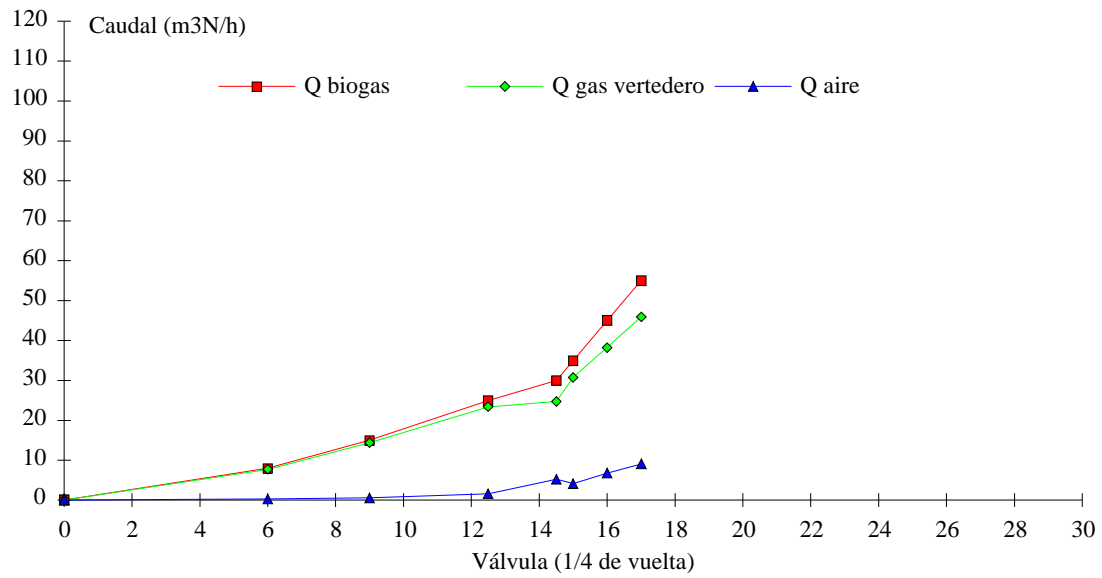
Fig. 50. Ensayo Caudal Aire/Caudal Gas, apertura de válvula, pozo B5 - II, 16/05/94 (La Zoreda)



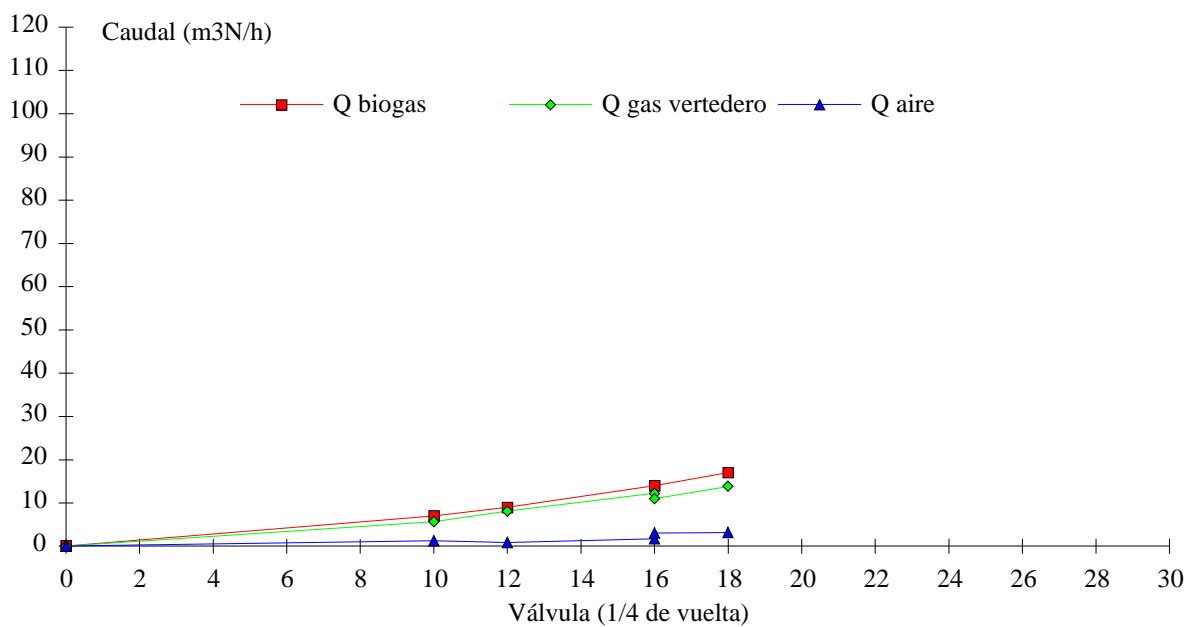
**Fig. 51.** Ensayo Caudal Aire/Caudal Gas, presiones, pozo A2 - II, 22/02/94 (La Zoreda)



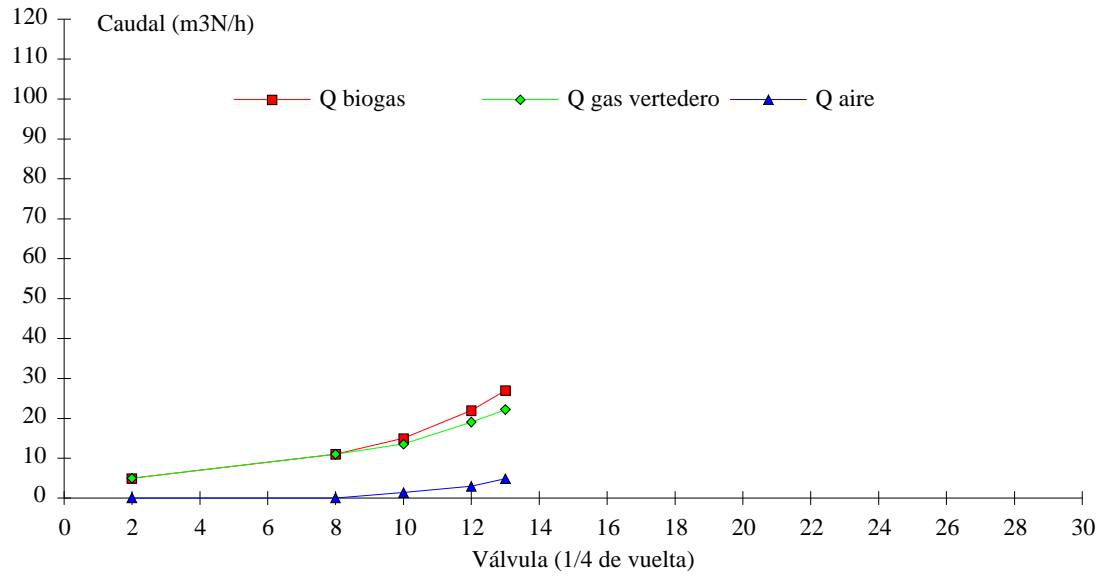
**Fig. 52.** Ensayo Caudal Aire/Caudal Gas, apertura de válvula, pozo A2 - II, 22/02/94 (La Zoreda)



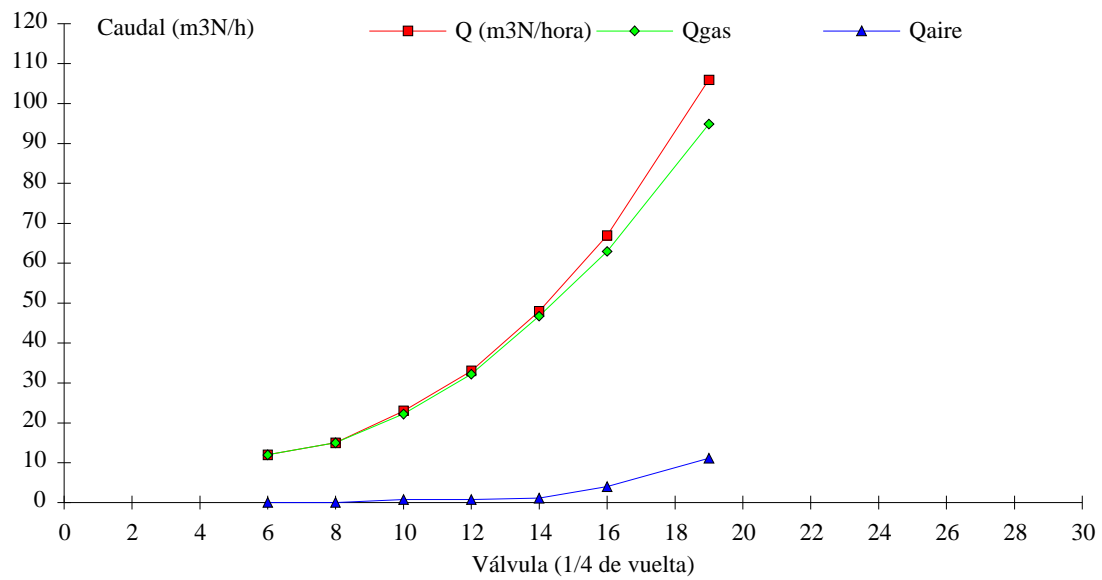
**Fig. 53.** Ensayo Caudal Aire/Caudal Gas, apertura de válvula, pozo I, 2/11/95 (Bratovo)



**Fig. 54.** Ensayo Caudal Aire/Caudal Gas, apertura de válvula, pozo II, 3/11/95 (Bratovo)



**Fig. 55.** Ensayo Caudal Aire/Caudal Gas, apertura de válvula, pozo III, 7/11/95 (Bratovo)



**Fig. 56.** Ensayo Caudal Aire/Caudal Gas, apertura de válvula, pozo IV, 8/11/95 (Bratovo)

#### 4.2.3.3. Interpretación de resultados experimentales

Al analizar las gráficas obtenidas, se observa que mientras el pozo está en sobrepresión, el caudal de aire entrante es nulo, de modo que la composición del *Biogás* extraído coincidirá con la del *Gas de Vertedero* generado. Asimismo, el caudal recuperado es bajo, debido a que la *Zona de Influencia* del pozo es aún pequeña.

A medida que se abre la válvula aumenta la depresión en el pozo. Esto hace aumentar el caudal de Biogás extraído debido al incremento de la zona de influencia del pozo. Sin embargo, el contenido en metano disminuye, debido a la entrada de aire. La aparición de oxígeno en la composición del biogás demuestra este último hecho.

La información de este ensayo es de suma importancia. Definida la **composición** del Biogás recuperable, con un contenido en metano por ejemplo unos diez puntos por debajo del nivel de metano en el Gas de Vertedero generado (sin mezcla de aire), podemos determinar qué **caudal** puede suministrar cada pozo y qué **depresión** es necesaria para ello.

#### 4.2.4. Ensayo "Régimen Permanente"

##### 4.2.4.1. Descripción del ensayo

El principal problema de los ensayos descritos (aunque también su principal ventaja) es la poca duración de los mismos. A fin de estudiar si el comportamiento de los pozos es estable a lo largo del tiempo, se propone el siguiente ensayo.

Con los resultados del ensayo  $Q_{aire}/Q_{gas}$  se decide la composición del biogás que deseamos extraer. Entonces, sencillamente se abre la válvula de regulación hasta obtener la depresión en el pozo necesaria, según la gráfica  $Q_{aire}/Q_{gas}$ , para esa composición objetivo, y se deja el pozo en esta situación durante el tiempo que se disponga (por ejemplo, toda la noche hasta comenzar los trabajos a la mañana siguiente o durante todo el fin de semana). Se registra la *composición* del biogás en ese momento, la *depresión* en el pozo, el *caudal instantáneo* y, opcionalmente, la *temperatura*. Se pone a cero el contador de *caudal acumulado* del extractor portátil. Al día siguiente, se registran de nuevo todas estas variables y el valor del caudal total extraído. Para la correcta interpretación de los resultados es necesario disponer de un registro de la evolución de la presión barométrica durante el ensayo.

##### 4.2.4.2. Resultados experimentales

A modo de ejemplo, en la Tabla 45 se muestran los resultados obtenidos en las sondas I y II estudiadas en el vertedero de Bratovo.

**Tabla 45.** Ensayos Régimen Permanente, pozos I y II, vertedero de Bratovo

<b>POZO I</b>								
Día	Hora	Q <sub>acum</sub> [m <sup>3</sup> N]	Q <sub>inst</sub> [m <sup>3</sup> N/h]	%CH <sub>4</sub>	%CO <sub>2</sub>	%O <sub>2</sub>	T <sub>gas</sub> [°C]	T <sub>amb</sub> [°C]
1/11/95	14:25	39,3	15,0	48,3	31,0	3,3	29,0	20,0
2/11/95	9:50	306,0	12,0	47,0	31,5	1,8	26,1	14,0
Tiempo: 19'25"; Caudal Total: 266,7 m <sup>3</sup> N; Caudal Medio: 13,7 m <sup>3</sup> N/h								
<b>POZO II</b>								
Día	Hora	Q <sub>acum</sub> [m <sup>3</sup> N]	Q <sub>inst</sub> [m <sup>3</sup> N/h]	%CH <sub>4</sub>	%CO <sub>2</sub>	%O <sub>2</sub>	T <sub>gas</sub> [°C]	T <sub>amb</sub> [°C]
2/11/95	13:45	365,0	15,0	42,3	33,2	3,4	29,5	19,5
3/11/95	10:30	623,3	12,8	48,6	30,5	2,1	31,2	15,5
Tiempo: 20'45"; Caudal Total: 258,3 m <sup>3</sup> N; Caudal Medio: 12,5 m <sup>3</sup> N/h								

#### 4.2.4.3. Interpretación de resultados experimentales

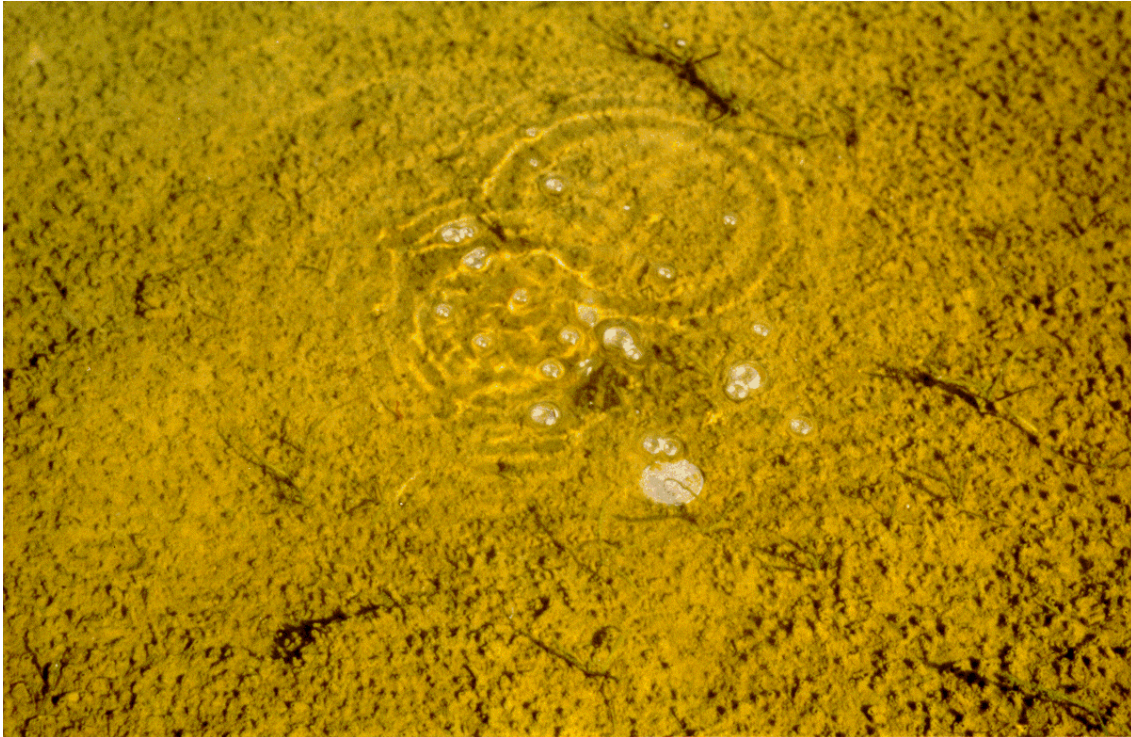
Idealmente, los valores se mantendrían constantes aún después de varios días, siempre y cuando la presión barométrica permanezca constante, pues de otro modo la depresión relativa aplicada al pozo fluctuaría con ella. Sin embargo, normalmente las variables se modifican, siendo además la tendencia general una disminución del caudal instantáneo y un menor contenido en metano. Esto nos previene acerca de la precaución con que se deben manejar los resultados obtenidos en los ensayos  $Q_{aire}/Q_{gas}$ .

#### 4.2.5. Ensayo de Emisiones Superficiales

##### 4.2.5.1. Descripción del ensayo

El gas generado en el interior de un vertedero tiende a salir a la atmósfera a través de la superficie del vertedero. En ocasiones es posible incluso observar las burbujas de biogás aflorando en un charco, como confirmación de este fenómeno, tal y como muestra la Fotografía 11.

Estas emisiones pueden medirse de forma sencilla colocando bidones boca abajo en la superficie del vertedero, dentro de los cuales se permitirá que el gas se acumule durante un cierto intervalo de tiempo. El depósito se coloca en la superficie del vertedero sellando el perímetro con tierra para evitar fugas. Cada cierto tiempo se toman datos de la composición del gas en su interior, que inicialmente coincidirá con la del aire.



**Fotografía 11.** Burbujas de biogás aflorando en la superficie de un vertedero

#### 4.2.5.2. Resultados experimentales

Sólo se han realizado algunos ensayos en el vertedero de La Zoreda, por tanto corresponden a un vertedero con extracción forzada de biogás, en donde los pozos se han situado con una separación entre si de 20 a 30 m.

Se utilizó un depósito cilíndrico metálico de 86 cm de altura, 59 cm de diámetro exterior y 4 mm de espesor. La perforación realizada en la tapa superior para poder obtener las medidas tenía 1 cm de diámetro.

Se realizaron los ensayos colocando el depósito a distintas distancias de los pozos de extracción. La zona donde se realizaron los ensayos corresponde a las casetas B y C. En esta zona existe gran número de pozos de extracción (cada una de las doce líneas de cada caseta está conectada a 2 ó 3 pozos) y en todo momento estuvieron conectadas.

En la Figura 57 se muestra la situación de los depósitos en los distintos ensayos. Los resultados se muestran en las Tablas 46, 47 y 48.

**Tabla 46.** Resultados Ensayo Emisiones Superficiales, pozo B5, 12/5/94 (La Zoreda)

Hora	%CH <sub>4</sub>	%CO <sub>2</sub>	%O <sub>2</sub>
10:30	0,0	0,0	21,0
11:30	9,7	4,8	19,1
12:30	13,1	7,6	17,5
13:50	17,5	9,5	16,1

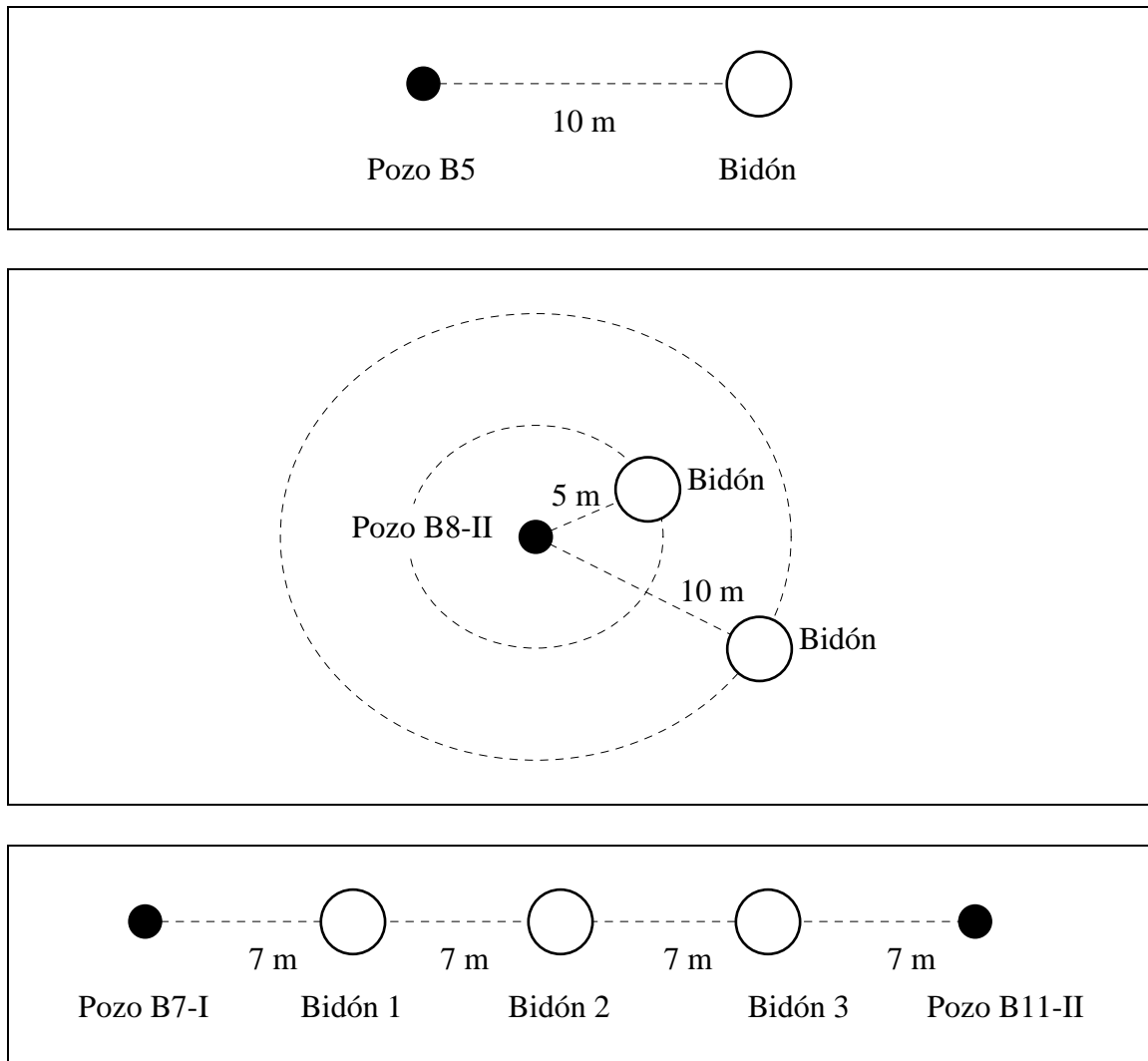
**Tabla 47.** Resultado Ensayos Emisiones Superficiales, pozo B8-II (La Zoreda)

Hora/día	Distancia del pozo, 5 m			Distancia del pozo, 10 m		
	%CH <sub>4</sub>	%CO <sub>2</sub>	%O <sub>2</sub>	%CH <sub>4</sub>	%CO <sub>2</sub>	%O <sub>2</sub>
10:35/14-6-94	0,0	0,0	21,0	0,0	0,0	21,0
12:35/14-6-94	0,6	0,0	20,6	0,8	0,0	20,4
10:10/15-6-94	0,4	0,1	21,1	1,3	0,2	20,6
9:40/16-6-94	0,6	0,0	20,1	1,9	0,3	19,9

**Tabla 48.** Resultado Ensayos Emisiones Superficiales, pozos B7-I y B11-II (La Zoreda)

Hora/día	Distancia B7-I, 7 m			Distancia B7-I, 14 m			Distancia B7-I, 21 m		
	%CH <sub>4</sub>	%CO <sub>2</sub>	%O <sub>2</sub>	%CH <sub>4</sub>	%CO <sub>2</sub>	%O <sub>2</sub>	%CH <sub>4</sub>	%CO <sub>2</sub>	%O <sub>2</sub>
10:10/16-6-94	0,0	0,0	21,0	0,0	0,0	21,0	0,0	0,0	21,0
12:15/16-6-94	0,2	0,0	20,8	0,0	0,0	21,0	0,0	0,0	21,0
10:05/19-6-94	0,2	0,0	20,8	0,0	0,0	21,0	0,0	0,0	21,0





**Fig. 57.** Posición de los bidones en los Ensayos de Emisiones Superficiales

#### 4.2.5.3. Interpretación de resultados

Este estudio puede ser interesante tanto si existe sistema de captación de gas como si no existe ninguna captación. En el primer caso servirá para determinar los radios de influencia de las captaciones, y en el segundo para determinar la importancia relativa de la generación de gas en distintos puntos del vertedero.

En los ensayos realizados en el vertedero de La Zoreda observamos como el pozo B5 tiene un Radio de Influencia menor de 10 m, permitiendo altas fugas de biogás a la atmósfera. El pozo B8-II también tiene un radio de influencia menor de 10 m, aunque en este caso las fugas de biogás son sensiblemente menores, casi despreciables. La combinación de dos pozos, el B7-I y el B11-II, a una distancia de 28 m anula prácticamente las fugas de biogás a la atmósfera.

### 4.3. Validación del modelo de migración del biogás mediante el Ensayo Caudal Aire / Caudal Gas

A partir de los datos obtenidos mediante el modelo de migración del biogás, desarrollado en el Apartado 3, es posible trazar la gráfica del Ensayo Caudal Aire/Caudal Gas. Los resultados numéricos han sido recogidos en la Tabla 49 y representados en la Figura 58. En la Tabla 49 se presentan, además, los datos de composición del biogás, suponiendo una composición inicial del Gas de Vertedero de 57,3 % de metano y 38,2 % de dióxido de carbono, que coincide con la media observada en el vertedero de La Zoreda.

El valor inicial de sobrepresión es de 8 mmca, normal según los resultados obtenidos en los Ensayos Presión/Tiempo. Para una composición del biogás del 50% de metano, el caudal suministrado por el pozo sería de 69,1 m<sup>3</sup>N/h, también razonable.

La gráfica obtenida es muy similar a la del Ensayo Caudal Aire/Caudal Gas en el pozo A2-II (22/02/94) del vertedero de La Zoreda, mostrada en el Apartado 4.2.2. Únicamente se observa que, para el modelo, existe una relación lineal entre el caudal de Biogás recuperado y la depresión aplicada, mientras que en los ensayos de campo esta relación tiende a ser parabólica. Del mismo modo, se observa en la modelización que el caudal de Gas de Vertedero recuperado evoluciona asintóticamente hacia un máximo, hecho este no observado en los ensayos de campo.

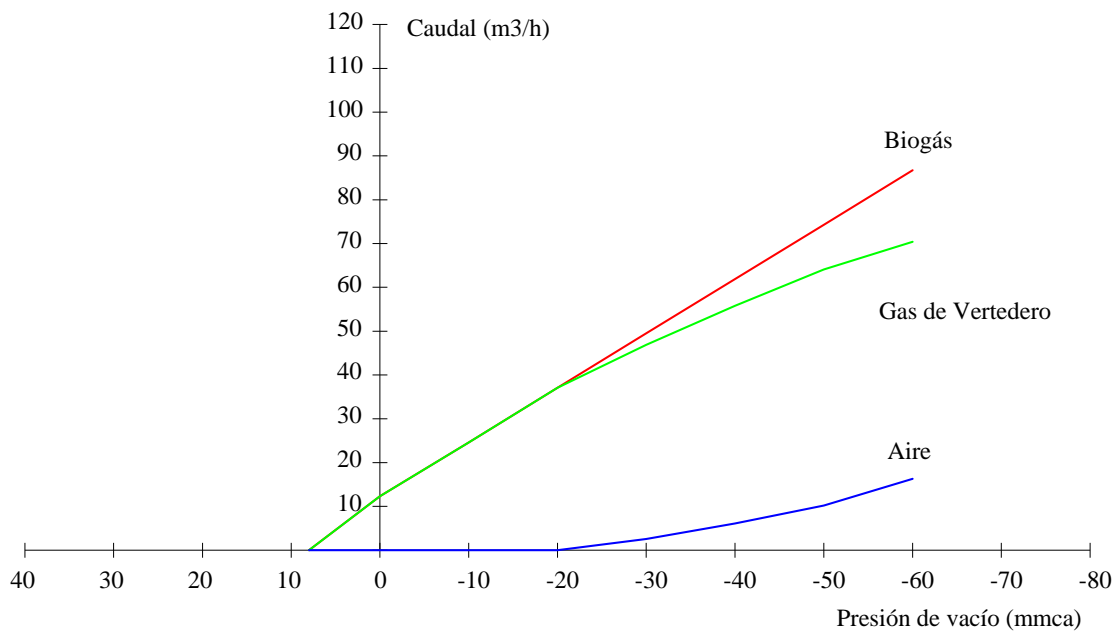
La causa de esta discrepancia está en las distintas condiciones de contorno del modelo respecto al ensayo de campo. Mientras el modelo sólo considera una porción de vertedero, en un ensayo de campo todo el vertedero está influenciado, en principio, por la sonda de muestreo. Esto supone que en el modelo, el caudal de Gas de Vertedero recuperable está limitado por el volumen de vertedero considerado y, por tanto, a partir de un cierto valor de la depresión aplicada, deja de aumentar. Sin embargo, en el ensayo de campo al aumentar la depresión aplicada continúa aumentando la zona de influencia del pozo y, por tanto, el caudal de Gas de Vertedero recuperado.

**Tabla 49.** Simulación del Ensayo Caudal Aire/Caudal Gas mediante el modelo de migración

Presión (mmca)	Biogás (m <sup>3</sup> N/h)	Aire (m <sup>3</sup> N/h)	Gas de Vertedero (m <sup>3</sup> N/h)	Metano (% vol)	Dióxido de Carbono (% vol)	Oxígeno (% vol)	Nitrógeno (% vol)
8	0	0	0	57,3	38,2	0,0	4,5
0	12,3	0	12,3	57,3	38,2	0,0	4,5
-10	24,6	0	24,6	57,3	38,2	0,0	4,5
-20	37,1	0	37,1	57,3	38,2	0,0	4,5
-30	49,5	2,6	46,9	54,1	36,1	1,1	8,7
-40	61,9	6,1	55,8	51,4	34,2	2,1	12,3
-50	74,3	10,2	64,1	49,0	32,7	2,9	15,4
-60	86,7	16,3	70,4	46,0	30,7	3,9	19,4

(1) El caudal de Gas de Vertedero se ha calculado como diferencia entre los de Biogás y Aire

(2) Las composiciones se han calculado a partir de la composición del Gas de Vertedero en La Zoreda



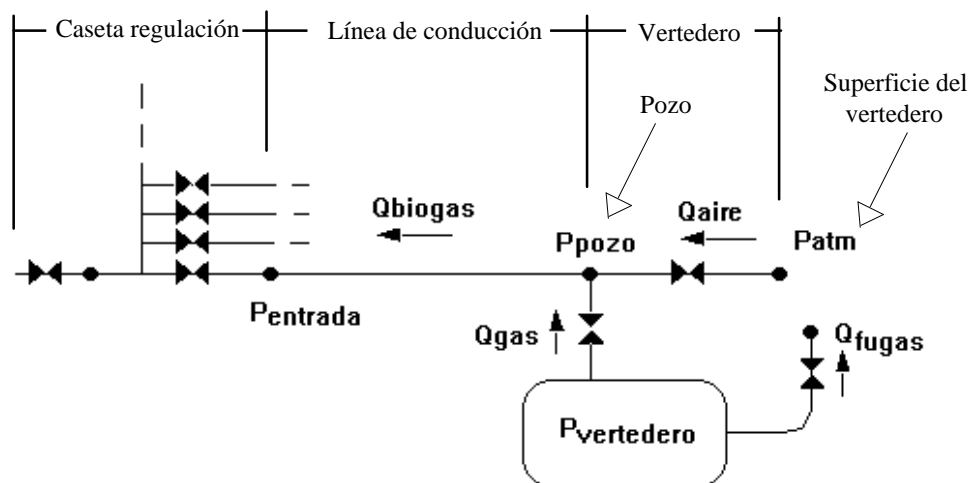
**Fig. 58.** Simulación del Ensayo Caudal Aire/Caudal Gas mediante el modelo de migración

#### 4.4. Modelo de la captación de biogás

Este modelo permite entender cómo parte del Gas de Vertedero generado se pierde como fugas a la atmósfera y cómo el caudal de Biogás recuperado es una mezcla de Gas de Vertedero y aire que penetra desde la atmósfera. Se basa en la sencilla hipótesis de suponer el vertedero (o, al menos, la zona de influencia de una captación de biogás) como un depósito cerrado de volumen constante. Pese a la sencillez de esta hipótesis ya se ha demostrado, al interpretar los resultados del Ensayo Presión/Tiempo, su validez como modelo.

El modelo de la captación de biogás permite la resolución de fenómenos transitorios, a diferencia del modelo de migración del biogás propuesto en el Apartado 3. Permite también introducir conceptos de regulación de la extracción de biogás, que se desarrollarán posteriormente en el Apartado 6.

El modelo se desarrolla a partir del siguiente *circuito hidráulico equivalente* de una captación de biogás, representado en la Figura 59 (Martín *et al.*, 1994a).



**Fig. 59.** Circuito hidráulico equivalente de una captación de biogás

El circuito se define con las siguientes ecuaciones básicas de la mecánica de los fluidos, *ecuaciones de continuidad y balance de energía mecánica* (Bird *et al.*, 1975):

$$P_{atm} - P_{pozo} = Q_{aire}^a * K_s \quad [4.8]$$

$$P_{vertedero} - P_{pozo} = K_{ch} * Q_{gas}^b \quad [4.9]$$

$$P_{vertedero} - P_{atm} = K_t * Q_{fugas}^c \quad [4.10]$$

$$P_{pozo} - P_{válvula} = K_L * Q_{biogás}^2 + Z \quad [4.11]$$

$$P_{vertedero} = (Q_{generado} - Q_{gas} - Q_{fugas}) * t * K + P_{o \text{ vertedero}} \quad [4.12]$$

$$Q_{biogás} = Q_{gas} + Q_{aire} \quad [4.13]$$

Se ha optado por relaciones parabólicas, de exponentes  $n$ , entre las presiones y caudales, frente a la relación lineal utilizada en el modelo de migración del biogás y en la interpretación del Ensayo Presión/Tiempo. Aunque complica la resolución del problema, permite un mayor ajuste empírico sobre los datos experimentales.

En la Tabla 50 se definen los distintos parámetros utilizados en el modelo.

**Tabla 50.** Definición de los parámetros del modelo de captación de biogás

<i>Constantes</i>	
<b>Qgenerado</b>	Caudal de <i>Gas de Vertedero</i> que se genera en la zona del pozo
<b>Pentrada</b>	Presión a la entrada de la caseta de extracción
<b>Patm</b>	Presión atmosférica
<b>K<sub>L</sub></b>	Pérdida de carga en la línea de aspiración
<b>K<sub>S</sub> y a</b>	Pérdida de carga en el sellado del pozo
<b>K<sub>ch</sub> y b</b>	Pérdida de carga en chimenea de aspiración
<b>K<sub>t</sub> y c</b>	Pérdida de carga en el terreno circundante al pozo
<b>K</b>	Constante relacionada con la ecuación general de los gases ideales
<i>Variables</i>	
<b>Qgas</b>	Caudal de <i>Gas de Vertedero</i> que se recupera en la captación
<b>Qaire</b>	Caudal de aire introducido en la aspiración
<b>Qfugas</b>	Caudal de <i>Gas de Vertedero</i> que se pierde en fugas a la atmósfera
<b>Qbiogás</b>	Caudal de <i>Biogás</i> realmente recuperado
<b>Ppozo</b>	Presión medida en cabeza del pozo de captación
<b>Pvertedero</b>	Presión interna del vertedero que impulsa el gas al exterior
<b>t</b>	Tiempo

A continuación se resumen los procedimientos de cálculo de las constantes:

(a) **Qgenerado.** Caudal de *Gas de Vertedero* que se genera en el área de influencia de la captación y que suponemos constante. Cuando logramos extraer *Biogás* con caudal y composición constante en el pozo (objetivo último del sistema de regulación), entonces el caudal de gas que se está generando (*Qgenerado*) es igual al que se está extrayendo (*Qbiogás*), restándole el porcentaje de aire que ha penetrado (*Qaire*), y sumándole un caudal de fugas (*Qfugas*).

(b) **Pentrada.** Presión que fija el sistema de aspiración. En este modelo no se considera ninguna válvula de regulación.

(c) **K<sub>L</sub>.** Pérdida de carga en la tubería por unidad de longitud, desde la caseta de control al pozo.

(d) **K<sub>S</sub>** y **a**. Para su cálculo se realiza un ensayo de extracción de biogás en el pozo aplicando depresiones progresivamente mayores (*Ensayo Caudal Aire/Caudal Gas*). Se registra el caudal de biogás extraído y su composición, a fin de distinguir entre el caudal de aire,  $Q_{aire}$ , y el caudal de gas de vertedero,  $Q_{gas}$ . Con la ecuación (4.8) y dos puntos de la curva obtenida al representar la  $P_{pozo}$  frente al  $Q_{aire}$  se deduce el valor de **K<sub>S</sub>**, pérdida de carga, y de **a**, exponente de la ecuación parabólica de pérdidas de carga.

(e) **K<sub>ch</sub>** y **b**. Del mismo modo, se realiza un *Ensayo Caudal Aire/Caudal Gas*. Con la ecuación (4.9) y dos puntos de la curva obtenida al representar la  $P_{pozo}$  frente al  $Q_{gas}$  se deduce el valor de **K<sub>ch</sub>**, pérdida de carga, y de **b**, exponente de la ecuación parabólica de pérdidas de carga.

(f) **K<sub>t</sub>** y **c**. Al desconectar un pozo del sistema de aspiración, se alcanza una sobrepresión que se estabiliza transcurrido un cierto tiempo. Considerando que esa presión es igual a la  $P_{vertedero}$  y teniendo en cuenta que al estar en sobrepresión todo el caudal generado será caudal de fugas, se puede calcular un valor de **K<sub>t</sub>**. Debido a que en este caso no disponemos de dos puntos para despejar las incógnitas, será necesaria una iteración con la ecuación (4.10) tomando distintos valores de **c** con la condición de contorno de  $K_{ch} < K_t < K_S$ .

(g) **K**. Constante que relaciona volúmenes, temperaturas y masa molar de biogás. Para su cálculo nos basamos en varias hipótesis: el biogás se comporta como un gas ideal y la parte de vertedero asignado a un pozo es un cilindro de volumen constante (de 20 m de altura y de 20 m de diámetro). Es necesario también definir una temperatura media del gas de vertedero (40°C) y un valor para  $P_{vertedero}$ .

En la Tabla 51 se muestran los valores obtenidos a través de ensayos en un pozo del vertedero de La Zoreda. Las presiones se han medido en mm.c.a. y los caudales en m<sup>3</sup>N/h. Los ensayos se muestran en la Figura 60.

**Tabla 51.** Valores de las constantes del modelo de captación de biogás

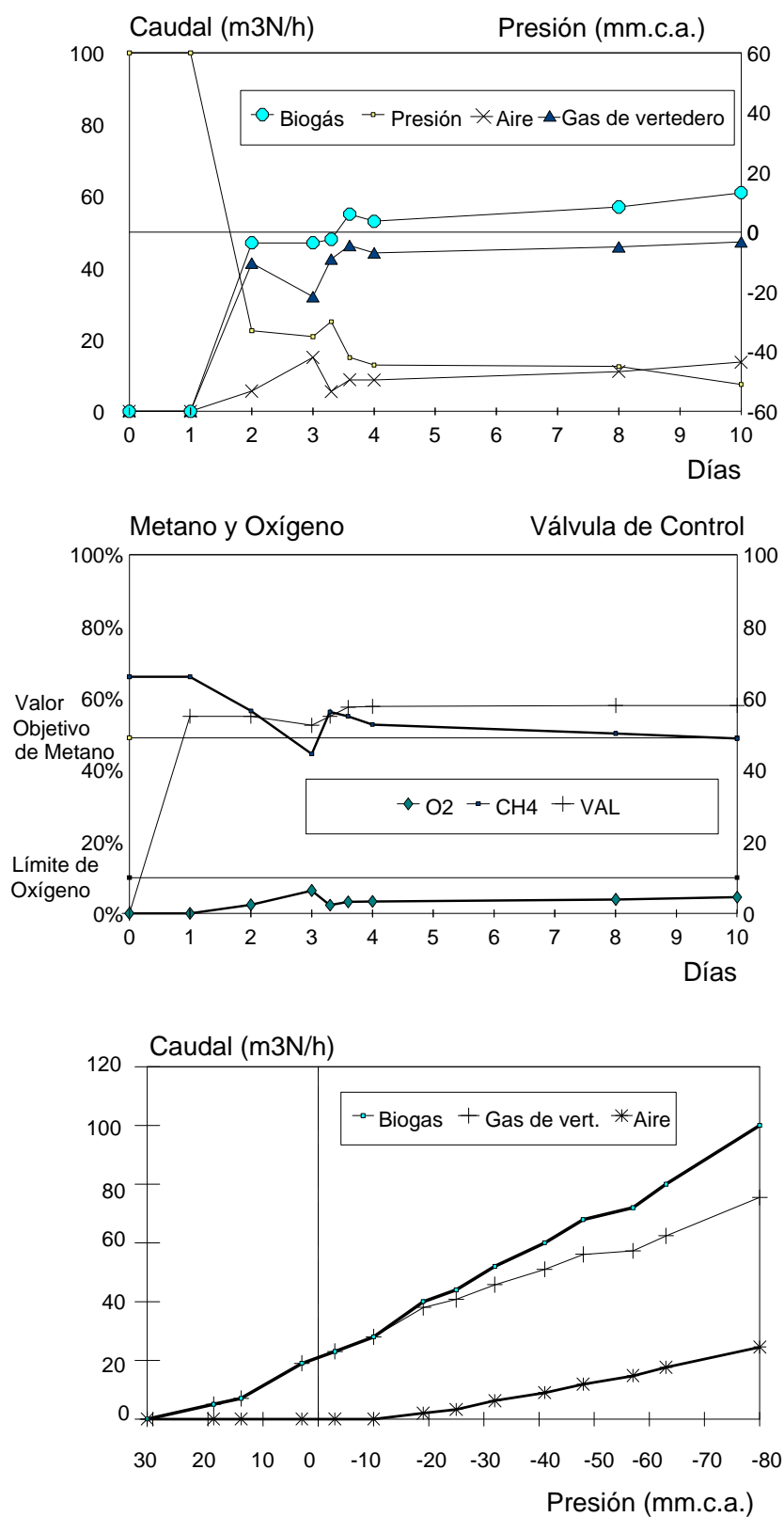
Qgenerado	KL	KS	a	Kch	b	Kt	c	K
52 m <sup>3</sup> N/h	0,01	6,5	0,8	0,7	1,2	4	0,5	0,04

Introduciendo las ecuaciones del modelo en un programa de cálculo desarrollado para ello, se ha simulado el comportamiento de un pozo de extracción forzada de biogás. La simulación se ha realizado para dos situaciones distintas:

1) Cuando la generación de gas en el vertedero aumenta después de un periodo de equilibrio en la extracción, caso mostrado en la Figura 61.

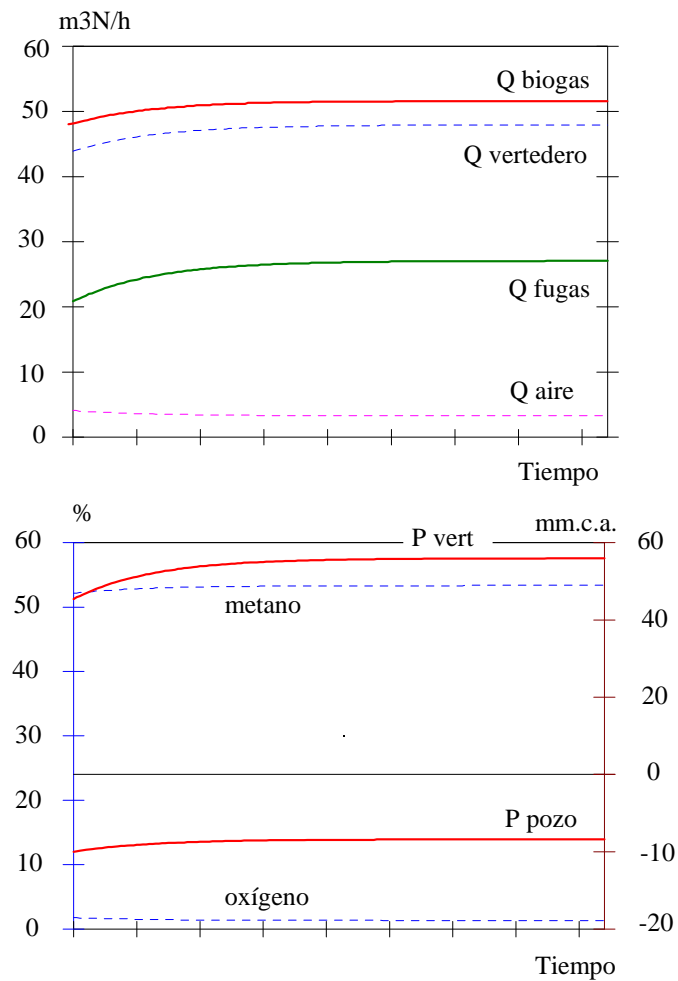
2) Cuando la generación de gas en el vertedero sufre un descenso después de un periodo de equilibrio en la extracción, caso mostrado en la Figura 62.

En ambos casos las condiciones iniciales son las mismas y han sido establecidas tomando valores habituales de extracción en pozos de biogás.



**Fig. 60.** Determinación de las constantes: (a) Caudales y presiones; (b) Composición del Biogás; (c) Ensayo Caudal Aire / Caudal Gas

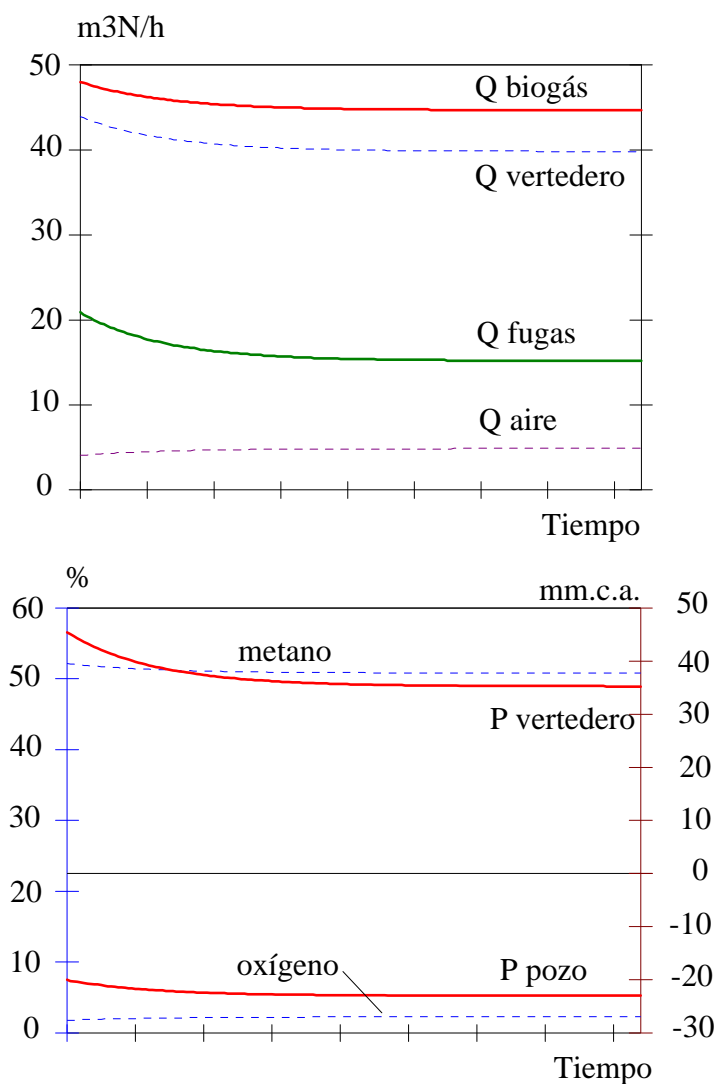
En la Figura 61 se observa la evolución del pozo en el primer caso, al **aumentar** la generación de gas en la zona ( $Q_{generado}$ ) y permanecer constante la depresión a la cabeza de la línea de extracción ( $P_{entrada}$ ). El caudal de biogás extraído aumenta, siendo además su contenido en metano mayor. Un sistema de regulación que persiga la extracción de biogás de composición constante debería reaccionar aumentando la depresión en la cabeza de la línea ( $P_{entrada}$ ).



**Fig. 61.** Simulación por ordenador. Incremento en la generación de gas



La Figura 62 muestra la evolución del pozo en el segundo caso, al **disminuir** la generación de gas en la zona ( $Q_{generado}$ ) y permanecer constante la depresión a la cabeza de la línea de extracción ( $P_{entrada}$ ). El caudal de biogás extraído necesariamente disminuye, siendo además su contenido en metano menor debido a la entrada de aire de la atmósfera a través de defectos en el sellado del pozo. Por lo tanto, el sistema de regulación debería reaccionar, para mantener la composición constante, disminuyendo la depresión mediante una válvula de control a la cabeza de la línea ( $P_{entrada}$ ).



**Fig. 62.** Simulación por ordenador. Decremento en la generación de gas

El modelo de captación de biogás propuesto mejora al modelo de migración del biogás definido en el Apartado 3 en la posibilidad de cálculo de estados transitorios, de no equilibrio. Es posible incorporar al modelo de migración esta mejora, si se considera en ese modelo cada superficie de control (i,j) como un depósito cerrado de volumen conocido donde, además de cumplirse las ecuaciones definidas en el Apartado 3, se verifique la ecuación (4-12), en la que se introduce la variable tiempo.

Evidentemente, la resolución matemática del modelo de migración así planteado será aún más compleja y su utilidad sólo se podrá comprobar acompañando su desarrollo con nuevos ensayos en el vertedero. Estos ensayos estarán encaminados a conocer la evolución de la presión en distintos puntos alrededor de los pozos de captación, cuando el pozo es sometido a distintos regímenes de extracción, de modo que se produzcan estados transitorios.

#### 4.5. Diseño de la Red de Captación de Biogás. Radio de Influencia

Como ya se ha comentado repetidas veces, la fermentación anaerobia de los residuos en el vertedero provoca la constante formación de biogás en su interior. Por ello, la biomasa está siempre en sobrepresión relativa. El biogás tiende a salir por la zona de mayor permeabilidad, generalmente la superficie. Al instalar chimeneas de venteo se están creando caminos preferenciales para el escape del biogás a la atmósfera. Así, la emisión queda localizada y pueden prevenirse sus riesgos.

Un mayor grado de seguridad se alcanza cuando el biogás es captado y enviado a una planta de incineración. Para ello, cada chimenea de venteo es conectada a una tubería de conducción, aplicándose al pozo una ligera depresión. Esta depresión aumenta la tendencia del biogás a migrar hacia del pozo, evitándose las fugas superficiales casi al completo.

En el Apartado 3.4, mediante el modelo de migración del biogás, se han estudiado tres supuestos: (a) vertedero sin pozos; (b) vertedero con chimeneas de venteo; y (c) vertedero con sistema de extracción forzada.

Según lo hasta ahora expuesto, se podría pensar que, para cumplir el objetivo de recuperar todo el biogás generado en el vertedero, la forma más sencilla y económica sería instalar un sólo pozo central en el vertedero y someterlo a una fuerte depresión.

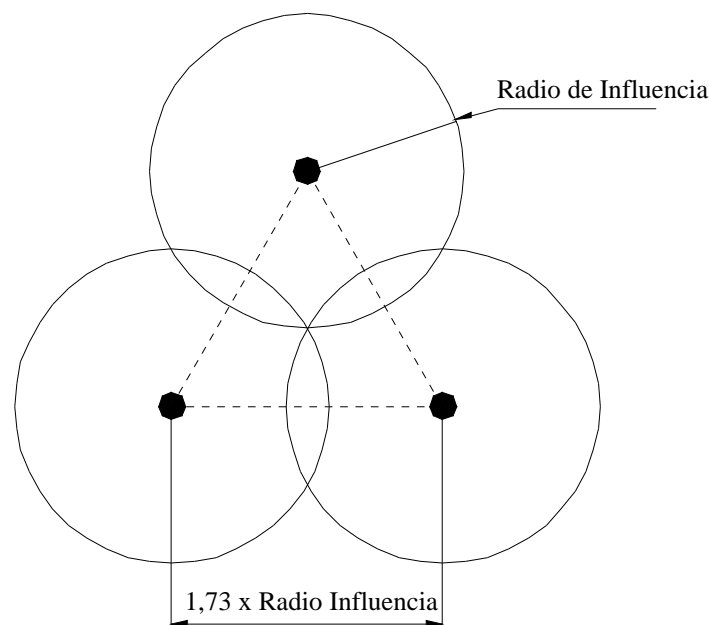
Sin embargo, esto no es posible. Superado un cierto valor en la depresión en el pozo, comienza a entrar aire de la atmósfera a través de la superficie, mezclándose con el gas generado en el vertedero, tal y como anticipa el modelo de migración de biogás en el Apartado 3.4.3 y muestran los ensayos Caudal Aire/Caudal Gas descritos en el Apartado 4.2.3. La entrada de aire conlleva varios problemas:

1. Disminuye el poder calorífico del biogás, pues decrece el porcentaje de metano
2. Si el contenido en oxígeno supera el 10%, se corre el riesgo de formar una mezcla explosiva metano/oxígeno en la línea de conducción
3. La corriente de aire detiene a su paso la degradación anaerobia de los residuos, por efecto de la presencia de oxígeno

Por tanto, dependiendo (a) del diseño del pozo de captación, (b) del tipo de material de recubrimiento utilizado en la superficie del vertedero y (c) de la tasa de generación de biogás en la zona, existe una depresión óptima o **Depresión Objetivo** para la extracción del biogás. Esta depresión se calcula de modo que el contenido en metano del Biogás recuperado en el pozo, ya con una cierta mezcla de aire, permanezca constante (es decir, la entrada de aire no afecte la degradación anaerobia) y sea suficientemente alto (para proporcionar un Poder Calorífico que permita el aprovechamiento energético del Biogás).

Al aplicar esa Depresión Objetivo en el pozo, se recupera una cierta cantidad de biogás, correspondiente al gas generado en un cierto entorno del pozo, que varía con el valor de la depresión aplicada. Algunos autores suponen que la **Zona de Influencia** de un pozo está limitada al volumen de residuos sometido a depresión. Este volumen sería un cilindro que tiene por eje el pozo y por altura la del vertedero, según la interpretación más extendida, siempre y cuando la superficie del vertedero sea impermeable. Si la superficie del vertedero es permeable al paso del gas, debido a la entrada de aire, la Zona de Influencia tendería a ser elipsoidal, según Clement (Gendebien *et al.*, 1992). Otros autores incluso definen Zonas de Influencia esféricas (Ronald J. Lofy en Christensen *et al.*, 1996). Admitiendo la forma cilíndrica, que es la hipótesis más manejada, se ha definido el **Radio de Influencia** de un pozo como el radio de ese cilindro, es decir, la distancia entre el pozo y el punto de corte de la isobara cero con la superficie del vertedero. Los puntos de la superficie más alejados de este radio no entregan el biogás al pozo, sino que lo dejan escapar a la atmósfera. Están en sobrepresión relativa. Los puntos de la superficie interiores al radio de influencia están en depresión, recuperándose el gas y existiendo una cierta entrada de aire desde la superficie.

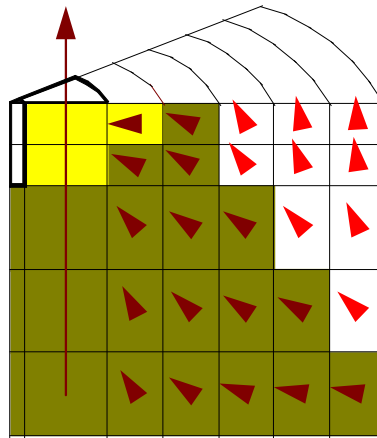
Decidida una Depresión Objetivo, en función de las consideraciones ya realizadas, el Radio de Influencia que le corresponde se puede medir mediante ensayos de campo. El diseño de la red de captación de biogás es entonces inmediato. Los pozos ocupan los vértices de una maya isométrica, tal y como muestra la Figura 63, donde el Radio de Influencia corresponde a la distancia entre un vértice del triángulo equilátero y su centro geométrico (Gendebien *et al.*, 1992).



**Fig. 63.** Representación esquemática de una red de captación de biogás

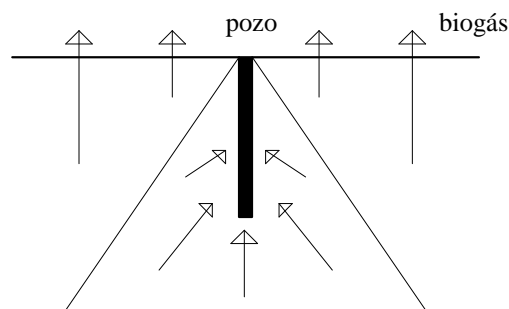
No obstante, la suposición de que el área de influencia de un pozo de captación vertical es cilíndrica no es siempre correcta. De hecho, no es correcto en absoluto suponer que la Zona de Influencia se reduce a la zona en depresión relativa.

En realidad, cuando tenemos un pozo de extracción aislado, el volumen de residuos que entrega el biogás al pozo tiene forma cónica ó troncocónica, tal y como se deduce de la interpretación de los resultados del modelo de la migración del biogás, descrito en el Capítulo 3. En la Figura 64 se han representado los vectores unitarios de caudal calculados por el modelo de migración para una presión de pozo de -30 mmca. Se aprecia claramente como el caudal de biogás recuperado por el pozo no proviene únicamente de las zonas sometidas a depresión. En realidad, éstas actúan como cuencas de atracción para el biogás, compitiendo con la superficie del vertedero. En las capas más profundas del vertedero (y, por tanto, más distantes de la superficie), la influencia del pozo es notable.

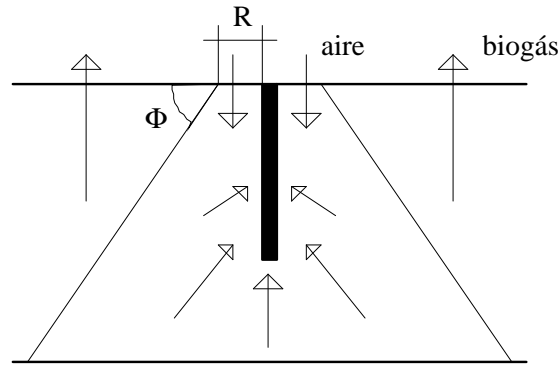


**Fig. 64.** Vectores unitarios del caudal según el modelo de migración del biogás para una presión del pozo de -30 mmca. En gris claro, la zona en depresión; en gris oscuro, la zona probable de influencia

Si el pozo únicamente ventea el gas a la atmósfera, la zona de influencia tiende a ser cónica, tal y como muestra la Figura 65. Cuando se somete el pozo a una depresión, la forma es troncocónica, siendo el radio de la circunferencia menor la distancia medida desde el pozo hasta el punto de corte con la superficie de la isobara de presión relativa cero, como muestra la Figura 66. En todos los puntos *de la superficie* dentro de esta circunferencia hay entrada de aire, mientras que en los exteriores a ella se producen fugas de biogás a la atmósfera. El radio de esta circunferencia,  $R$ , coincide con la definición anterior de Radio de Influencia. Sin embargo, no es fácil determinar el ángulo de apertura  $\Phi$  de este tronco de cono. Este depende de la permeabilidad al paso del biogás de los residuos y de la tasa de generación de biogás por unidad de volumen.

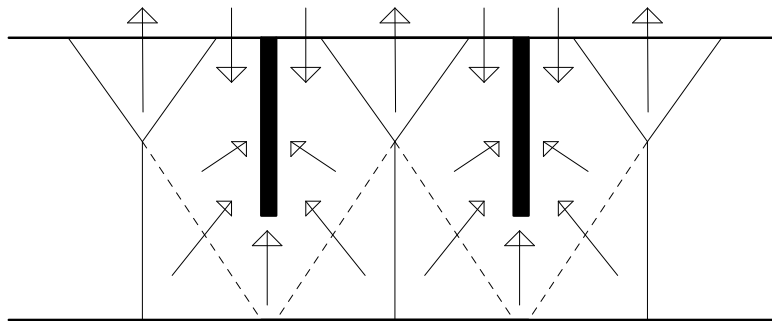


**Fig. 65.** Volumen de influencia de un pozo de captación aislado en venteo



**Fig. 66.** Volumen de influencia de un pozo de captación aislado en extracción forzada

Al diseñar la red de captación según el modelo descrito, las condiciones de simetría impuestas a cada pozo por los pozos contiguos hacen que los volúmenes de influencia de cada pozo intersecten entre sí, tal y como muestra la Figura 67. Sólo en el caso de que la separación entre los pozos coincida con el Radio de Influencia, la Zona de Influencia de cada pozo será cilíndrica.



**Fig. 67.** Zona de Influencia de un pozo de captación dentro de una red isométrica

En la práctica, el diseño de la red de captación de biogás se apoya en la realización de ensayos en campo, tal y como se desarrolla en el Capítulo 5. Mediante los ensayos Caudal Aire / Caudal Gas se determina cuál es la depresión óptima para la recuperación del biogás. Con ese valor, se calcula el Radio de Influencia mediante ensayos de Fugas Superficiales. Dependiendo de la zona del vertedero, debido a la influencia de factores tales como la tasa de generación de biogás por unidad de volumen (condicionada por la antigüedad de los residuos, su composición, humedad, etc.), la permeabilidad al paso del biogás (dependiente del grado de compactación, composición, etc.) y la profundidad del vertedero, esos valores podrán ser distintos, existiendo zonas donde sea necesario acercarse más los pozos entre sí, mientras que en otras se podrán espaciar.

El espaciado entre pozos varía entre 16 y 60 m (Gendebien *et al.*, 1992). Se considera habitual un Radio de Influencia de 20 m (Tomasini, 1986; Uriarte *et al.*, 1992b; Brown y Maunder, 1994).

**5. DETERMINACIÓN DE LA PRODUCCIÓN  
DE BIOGÁS EN UN VERTEDERO  
CONTROLADO**

---

## 5. DETERMINACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN UN VERTEDERO CONTROLADO

Uno de los mayores problemas que se encuentra el técnico a la hora de implementar un sistema de *recuperación y revalorización* energética del biogás en un vertedero controlado es que la mayoría de los vertederos no han sido diseñados teniendo en cuenta esta posibilidad. A lo sumo se han instalado chimeneas para el venteo del biogás.

La implementación de un *sistema de extracción forzada e incineración controlada del biogás* debería ser obligada desde la misma inauguración del vertedero, por motivos medioambientales y de seguridad. Los costes de inversión y operación de este sistema deberían estar incluidos en el coste de vertido de los RSU.

Sin embargo, la extracción de biogás sólo se plantea habitualmente por la rentabilidad económica de su revalorización. Esta rentabilidad está ligada a factores legales y económicos locales (como pueda ser en España la Ley de Conservación de la Energía) así como a las propias características del biogás en cada vertedero, en especial la **cantidad recuperable** y su **composición**. A la hora de valorar los costes de inversión del *sistema de revalorización energética del biogás* no deberían incluirse los derivados del *sistema de desgasificación*.

Con objeto de reducir el riesgo empresarial en la construcción de una Planta de Revalorización del Biogás, es recomendable realizar el proyecto escalonado en las siguientes etapas:

1. *Estudio de caracterización y cuantificación del biogás generado*
2. *Construcción de la planta de desgasificación*
3. *Comprobación de la cantidad y composición del biogás efectivamente recuperado del vertedero*
4. *Construcción de la planta de revalorización*

Algunos autores, no obstante, se cuestionan este esquema, y plantean eliminar o limitar el alcance de la primera etapa, debido al bajo nivel de confianza de los métodos de predicción de la producción de biogás (Eden, 1990), que apenas puede mejorarse utilizando períodos de ensayo en campo muy largos (Gendebien *et al.*, 1992; Brown y Maunder, 1994). Incluso se cuestiona la rentabilidad de emprender estos costosos estudios frente a la posibilidad de iniciar escalonadamente la construcción de la planta de desgasificación, que se dividiría en varios módulos para ello, y, con los resultados que se obtengan, iniciar la construcción del sistema de revalorización más apropiado (Robert K. Ham en el libro de Christensen *et al.*, 1996).

Sin ignorar en absoluto estas consideraciones, el hecho es que tanto empresas privadas como la administración pública siguen demandando la realización de estos estudios. Sin ellos, el coste del sistema de desgasificación es una incógnita y, por tanto, no se puede plantear un concurso para su ejecución. Además, sí es posible reducir las incertidumbres en los resultados de estos estudios, como se tratará de demostrar a continuación.



En este apartado, se propone una metodología para el desarrollo de un *Estudio de Caracterización y Cuantificación del Biogás Generado en un Vertedero Controlado*, estudio que permite diagnosticar el estado del vertedero, la cantidad de biogás que genera y su composición, como paso previo a la instalación de un sistema de desgasificación. El método planteado ha sido aplicado en el vertedero de Bratovo (Burgas, Bulgaria) en el otoño de 1995 (Martín *et al.*, 1995f; Martín, 1996a; Martín *et al.*, 1997c).

### 5.1. Propuesta de una metodología de estudio

Para la realización de un *Estudio de Caracterización y Cuantificación del Biogás*, se proponen tres estrategias complementarias entre sí:

- Un estudio de las **condiciones generales del vertedero** controlado
- La aplicación de un **modelo matemático de cálculo de producción de biogás**
- Un estudio mediante **ensayos y mediciones en campo** de la cantidad de biogás recuperable y su composición química

El primer estudio, sobre las **condiciones generales del vertedero** controlado, debe analizar aspectos tales como:

- *Condiciones ambientales* de la zona: precipitaciones, temperaturas máximas y mínimas, vientos dominantes, insolación, presiones, etc.
- *Cantidades de residuos* vertidas y previsiones de futuro
- *Composición de los residuos*
- *Morfología del vertedero*: profundidad y antigüedad de los residuos en las distintas zonas del relleno
- *Técnicas de vertido*, como la compactación, trituración, recubrimiento, etc.

Los resultados de esta primera parte son una serie de valoraciones cualitativas sobre la generación del biogás en el vertedero, así como recomendaciones sobre aspectos de tratamiento de los residuos para el aumento de la producción de biogás, cuando ello sea factible.

En segundo lugar, por medio del **modelo matemático de cálculo de producción de biogás** se estima el caudal de biogás recuperable en el momento presente y en el futuro. Este modelo se calibrará con los datos obtenidos al estudiar las *condiciones generales del vertedero*.

Finalmente, los **ensayos y mediciones en campo** permiten:

- Complementar los resultados obtenidos en los modelos matemáticos para determinar el valor real de *caudal de biogás recuperable* con menor margen de error

- La definición de la *composición del biogás*, tanto elementos mayoritarios (metano, dióxido de carbono, nitrógeno y oxígeno), que nos definen el poder calorífico del biogás, como minoritarios (compuestos orgánicos halogenados y sulfuro de hidrógeno fundamentalmente), que nos advierten sobre la necesidad de depurar el biogás o dotar a los equipos de aprovechamiento de sistemas especiales de protección

Para la realización de estos ensayos y mediciones se emplea un equipo portátil de extracción de biogás, además de otros equipos portátiles de análisis y medida.

Ninguna de estas tres estrategias es concluyente por sí misma. Sólo la combinación de ellas, unida a la experiencia de los técnicos, permite cumplir con éxito los objetivos marcados.

Para el estudio sobre las **condiciones generales del vertedero** el lector puede acudir al Apartado 2.5, dónde han sido analizados y valorados aquellos aspectos que influyen en la generación y composición del biogás. En ese apartado también encontrará referencias al estudio realizado en el vertedero de Bratovo.

Del mismo modo, para el cálculo de la producción recuperable de biogás se empleará el **modelo matemático de cálculo de producción de biogás** descrito en el Apartado 2.6. En ese apartado también se encuentran los resultados obtenidos en el vertedero de Bratovo.

Finalmente, a continuación se analiza el estudio mediante **ensayos y mediciones en campo** de la cantidad de biogás recuperable y su composición química, y se concluye este Capítulo 5 con una discusión sobre el alcance e interpretación de los resultados obtenidos.

## 5.2. Ensayos y medidas en campo

Como se ha comentado, estos ensayos están encaminados a determinar la cantidad y calidad del biogás recuperable mediante la realización de medidas y ensayos en el vertedero.

Como se comentaba en el Apartado 4.2, para la medida del caudal de biogás recuperable en el vertedero se recomienda la *construcción de sondas* o pozos iguales a los que se emplearían en un sistema de extracción forzada, y la realización en ellos de ensayos con un *equipo portátil de extracción de biogás*.

Este planteamiento tiene la ventaja, frente a otros ensayos *no destructivos*, de una mayor similitud con las condiciones de trabajo del sistema de desgasificación que se pretende construir.

En este apartado se estudian, en primer lugar, los equipos de medida necesarios para los ensayos y medidas. A continuación, se discute la ubicación y el número de sondas de muestreo necesarias, así como la duración de los ensayos. Finalmente, se explica el tipo de ensayos a utilizar y la información obtenida de cada uno de ellos.

### 5.2.1. Descripción de los equipos necesarios

Los ensayos y medidas en campo están encaminados a medir las siguientes magnitudes:

- **Composición** del biogás, tanto componentes mayoritarios como minoritarios
- **Caudal** de biogás
- **Presión** relativas en el pozo de captación
- **Temperatura** del biogás

Los equipos necesarios para el análisis de la **composición** del biogás han sido estudiados en el Apartado 2.4.4. Asimismo, en el Apartado 4.2 se han explicado las características de los equipos de medida del **caudal** (el **Extractor Portátil de Biogás**, elemento clave en la realización de los ensayos propuestos en este estudio) y de la **presión**. Únicamente resta por comentar las características del equipo para la medida de la **temperatura**.

La temperatura óptima para una degradación anaerobia es de 20-45 °C para las bacterias mesófilas y 45-75 °C para las termófilas (Pacey y DeGier, 1986). En un vertedero habitualmente la degradación se realiza en el rango mesófilo. No obstante, a partir de una cierta profundidad en el vertedero (10 m) y en condiciones climatológicas favorables, es posible entrar en el rango termófilo en las tongadas más antiguas (Attal *et al.*, 1992). Por tanto, la temperatura del biogás podría superar los 45 °C.

Es interesante contrastar la temperatura ambiente con la del biogás. La diferencia entre ambas temperaturas ofrece una primera indicación de la actividad metanogénica que está teniendo lugar.

Atendiendo a estos comentarios, las características técnicas del termómetro deben ser:

- Rango de temperaturas: -20 a +75 °C
- Portátil y preparado para trabajar en intemperie
- Sonda de medida resistente a la corrosión

Como características de *calidad* está la rapidez en la presentación de la medida y la posibilidad de almacenar datos en memoria para ser volcados posteriormente a un ordenador.

### 5.2.2. Ubicación y número de sondas de muestreo

Como se ha comentado en el Apartado 4.1, existen distintos tipos de captaciones de biogás. En este estudio se han empleado siempre captaciones verticales.

#### 5.2.2.1. Selección del emplazamiento de los pozos

Se pretende caracterizar completamente un vertedero mediante el menor número de sondas posible. Para ello, cada sonda debe localizarse evitando que condiciones singulares del lugar elegido no permitan posteriormente extrapolar los resultados de los ensayos.

Los factores que influyen en la cantidad de biogás recuperable en una captación de biogás son:

- La **profundidad** de los RSU en la zona analizada
- La **antigüedad** de los RSU en la zona analizada
- La existencia de **Residuos Industriales** en la zona de muestreo
- La mala **gestión** de alguna zona del vertedero (por ejemplo, con una cubrición de los residuos deficiente)
- La existencia de zonas **inundadas** en el vertedero (donde el rendimiento de las captaciones es muy bajo)

Antes de comenzar la construcción de las sondas de muestreo, se deberá dividir el vertedero en zonas representativas, atendiendo a estos factores. Son necesarios **planos topográficos** con los *perfiles del vertedero originales* y su *evolución posterior*.

La mayor o menor **profundidad del vertedero** en la zona del pozo hace que el caudal recuperado en una captación sea, al menos en principio, mayor o menor. Ello es lógico, pues los pozos de captación recogen el gas de un volumen de basuras que podemos aproximar a un tronco de cono. El radio de su circunferencia menor, *Radio de Influencia* del pozo, aumenta con la depresión aplicada al pozo, pero su altura sólo depende de la profundidad del vertedero. Por tanto, a mayor profundidad del vertedero en el punto de muestreo, un mayor volumen de basuras estará afectado por la extracción de biogás y un mayor caudal será previsiblemente recuperado.

Hay que añadir el hecho de que la degradación anaerobia se realiza en peores condiciones cuando la zona del vertedero es poco profunda, pues es afectada por las variaciones de temperatura ambientales. Profundidades menores de 10 m, con un recubrimiento deficiente de los residuos y temperaturas ambientales bajas, provocan además un peor rendimiento de las captaciones de biogás (Pacey y DeGier, 1986; Attal *et al.*, 1992; Brown y Maunder, 1994).

En resumen, el vertedero se dividirá en zonas de menos de 10 metros de profundidad, de entre 10 y 20 metros, y así sucesivamente. Las zonas del vertedero de distinta antigüedad se tratarán por separado. En las zonas donde se hayan vertido residuos industriales o donde se haya constatado una gestión incorrecta de los RSU se interpretarán los resultados con las debidas reservas.

#### 5.2.2.2. Número de sondas de muestreo

Una vez definidas las zonas representativas del vertedero, se construirán las sondas, en número proporcional a la superficie de cada zona. Para determinar el número de sondas óptimo por zona,  $n$ , se calcula primero el número de pozos de extracción de la futura red de captación que estarán dentro de la zona en cuestión,  $N$ . Se toman para este cálculo un *Radio de Influencia* de los pozos de 20 metros (Tomasini, 1986; Uriarte *et al.*, 1992b; Brown y Maunder, 1994). Este valor del radio de influencia se debe corregir posteriormente con los resultados de los trabajos en campo.

Los valores que toma el caudal recuperable de composición constante en cada sonda,  $Q_i$ , están en el intervalo  $[0, \infty)$ , siendo el valor máximo esperable de  $150 \text{ m}^3\text{N/h}$ . La probabilidad de que  $Q_i$  tome cualquiera de esos valores sigue una distribución normal  $N(\mu, \sigma)$ .

Supongamos que ya se han analizado  $n$  pozos, y se han obtenido los correspondientes valores del caudal recuperable,  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ . Se puede aproximar la media y la varianza de la distribución de probabilidad normal con estos resultados:

$$\mu \approx x = \sum Q_i/n \quad \text{para } n = 1, 2, \dots, n \quad [5-1]$$

$$\sigma^2 \approx S^2 = (1/(n-1)) \sum (Q_i - x)^2 \quad [5-2]$$

Supongamos que se ha fijado como objetivo un error máximo en la determinación del caudal total de la zona de  $Y \text{ m}^3\text{N/h}$ , es decir, un error máximo de  $Y/N \text{ m}^3\text{N/h}$ , siendo  $N$  el número total de pozos instalables, en el cálculo del valor del caudal medio,  $x$ . Y ello con una probabilidad de acierto mayor de  $\alpha$ . Entonces, podemos calcular un nuevo valor del número  $n$  de sondas de estudio que es necesario construir.

$$P(|X - \mu| < d) \geq \alpha \quad [5-3]$$

$$n = \text{mayor parte entera de } ((Z^2 S^2)/(d^2)) \quad [5-4]$$

donde,

**Z**, cuantil de orden  $(1 - (\alpha/2))$

**S**, varianza, calculada según [5-2]

**d**, error máximo admisible por sonda, ( $d=Y/N$ )

Para este desarrollo se ha supuesto que  $((X - \mu)/(S / n^{1/2}))$  sigue una distribución de probabilidad  $N(0,1)$ .

A modo de ejemplo, se ha resuelto el problema para  $N = 20$  pozos instalables en un vertedero y analizadas  $n = 5$  sondas con los siguientes resultados de  $Q_i$ : 50, 60, 20, 45 y 50  $\text{m}^3\text{N/h}$ . Para esta muestra el caudal medio  $x$  es de 45  $\text{m}^3\text{N/h}$  y la desviación típica  $S$  de 15  $\text{m}^3\text{N/h}$ . Según esta muestra, la producción total de biogás recuperable en el vertedero es de 900  $\text{m}^3\text{N/h}$ . Aceptando como máximo un error total en la determinación del caudal de 200  $\text{m}^3\text{N/h}$ , es decir, un error  $d=10 \text{ m}^3\text{N/h}$  en la aproximación del caudal medio, con una probabilidad mayor o igual  $\alpha=0,9$ , el número de sondas que debemos analizar sería de  $n = 6$ , es decir, aún debemos de proseguir el estudio. Naturalmente una vez estudiada la sexta sonda deberemos repetir este cálculo y comprobar que efectivamente se cumple con la nueva varianza.

### 5.2.3. Duración de los trabajos de campo

Pareciera que la duración de los trabajos de campo está sólo condicionada por el tipo de ensayos a realizar y el número de sondas de muestreo que se haya establecido como necesario construir. Sin embargo, algunos autores advierten de la necesidad de prolongar en todo caso los estudios durante un período largo de tiempo (Brown y Maunder, 1994).

La explicación científica de la necesidad de dilatar el período de trabajos en campo está en la interacción existente entre los factores ambientales y los resultados obtenidos en los ensayos. Estos factores ambientales son la temperatura y las precipitaciones.

La falta de humedad, así como las bajas temperaturas, son factores que afectan la actividad de los microorganismos responsables de la degradación anaerobia de los RSU, como demuestran los ensayos en laboratorio.

Sin embargo, una helada nocturna sólo debe afectar a los residuos más cercanos a la superficie en el vertedero, manteniéndose la temperatura prácticamente constante en su interior. Así lo demuestran las medidas de la temperatura del biogás. Del mismo modo, parece lógico pensar que la capacidad de retención de humedad de los residuos debería ser suficiente para mantener la actividad microbiana durante un período estacional de menores precipitaciones.

Las condiciones de la superficie del vertedero sí cambian notablemente en pocos días por acción de estos meteoros. Una cobertura arcillosa se muestra inconsistente tras un período seco, agrietándose y levantando nubes de polvo con el viento o el paso de los camiones, mientras que sus propiedades expansivas la hacen rápidamente impermeable a las pocas horas de un aguacero. Si después hubiera una helada nocturna, la formación de placas de hielo haría que esta superficie fuese casi perfectamente impermeable.

Tal y como pone de manifiesto el modelo de migración del biogás, definido en el Capítulo 3, así como el modelo de la captación de biogás, definido en el Apartado 4.4, la menor permeabilidad de la superficie del terreno se traduce en una mayor eficacia en la recuperación del biogás en los pozos, pues reduce la entrada de aire y las fugas de biogás.

En resumen, las variaciones estacionales en las condiciones ambientales modifican los resultados de los ensayos sin alterar, salvo en climas muy extremos, el potencial de generación de biogás en el vertedero.

La conveniencia de prolongar durante varios meses los ensayos en el vertedero se basaría en aumentar la probabilidad de que se presentasen los meteoros mencionados, y así pudiese ser evaluada su trascendencia. Seis meses sería un período suficiente en la mayoría de los casos. En climas tropicales, bastaría un período más corto.

No obstante, una vez conocida y definida la fuente potencial de errores en la aplicación de los ensayos, estamos en condiciones de evitarlos. Una correcta caracterización de los materiales de cobertura nos permite advertir estos riesgos. Así, los ensayos pueden reproducirse alterando artificialmente las condiciones de la cobertura, humedeciendo por ejemplo la superficie de los residuos en un área de 40 m de radio alrededor del pozo o agregando nuevo material de cobertura, con distintas propiedades, sobre el original.

En cualquier caso, los resultados del estudio deben acompañarse con el correspondiente apartado de riesgos y presunciones, además de recomendaciones tales como la recirculación de lixiviados en períodos secos, la selección de nuevos materiales de cobertura ó el incremento de los espesores de la misma.

#### 5.2.4. Técnicas experimentales

Los ensayos propuestos para realizar en cada sonda de muestreo son:

- **Ensayo Presión/Tiempo**
- **Medida de Temperaturas**
- **Ensayo Caudal Aire/Caudal Gas**
- **Ensayo de Régimen Permanente**
- **Ensayo de Radio de Influencia**

Todos estos ensayos ya han sido descritos en el Apartado 4.2, salvo la Medida de Temperaturas, que será descrita a continuación.

El **Ensayo Presión/Tiempo** es útil especialmente cuando existe una red de pozos de venteo en el vertedero. Realizando este ensayo, es posible definir las zonas del vertedero donde la producción de biogás es comparativamente mayor. En el caso de no existir pozos de venteo, el Ensayo Presión/Tiempo permite identificar inicialmente cuáles son las sondas construidas que tendrán mayor producción de biogás. Una modificación de los valores obtenidos en este ensayo para un mismo pozo en distintos días revela modificaciones en las condiciones ambientales que es necesario pararse a estudiar.

Del mismo modo actúa la **Medida de la Temperatura** del biogás, que debe estar en relación con la actividad metanogénica en la zona objeto de estudio y, por tanto, con el caudal de biogás recuperable, como explicaremos.

El **Ensayo Caudal Aire/Caudal Gas** informa sobre cuál es la capacidad de generación de biogás en una sonda para una composición objetivo de metano determinada. Además, nos informa de qué depresión debemos aplicar en el pozo para obtener ese caudal.

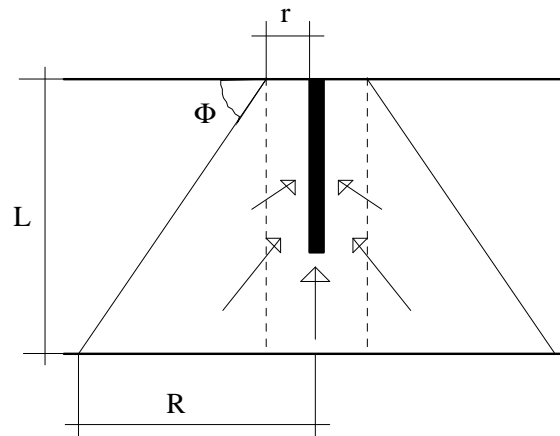
Mediante el **Ensayo de Régimen Permanente** se comprueba que efectivamente el pozo es capaz de ceder durante períodos largos de tiempo el caudal anteriormente definido, sin que por ello caiga el contenido en metano.

Finalmente, el **Ensayo de Emisiones Superficiales** nos define cuál es el Radio de Influencia del pozo, paso último para el diseño de la red de extracción de biogás.

El valor del caudal recuperable por pozo según los ensayos Caudal Aire/Caudal Gas y Régimen Permanente es superior al caudal que suministrará un pozo dentro de la red del sistema de desgasificación. Es imprescindible estudiar estos resultados de forma prudente.



Como se ha explicado en el Apartado 4.5, la Zona de Influencia de un *pozo aislado* tiene forma de tronco de cono, como se observa en la Figura 68. El valor del Radio de Influencia calculado a través de ensayos de emisiones superficiales,  $r$  en la Figura 68, es adoptado como espaciamiento entre los pozos en el proyecto de red de captación. La competencia por el biogás en la *red de pozos* hará que la Zona de Influencia se reduzca a un cilindro de radio  $r$ .



**Fig. 68.** Parámetros que definen la zona de Influencia de un pozo

La relación entre el caudal de biogás recuperado en los ensayos por una sonda y el que se recupera en esa misma sonda al instalar una red completa de pozos es la misma que existe entre el volumen del tronco de cono y el volumen del cilindro de la Figura 68. En esta consideración despreciamos la influencia de la posible estratificación de los residuos en capas de distinta antigüedad y, por tanto, con distinta generación de biogás.

Llamando  $L$  a la profundidad del vertedero y  $\Phi$  al ángulo representado en dicha Figura 68, tenemos que:

$$V_{\text{tronco de cono}} = \frac{\pi L}{3} \{L^2 \operatorname{tg}^2(\pi - \phi) + 3Lr \operatorname{tg}(\pi - \phi) + 3r^2\} \quad [5-5]$$

$$V_{\text{cilindro}} = \pi r^2 L \quad [5-6]$$

La única incógnita desconocida es el ángulo  $\Phi$ . Supongamos que este ángulo tome un valor de  $\Phi = 60^\circ$  y que el resultado de los ensayos de campo, en una zona de profundidad  $L = 15$  m, fueran un caudal recuperable de  $100 \text{ m}^3\text{N/h}$  por sonda, con un radio de influencia  $r = 15$  m. Con estos datos, cada pozo en una red de extracción proporcionaría tan sólo  $59,2 \text{ m}^3\text{N/h}$ . Si la zona del vertedero tuviese 5 m más de profundidad, es decir  $L = 20$  m, el caudal bajaría hasta  $50,8 \text{ m}^3\text{N/h}$ . Si mantuviésemos el valor de la profundidad pero aceptásemos un ángulo  $\Phi = 45^\circ$ , el caudal bajaría hasta  $42,9 \text{ m}^3\text{N/h}$ .

Afortunadamente, la variación de los resultados obtenidos al modificar el valor de la profundidad,  $L$ , se ve atenuada en la realidad por el hecho de que las capas más profundas de residuos son también las de mayor antigüedad y, por tanto, las de menor producción de biogás.

Otra fuente de error en la interpretación de los resultados obtenidos en los ensayos es debida al solapamiento de las Zonas de Influencia de los pozos una vez construida la red de captación del biogás. Debido a ello, el caudal de Biogás recuperado disminuye, no ocurriendo lo mismo con el caudal de aire entrante. Por tanto, para una misma depresión aplicada, el contenido en metano del Biogás recuperado por un pozo en la red de captación es menor que el recuperado por la sonda durante los ensayos. Ello obliga a definir una Depresión Objetivo menor para los pozos de la red de captación y, como consecuencia, a que el Radio de Influencia de los pozos sea menor que el calculado durante los ensayos.

#### 5.2.4.1. Medida de la Temperatura

La medida de temperaturas aún no había sido tratada en este trabajo, por lo que se estudia a continuación, ofreciendo los resultados obtenidos en los vertederos de La Zoreda y Bratovo como ejemplos.

El registro de la temperatura del biogás en los pozos debe incluir:

- **Código** de identificación del pozo
- **Fecha** y hora de la medida
- **Temperatura ambiente**
- **Temperatura del biogás**

Para la medida de la temperatura del biogás, la sonda del termómetro se introducirá en el pozo a través de una llave de toma de muestras del cabezal del mismo. Si la toma de muestras se realiza con el pozo en depresión, deberá evitarse la entrada de aire por el orificio de muestreo.

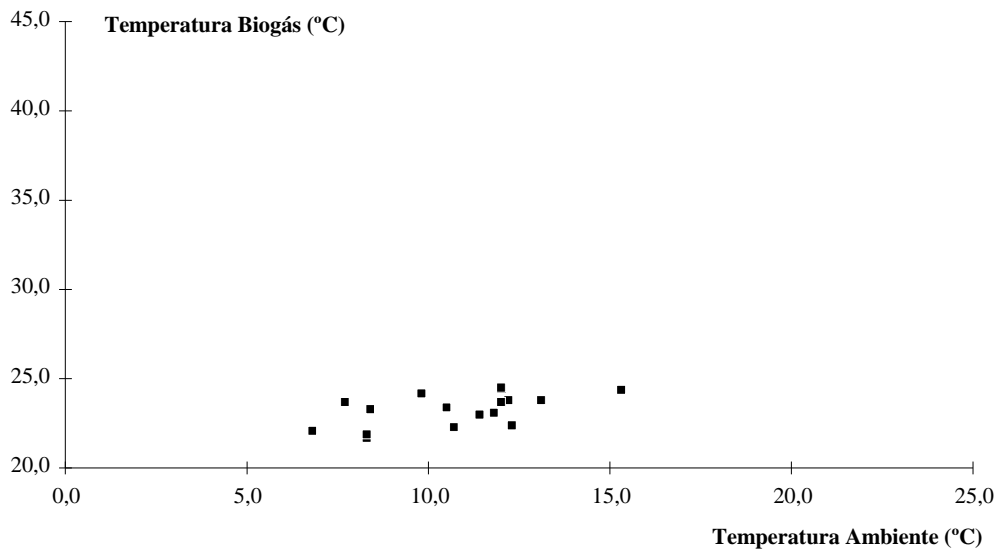
Es interesante la medida de la temperatura a distintas horas del día. Representando la temperatura del biogás frente a la temperatura ambiente, podemos observar distintas tendencias. Los pozos de mayor actividad metanogénica mantendrán una diferencia de temperaturas mayor. Normalmente, la temperatura del biogás está entre 25 y 40°C. La diferencia entre la temperatura del biogás y la temperatura ambiente está entre 15 y 25°C.

En las Tablas 52, 53 y 54 se muestran una serie de registros de temperatura de distintos pozos de los vertederos de La Zoreda y de Bratovo. Esta información ha sido representada de forma gráfica en las Figuras 69 a 74 para los pozos A2, A4 y A10 de La Zoreda.

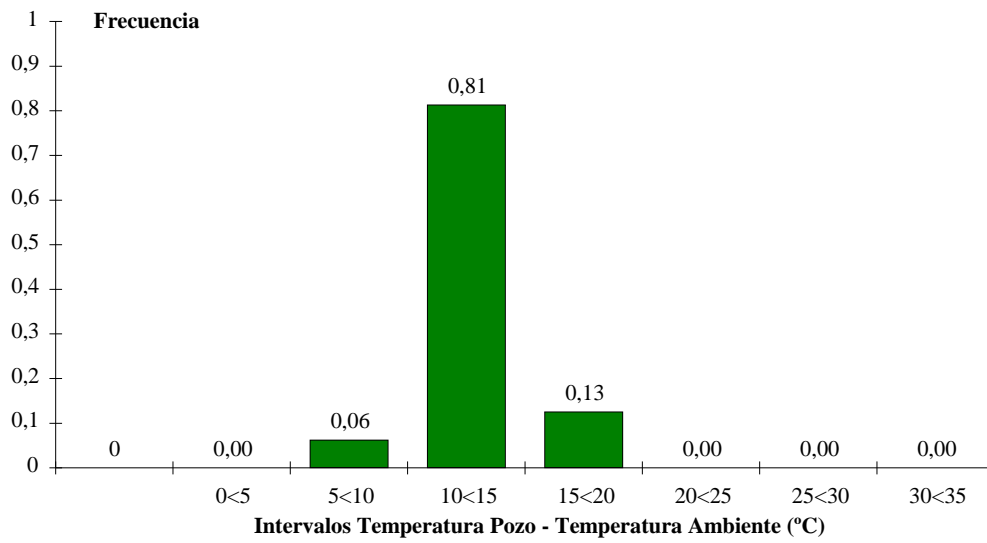
**Tabla 52.** Registro de temperaturas en los pozos A2, A4 y A10 (vertedero de La Zoreda)

<b>POZO A2</b>	<b>Hora</b>	<b>T<sup>a</sup>amb</b>	<b>T<sup>a</sup>gas</b>	<b>Delta T</b>	<b>Media Delta</b>	<b>Media T</b>
7/02/94	13:00	10,5	23,4	12,9	12,5	23,2
8/02/94	12:40	12,0	24,5	12,5		
	13:00	12,2	23,8	11,6		
	14:30	12,0	23,7	11,7		
9/02/94	9:25	8,3	21,7	13,4		
	10:00	8,4	23,3	14,9		
	12:00	11,4	23,0	11,6		
10/02/94	9:40	6,8	22,1	15,3		
	10:50	10,7	22,3	11,6		
	13:30	13,1	23,8	10,7		
14/02/94	9:30	7,7	23,7	16,0		
	10:30	8,3	21,9	13,6		
16/02/94	9:25	12,3	22,4	10,1		
	14:00	15,3	24,4	9,1		
18/02/94	9:45	9,8	24,2	14,4		
	12:20	11,8	23,1	11,3		
<b>POZO A4</b>	<b>Hora</b>	<b>T<sup>a</sup>amb</b>	<b>T<sup>a</sup>gas</b>	<b>Delta T</b>	<b>Media Delta</b>	<b>Media T</b>
17/03/94	9:30	13	38,1	25,1	22,7	38,7
21/03/94	9:40	12,7	37,1	24,4		
28/03/94	9:35	17	40,6	23,6		
11/04/94	16:00	17	36	19		
25/04/94	10:45	14,5	35,4	20,9		
3/05/94	9:45	14,8	38,4	23,6		
10/05/94	9:25	15,5	38,3	22,8		
16/05/94	9:25	13	39	26		
23/05/94	9:25	16	38,5	22,5		
30/05/94	9:30	16	39,7	23,7		
6/06/94	9:30	18	40,5	22,5		
13/06/94	9:35	20	40	20		
20/06/94	9:50	19,9	40,9	21		
<b>POZO A10</b>	<b>Hora</b>	<b>T<sup>a</sup>amb</b>	<b>T<sup>a</sup>gas</b>	<b>Delta T</b>	<b>Media Delta</b>	<b>Media T</b>
17/03/94	9:30	13	33,1	20,1	16,7	32,9
21/03/94	9:40	12,7	27,5	14,8		
28/03/94	9:35	17	32,5	15,5		
11/04/94	16:00	17	29,4	12,4		
25/04/94	10:45	14,5	32,9	18,4		
3/05/94	9:45	18	33,8	15,8		
10/05/94	9:25	15,5	34,2	18,7		
16/05/94	9:25	13	30	17		
23/05/94	9:25	16	34	18		
30/05/94	9:30	16	34	18		
6/06/94	9:30	18	36,2	18,2		
13/06/94	9:35	20	35	15		
20/06/94	9:50	19,9	35,7	15,8		

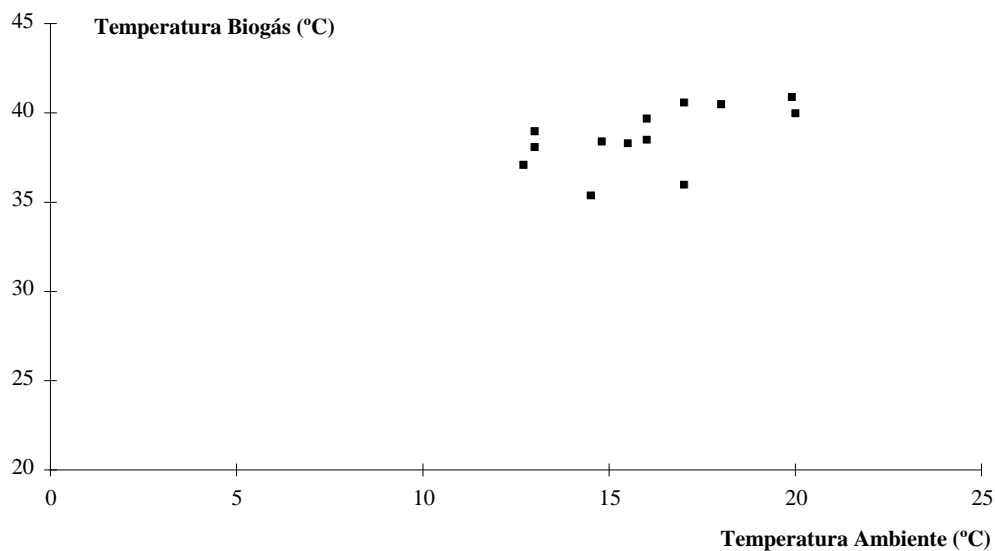
(1) Todas las temperaturas en °C. T<sub>amb</sub>, temperatura ambiente; T<sub>gas</sub>, temperatura biogás; Delta T, diferencia entre la temperatura del biogás y la temperatura ambiente.



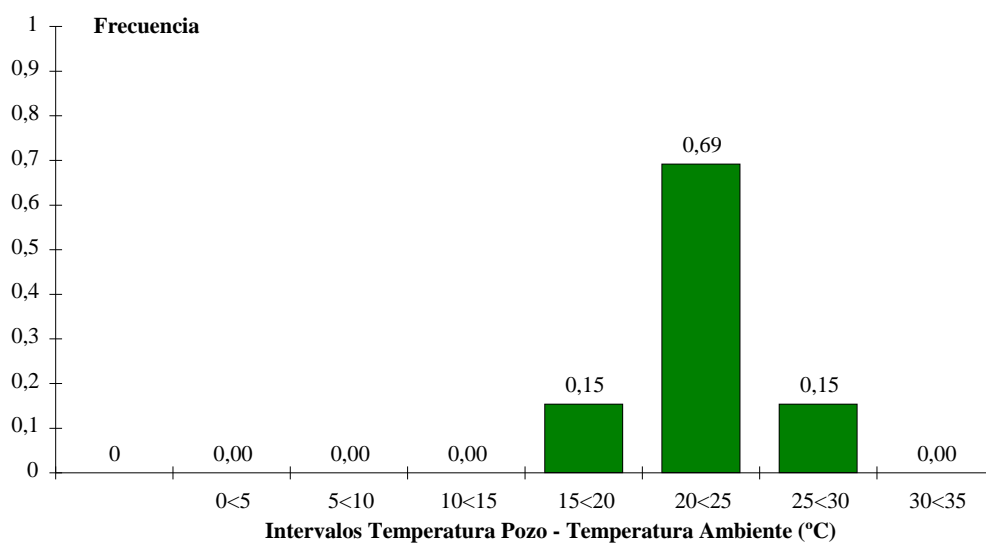
**Fig. 69.** Temperaturas, Pozo A2, Febrero'94 (La Zoreda)



**Fig. 70.** Diferencia de temperaturas, Pozo A2, Febrero'94 (La Zoreda)



**Fig. 71.** Temperaturas, Pozo A4, Marzo - Junio'94 (La Zoreda)



**Fig. 72.** Diferencia de temperaturas, Pozo A4, Marzo - Junio'94 (La Zoreda)

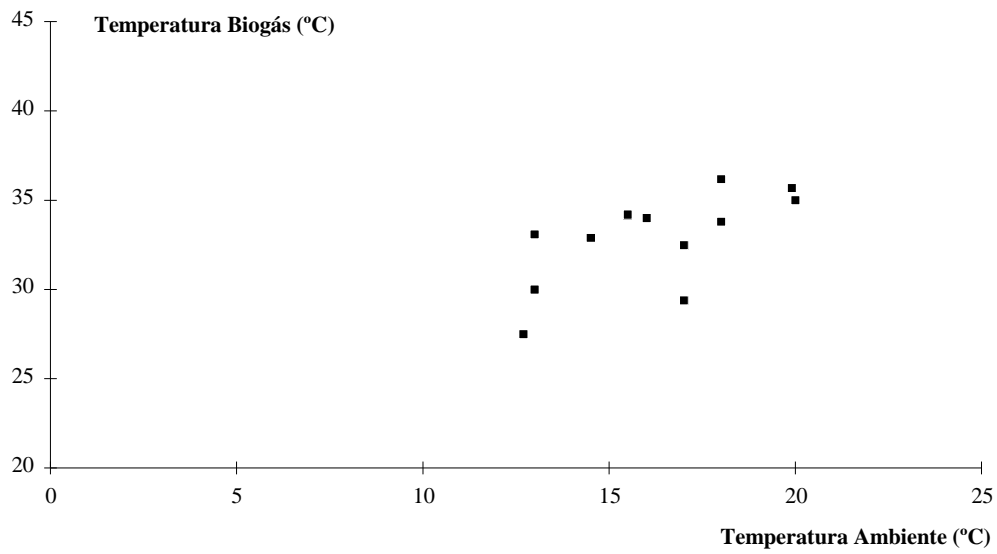


Fig. 73. Temperaturas, Pozo A10, Marzo - Junio'94 (La Zoreda)

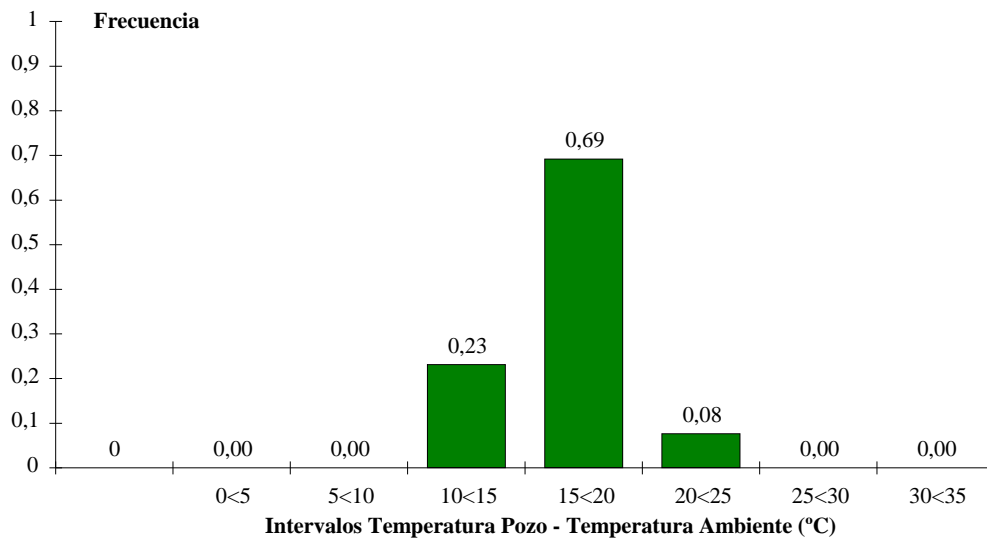


Fig. 74. Diferencia de temperaturas, Pozo A10, Marzo - Junio'94 (La Zoreda)

**Tabla 53.** Registro de temperaturas en pozos de la Caseta F (vertedero de La Zoreda)

<b>POZO F2</b>	<b>Hora</b>	<b>T ambiente</b>	<b>T pozo</b>	<b>Delta T</b>	<b>Media Delta</b>	<b>Media T</b>
		13,6	25,2	11,6	9,9	21,6
		11	22	11		
		10,5	17,6	7,1		
<b>POZO F3</b>	<b>Hora</b>	<b>T ambiente</b>	<b>T pozo</b>	<b>Delta T</b>	<b>Media Delta</b>	<b>Media T</b>
		14,1	25,2	11,1	9,3	21,3
		11,3	18,5	7,2		
		10,6	20,3	9,7		
<b>POZO F4</b>	<b>Hora</b>	<b>T ambiente</b>	<b>T pozo</b>	<b>Delta T</b>	<b>Media Delta</b>	<b>Media T</b>
		14,2	21,7	7,5	3,1	16,2
		15	14,7	-0,3		
		10	12,2	2,2		
<b>POZO F5</b>	<b>Hora</b>	<b>T ambiente</b>	<b>T pozo</b>	<b>Delta T</b>	<b>Media Delta</b>	<b>Media T</b>
		9,6	23,8	14,2	14,1	24,0
		10,2	24,1	13,9		
<b>POZO F6</b>	<b>Hora</b>	<b>T ambiente</b>	<b>T pozo</b>	<b>Delta T</b>	<b>Media Delta</b>	<b>Media T</b>
		14,2	23,9	9,7	8,8	20,1
		9,6	18,2	8,6		
		10,2	18,3	8,1		
<b>POZO F7</b>	<b>Hora</b>	<b>T ambiente</b>	<b>T pozo</b>	<b>Delta T</b>	<b>Media Delta</b>	<b>Media T</b>
		12,3	26,4	14,1	10,1	21,6
		10,1	20,3	10,2		
		12	18	6		
<b>POZO F8</b>	<b>Hora</b>	<b>T ambiente</b>	<b>T pozo</b>	<b>Delta T</b>	<b>Media Delta</b>	<b>Media T</b>
		12,6	17,1	4,5	3,3	15,0
		9,6	13,8	4,2		
		12,8	14	1,2		
<b>POZO F9</b>	<b>Hora</b>	<b>T ambiente</b>	<b>T pozo</b>	<b>Delta T</b>	<b>Media Delta</b>	<b>Media T</b>
		12,6	28,7	16,1	15,3	27,7
		12,7	26,9	14,2		
		12	27,6	15,6		

(1) Todas las temperaturas en °C. Delta T, diferencia entre la temperatura del biogás,  $T_{\text{pozo}}$ , y la temperatura ambiente,  $T_{\text{ambiente}}$

**Tabla 54.** Registro de temperaturas en las sondas del vertedero de Bratovo

<b>POZO I</b>	<b>Hora</b>	<b>T ambiente</b>	<b>T pozo</b>	<b>Delta T</b>	<b>Media Delta</b>	<b>Media T</b>
2/11/95	9:50	14	26,1	12,1	16,6	29,4
	11:25	15	30,2	15,2		
10/11/95	9:50	9,5	32	22,5		
<b>POZO II</b>	<b>Hora</b>	<b>T ambiente</b>	<b>T pozo</b>	<b>Delta T</b>	<b>Media Delta</b>	<b>Media T</b>
2/11/95	12:15	16,3	27,7	11,4	17,3	32,8
3/11/95	13:45	19,5	29,5	10		
	10:30	15,5	31,2	15,7		
	11:55	16,5	31,9	15,4		
10/11/95	9:50	9,5	43,7	34,2		
<b>POZO III</b>	<b>Hora</b>	<b>T ambiente</b>	<b>T pozo</b>	<b>Delta T</b>	<b>Media Delta</b>	<b>Media T</b>
6/11/95	11:00	6,7	27,4	6,9	17,3	26,6
7/11/95	10:10	5	26	21		
	14:50	6	26	20		
8/11/95	10:35	5,3	27,5	22,2		
10/11/95	9:50	9,5	26	16,5		
<b>POZO IV</b>	<b>Hora</b>	<b>T ambiente</b>	<b>T pozo</b>	<b>Delta T</b>	<b>Media Delta</b>	<b>Media T</b>
8/11/95	11:30	5,5	30	24,5	27,15	32,2
9/11/95	9:20	4,6	34,4	29,8		
<b>POZO V</b>	<b>Hora</b>	<b>T ambiente</b>	<b>T pozo</b>	<b>Delta T</b>	<b>Media Delta</b>	<b>Media T</b>
9/11/95	12:05	5,4	14,5	9,1	16,8	23,2
10/11/95	9:20	4,3	23	18,7		
10/11/95	9:50	9,5	32,2	22,7		

(1) Todas las temperaturas en °C. Delta T, diferencia entre la temperatura del biogás,  $T_{\text{pozo}}$  y la temperatura ambiente,  $T_{\text{ambiente}}$



### 5.3 Interpretación y alcance de resultados

Como se ha comentado al principio de este Capítulo 5, el resultado de los tres estudios planteados (*condiciones generales del vertedero, modelo matemático de cálculo de producción de biogás y ensayos y mediciones en campo*) debe permitir conocer la **producción de biogás** en el momento actual, su **evolución futura** y su **composición**. Este resultado estará acompañado de una serie de *recomendaciones* para incrementar la generación y posibilitar la mejor recuperación del biogás, así como un apartado de *riesgos y presunciones* sobre los resultados obtenidos.

La **composición del Gas de Vertedero** generado, sin mezcla de aire, viene dada por los análisis en los pozos sin extracción. Se realizará la media de las distintas sondas estudiadas. Este dato debe coincidir, dentro de unos márgenes, con el resultado de corregir matemáticamente la entrada de aire en las muestras analizadas en régimen de extracción.

En el caso del vertedero de Bratovo, como se ha resumido en el Apartado 2.4.4, la composición del gas de vertedero es de 52,6% de CH<sub>4</sub>, 35,1% de CO<sub>2</sub> y 12,3% de N<sub>2</sub>.

La **composición del biogás** recuperable, con mezcla de aire, la decide el técnico, basándose en la composición del gas de vertedero, las fluctuaciones observadas y los límites inferiores de metano que imponen los sistemas de aprovechamiento energético. En general, normalmente se rebaja el contenido en metano entre 5 y 10 puntos, admitiéndose un nivel de oxígeno, debido a la entrada de aire, de hasta un 3%.

Así, en el vertedero de Bratovo se ha decidido fijar como objetivo un 45,0% de CH<sub>4</sub> en el biogás recuperado. La concentración de los otros compuestos es de 30,0% de CO<sub>2</sub>, 2,9% de O<sub>2</sub> y 22,1% de N<sub>2</sub>.

El **caudal** de biogás recuperable se obtiene de contrastar los resultados del modelo matemático de producción de biogás, que se han resumido en el Apartado 2.6.2, con los diferentes ensayos utilizados. Estos ensayos determinan el caudal medio recuperable por pozo. Éste, multiplicado por el número de pozos instalables (superficie total del vertedero dividida entre la superficie de influencia de cada pozo, con todas las salvedades ya enunciadas), nos da un valor del caudal de biogás recuperable.

¿Cuál de los dos datos es más fiable: el resultado de aplicar el modelo de generación de gas o el obtenido a partir de los ensayos de campo? Cada caso deberá estudiarse por separado. Todo el estudio sobre las características del vertedero, las técnicas de tratamiento de los RSU, los ensayos de Presión/Tiempo, las medidas de temperatura del biogás, etc. proporcionan criterios que deben aplicarse en esta decisión. En cualquier caso, siempre se debe optar por el resultado más conservador.

En el estudio del vertedero de Bratovo, los resultados de los Ensayos Caudal Aire/Caudal Gas de cuál es el caudal recuperable para un contenido en metano del 45% han sido muy dispares: 12, 23, 45 y 106 m<sup>3</sup>N/h respectivamente para cada sonda. La causa principal es el desigual tratamiento de los RSU en las distintas zonas del vertedero. Es interesante señalar que el caudal obtenido para la sonda IV en los ensayos del día 7/11/95 (106 m<sup>3</sup>N/h, muy superior al resto) se puede deber al fuerte descenso de la temperatura ambiente que tuvo lugar entre los días 3/11/95 y 6/11/95, y que provocó la formación de placas de hielo en la superficie del vertedero en torno a dicha sonda.

En cualquier caso, la producción de biogás calculada para el total del vertedero mediante el modelo matemático es de 582 m<sup>3</sup>N/h en el año 95. Teniendo en cuenta que es posible instalar, manteniendo el radio de influencia de 20 metros, 21 pozos en el vertedero, bastaría con que cada uno suministrase un caudal de 28 m<sup>3</sup>N/h para que el caudal total recuperado fuera 582 m<sup>3</sup>N/h, es decir, igual al calculado matemáticamente. Por prudencia, en vista de las graves deficiencias observadas en el tratamiento de los residuos en la cola del vertedero, este valor se ha considerado aún demasiado alto.

Finalmente, la predicción de la **evolución futura** del vertedero debe sujetarse al cumplimiento de las hipótesis de vertido y del mejoramiento o, al menos, mantenimiento, de las técnicas de tratamiento de los RSU recogidas en el correspondiente informe.

Así, en el vertedero de Bratovo se estima que en el año 2008 pueden generarse 878 m<sup>3</sup>N/h de biogás. Esta hipótesis sólo se ha tenido en cuenta a la hora de proponer las dimensiones del sistema de desgasificación del vertedero. También para establecer el horizonte de amortización de un equipo de aprovechamiento energético. Se ha recomendado estudiar la viabilidad económica de un primer grupo electrógeno de entre 250 y 300 m<sup>3</sup>N/h de caudal nominal.

## **6. SISTEMAS DE RECUPERACIÓN DEL BIOGÁS. MÉTODO DE CONTROL DE EXTRACCIÓN**

---

## 6. SISTEMAS DE RECUPERACIÓN DEL BIOGÁS. MÉTODO DE CONTROL DE EXTRACCIÓN

Mediante los sistemas de recuperación del biogás se logra corregir el impacto ambiental derivado de la emisión de metano en los vertederos. Generalmente, la construcción de una instalación de este tipo es el paso previo a la implantación de un sistema de aprovechamiento energético del biogás.

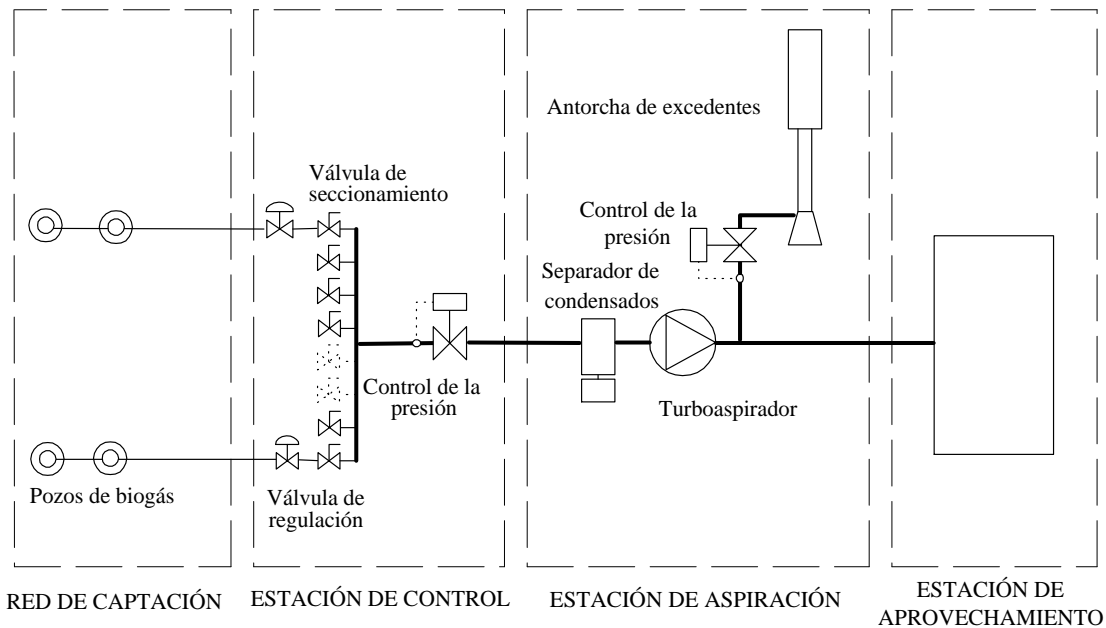
Las diferencias tecnológicas entre las plantas de recuperación suelen estar asociadas a la distintas posibilidades que existen de implementar el sistema de control. Sin embargo, la lógica de los sistemas de control es siempre la misma.

En el Apartado 6.1 se desarrollarán los distintos elementos que constituyen un sistema de recuperación del biogás. A continuación, en el Apartado 6.2, se explicará la lógica general de los sistemas de recuperación, y se propondrá un método para el control manual de pequeñas plantas de extracción. Éste método ha sido ensayado con éxito en el vertedero de La Zoreda y es empleado en la actualidad para el control de extracción del biogás para una Planta de Aprovechamiento de Subproductos Cárnicos en dicho vertedero.

### 6.1. Descripción general de los sistemas de recuperación del biogás

En un Sistema de Recuperación de Biogás se distinguen las siguientes partes, tal y como muestra la Figura 75 :

- La *Red de Captación de Biogás*, formada por:
  1. Pozos de extracción
  2. Líneas de transporte
- La *Estación de Control de Extracción de Biogás*, donde se encuentran los siguientes elementos:
  1. Válvulas de regulación
  2. Analizadores de metano y oxígeno
- La *Estación de Aspiración e Impulsión del Biogás*, donde se encuentran los siguientes elementos:
  1. Separador de condensados
  2. Turboaspirador
  3. Antorcha de incineración



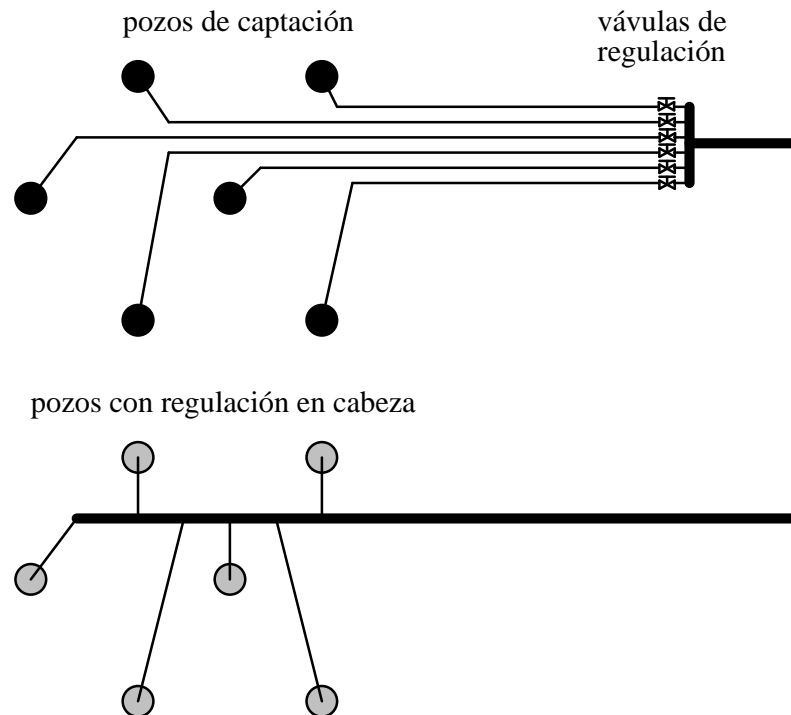
**Fig. 75** . Esquema general de un sistema de recuperación de biogás

#### 6.1.1. Red de Captación de Biogás

Formada por los pozos de captación y las líneas de conducción. Los diferentes diseños de pozos para la extracción del biogás han sido estudiados en el Apartado 4.1. Las conducciones de biogás deben enviar el biogás generado en cada pozo hasta la Estación de Control. Existen dos posibilidades de diseño, como muestra la Figura 76. La primera es que cada pozo esté conectado a una sola línea de conducción. La segunda es que varios pozos se conecten a un mismo colector general en el vertedero.

El primer sistema supone la instalación en el vertedero de tantas líneas de conducción como pozos existan, con el consiguiente aumento de costos de instalación y, en el caso de vertederos en explotación, las molestias derivadas para el paso de camiones entre estas líneas que, hay que tener en cuenta, deben ser desmontadas y vueltas a montar cada vez que se realice un nuevo vertido.

En el segundo caso, se instala un sólo colector central, con ramificaciones hasta los pozos. El manejo de un colector de gran diámetro tampoco es sencillo, incluso puede ser más delicado por su mayor fragilidad. Pero, además, la conexión de varios pozos a un colector en el vertedero hace necesario trasladar las válvulas de regulación desde la Estación de Control hasta los pozos, para poder garantizar una depresión de extracción de biogás óptima en cada uno. Esto imposibilita la automatización de las válvulas de regulación y dificulta la aplicación de sistemas manuales de regulación, al obligar al operario a desplazarse hasta el vertedero para aplicar el plan de regulación manual, con la consiguiente pérdida de tiempo. Finalmente, la depresión en el colector general es mucho mayor cuando la regulación se realiza en cabeza del pozo, pues es en la válvula donde se produce la pérdida de carga. Por el riesgo de entrada de aire, deberán sobredimensionarse los sistemas de purga de agua y prestar mayor atención a los empalmes de las tuberías.

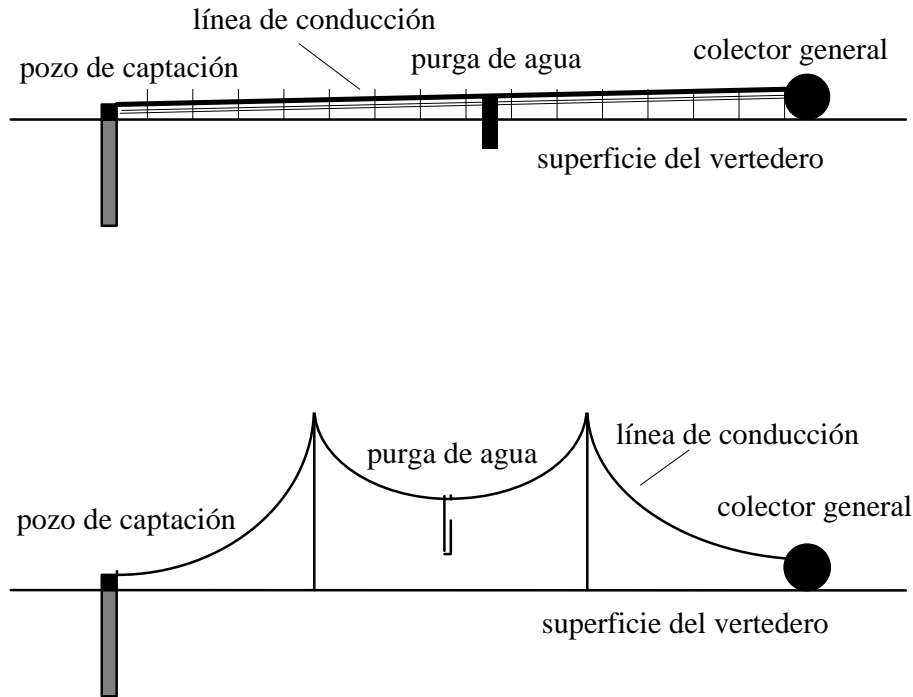


**Fig. 76.** Conexión de los pozos a las líneas de conducción: (a) líneas individuales hasta la Estación de Control; (b) colector general sobre el vertedero

La forma de tendido de las líneas, en el caso de decidirse la conexión de un pozo por línea, admite dos soluciones, como muestra la Figura 77. Las líneas pueden tenderse en la superficie del vertedero, instalando unos railes metálicos con el objeto de mantener una pendiente constante en toda la línea que prevenga su obstrucción por acumulación de condensados. Pero también es posible tender la línea por el aire, sobre postes, instalando purgas automáticas de agua en los puntos bajos de las catenarias. Naturalmente, este segundo sistema sólo es posible cuando las líneas tienen un diámetro pequeño, debido a que, al estar fabricadas generalmente en polietileno de alta densidad (PEAD), sus propiedades elásticas son limitadas.

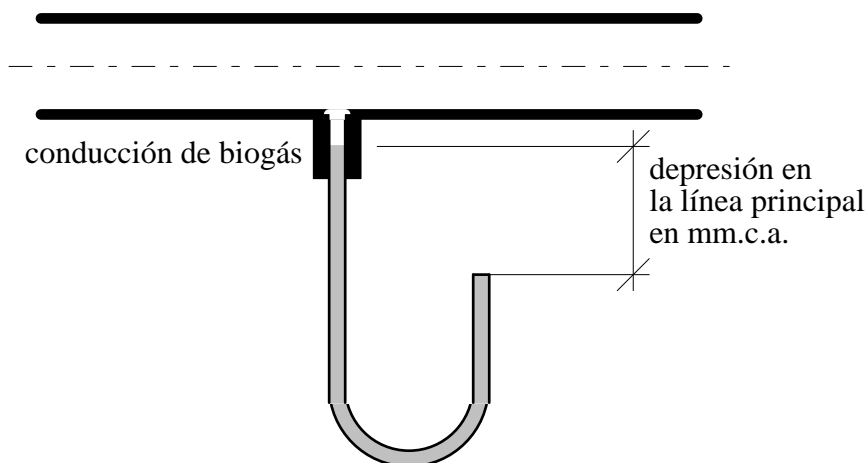
El primer caso presenta desventajas tales como no permitir la circulación normal de vehículos dentro del vertedero; una mayor dificultad de montaje/desmontaje en zonas en explotación; y la necesidad de un mantenimiento periódico más estricto, debido a su mayor sensibilidad ante asentamientos diferenciales de la superficie del vertedero.

El sistema de tendido aéreo de las líneas es en este sentido ventajoso. Está limitado a conducciones de un cierto diámetro. Se recomienda el uso de postes de hormigón o madera, pues el acero podría atraer descargas atmosféricas, actuando a modo de pararrayos.



**Fig. 77.** Tendido de la línea de conducción de biogás : (a) en superficie (b) aéreo

Una vez decidido el diseño de la red de extracción de biogás, sólo resta su correcto dimensionamiento. Para ello se calcularán las pérdidas de carga en cada línea, con un margen amplio para la regulación. La velocidad del biogás en el interior de las líneas no debe ser excesivamente alta, pues puede producirse el arrastre de agua de condensación cuando se superan los 5 m/s aproximadamente. En el caso de purgadores en "U", como el mostrado en la Figura 78, la altura de la columna de agua debe ser calculada en función de la depresión aplicada al conducto general.



**Fig. 78.** Purga automática de condensados

### 6.1.2. Estación de Control de Extracción

Las líneas de conducción del biogás convergen en la Estación de Control de Extracción del Biogás. En esta punto se encuentran los elementos de regulación del sistema: válvulas y equipos de medida.

El objetivo, como ya se ha explicado, es lograr que la depresión aplicada en cada pozo sea la óptima. Con ello, el caudal recuperado por pozo tendrá composición constante en metano. Además, la concentración de oxígeno en el biogás, debida a la entrada de aire, estará dentro de los límites de seguridad.

Para ello se debe disponer de un *equipo de análisis* capaz de determinar periódicamente la composición en metano y oxígeno del biogás recuperado por cada pozo. En función del resultado de cada análisis, el Sistema de Control decide abrir o cerrar la *válvula de regulación del caudal* correspondiente a la línea analizada. El Sistema de Control podrá estar automatizado total o parcialmente, e incluso ser ejecutado de forma manual, como se comentará en el Apartado 6.2.

Las válvulas de regulación pueden estar instaladas en el propio vertedero sobre cada pozo, o bien al final de las líneas de conducción, en la Estación de Control, tal y como se ha visto en el apartado anterior.

Las líneas de extracción de cada pozo convergen, en uno u otro caso, en un colector general. Con objeto de evitar que la modificación en la posición de una válvula altere al resto y evitar también que variaciones de la presión barométrica modifiquen la presión relativa aplicada en todos los pozos, se instala otra válvula de regulación en este colector general. Esta válvula mantiene constante la depresión relativa en el colector general a la salida, en el sentido del caudal, de la Estación de Control. Para ello, es comandada por un regulador mecánico en el que se establece el valor objetivo deseado.

### 6.1.3. Estación de Aspiración e Impulsión del Biogás

La depresión necesaria para la extracción del biogás en la red de captación se genera por medio de **turbinas de aspiración**. En la Estación de Aspiración e Impulsión del Biogás, además de estas turbinas, se encuentran otros elementos necesarios: un **separador de condensados**, para reducir el contenido en humedad del biogás; una **válvula de regulación de la presión**, para mantener constante la sobrepresión a la salida de los turboaspiradores; y una **antorcha**, en la que se incinera el biogás.

Las características fundamentales para la selección de una **turbina de aspiración** son el *caudal nominal*, la *altura de presión* y las *protecciones de seguridad* para el trabajo con fluidos combustibles, además de estar preparado para resistir a la *corrosión* interna debida al biogás.



Como característica de calidad, el turboaspirador debe poseer una *gráfica caudal/presión lo más plana posible*, para garantizar una regulación fina del caudal por medio de las válvulas de línea. En el caso de ampliarse la capacidad de la planta, se instala en paralelo otra turbina del mismo tipo, consiguiendo así una curva característica del conjunto aún más plana.

La **antorcha** incinera el caudal total de biogás mientras no exista un sistema de aprovechamiento energético. Cuando se instale algún tipo de sistema de aprovechamiento del biogás, la antorcha incinerará los excedentes de biogás, a fin de que el suministro sea perfectamente constante en caudal.

Los requisitos básicos para la selección de una antorcha son la capacidad de trabajar tanto a caudal máximo en solitario como a caudales muy bajos cuando esté funcionando un equipo de aprovechamiento y la de admitir amplias fluctuaciones en la composición de gas, de 20 a 55 % de metano en volumen, aunque estas no se producirán en condiciones de trabajo normales.

La antorcha debe estar dotada de sensores de llama para prevenir apagados accidentales de la misma. La antorcha también debe incluir sistemas de seguridad para prevenir retrocesos de llama. Todos los accionamientos, sensores y cuadros eléctricos deben cumplir normas antideflagrantes.

Como característica de calidad la combustión debe ser eficaz, desapareciendo los malos olores del biogás y evitándose la emisión de compuestos contaminantes al medio ambiente (Eden, 1991; Eden, 1992). Para ello se debe alcanzar una temperatura de llama y un tiempo de retención alto. Tiempos superiores a 0,3 segundos con temperaturas de llama de 1200 °C evitan la formación de dioxinas a partir de los hidrocarburos clorados y fluorados contenidos en el biogás (Held y Cornet, 1995).

## 6.2 Regulación de la extracción del biogás

El control de la extracción de biogás pretende suministrar biogás, en caudal y composición constantes, a un equipo de aprovechamiento energético. Este objetivo supone:

1. Lograr que cada pozo suministre un caudal de biogás de composición constante en metano, es decir, de poder calorífico constante.
2. Incinerar los excedentes del caudal extraído en una antorcha

Cuando no existe sistema de aprovechamiento energético o está desconectado, todo el caudal se incinera en la antorcha.

La incineración de los excedentes de biogás en la antorcha no supone ningún problema técnico. El colector general de suministro de biogás se bifurca antes de llegar a los equipos de revalorización, enviando parte del caudal de biogás hacia la antorcha. Una válvula de regulación anterior a la antorcha decide qué caudal se debe incinerar, en función de la presión de suministro a los equipos de revalorización. Así, un incremento en la presión de suministro implica un exceso de caudal, por lo que la válvula abre y aumenta el caudal incinerado.

Lograr que cada pozo suministre un caudal de biogás de composición constante en metano sí supone un mayor problema, como se explica a continuación.

### 6.2.1. Definición de las variabes de control

La mayor parte de los conceptos que se desarrollan a continuación han sido introducidos anteriormente, especialmente al explicar el Ensayo Biogás/Gas de Vertedero en el Apartado 2.4.4.1 y el Modelo de Captación de Biogás en el Apartado 4.4.

De forma resumida, para extraer el biogás es necesario aplicar una depresión en el pozo, que provoca inevitablemente la entrada de aire. Para regular el sistema se debe tener un control sobre la depresión aplicada en cada pozo. Es necesario distinguir entonces entre la composición del gas que se genera en el vertedero, sin oxígeno, que se ha denominado **Gas de Vertedero** y la del gas recuperado, con oxígeno, que se ha denominado **Biogás**.

El contenido en metano del *Gas de Vertedero* se denomina **Riqueza en Metano** y es un valor prácticamente constante en el vertedero. Debe determinarse en un estudio previo a la implementación del sistema de extracción, como se explicó en el Capítulo 5.

Se denomina **Valor Objetivo de Metano** a la concentración de metano que se ha decidido debe tener el *Biogás* extraído. El *Valor Objetivo de Metano* es siempre inferior a la *Riqueza en Metano*, debido a la entrada de aire. Es, como su nombre indica, la variable objetivo del sistema de regulación.

La elección del Valor Objetivo de Metano debe sopesar distintos intereses. El uso energético previsto para el Biogás determina un límite inferior del Valor Objetivo de Metano, por debajo del cual el gas ya no es interesante desde el punto de vista económico, al ser excesivamente bajo su Poder Calorífico Inferior (PCI). Adoptar un Valor Objetivo próximo a la Riqueza en Metano del vertedero tiene las siguientes consecuencias:

1. Incrementa el poder calorífico del Biogás
2. Aumenta el número de pozos necesarios, pues disminuye el caudal de Biogás extraído por pozo, al tener que disminuir la depresión aplicada para evitar la entrada de aire
3. Disminuye la garantía de suministro del sistema de regulación, pues el margen de maniobra es menor ante eventuales caídas en el contenido en metano del Gas de Vertedero
4. Disminuye el consumo de energía de los turboaspiradores, que trasiegan un caudal menor de Biogás (aunque el mismo de metano)

La presencia de oxígeno en el Biogás acarrea dos problemas: de una parte, frena la reacción anaerobia, cesando la generación de metano y, de otra parte, si su concentración supera el 10% en volumen, puede dar lugar a mezclas explosivas. Esta segunda condición es más limitativa. Los caudales de oxígeno que se introducen en el vertedero al aspirar el biogás son bajos, no penetran en profundidad en el vertedero y, por ello, no modifican el ritmo de generación del gas.

Por ello se define el **Valor Límite de Oxígeno** como la máxima concentración admisible de oxígeno en el Biogás recuperado que prevenga la formación de mezclas explosivas.

Finalmente, es necesario definir la **periodicidad de las acciones correctoras**. Esta depende de las fluctuaciones del contenido en metano con el tiempo cuando el pozo es sometido a una depresión relativa constante. Según estudios realizados en el vertedero de La Zoreda, es posible representar los resultados experimentales obtenidos en esas condiciones mediante funciones periódicas de período 32 días, con un error menor del 1% (Sastre *et al.*, 1997b).

#### 6.2.2. Tipos de sistemas de control

Para conseguir mantener la concentración de metano en su Valor Objetivo de Metano, todos los sistemas de control regulan la depresión en boca del pozo actuando sobre una válvula de regulación (pérdida de carga variable) en la línea. El exceso o defecto en metano respecto al valor objetivo decide si se debe abrir la válvula o cerrarla. De forma sintética:

##### (a) **Contenido en metano Biogás > Valor Objetivo de Metano**

El sistema de regulación ordena la *apertura de la válvula de regulación*, de forma proporcional a la diferencia entre ambos valores. Teóricamente, tendremos una mayor depresión en el pozo, con lo que aumentará el caudal de aire y bajará el contenido relativo de metano.

**(b) Contenido en metano Biogás < Valor Objetivo de Metano**

El sistema de regulación ordena el *cierre de la válvula de regulación*, de forma proporcional a la diferencia entre ambos valores. Previsiblemente aumentará la concentración en metano y bajará la de oxígeno.

Para que estas acciones de regulación tengan efecto es necesario que ninguna otra variable, fuera del contenido en metano, modifique el valor de la presión en los pozos. En especial, es necesario prevenir el efecto de fluctuaciones en la presión barométrica. Por ello, se instalará una válvula de regulación en la aspiración de las turbinas, dotada de un regulador mecánico, el cuál debe mantener la presión *relativa* de aspiración de todo el sistema constante e igual a una señal de consigna.

El contenido en oxígeno sólo se mide por seguridad, de forma continua, fijándose el Límite de Oxígeno en el 10% en volumen. Alcanzado este valor, la línea debe ser cerrada.

Las diferencias entre los distintos sistemas de control se encuentran en:

- La posición de las válvulas de regulación en la red
- La periodicidad y alcance de las acciones de control sobre ellas
- La automatización de todas/algunas/ninguna de estas válvulas

Estas diferencias se condicionan entre sí. Habitualmente existe una regulación individual en cada pozo de extracción y una regulación en el colector general. Cuando el colector general desciende hasta el vertedero, la válvula de regulación individual de cada pozo debe estar sobre la misma chimenea de captación, por lo que no es automatizable. Ello supone que las acciones correctoras sobre el pozo van a tener una periodicidad amplia (entre 1 semana y 1 mes). Por ello, es habitual que se actúe con menor periodicidad (cada varias horas o diariamente) sobre la válvula del colector general. Esta válvula puede ser automatizada o no, con lo que el sistema sería semiautomático ó manual.

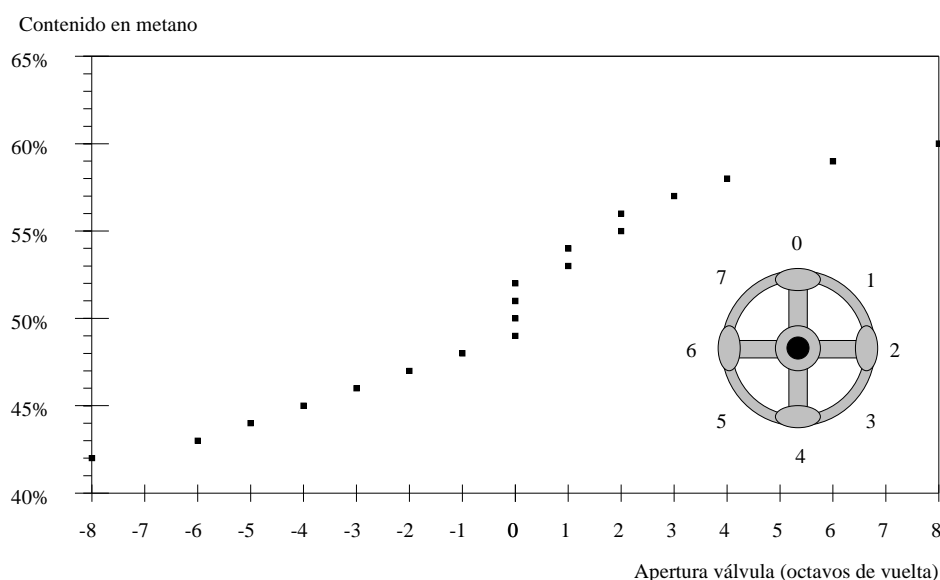
Cuando cada pozo es conectado a una única línea de conducción, las válvulas de regulación individual por pozo se instalan al final de estas líneas, en la Estación de Control. Si se decide su automatización, se tendrá un sistemas totalmente automático. En este caso no es necesaria otra válvula en el colector general.

**6.2.3. Definición de un plan de control manual**

Como parte de este trabajo, se ha definido un Plan de Control Manual para su aplicación en las instalaciones del vertedero de La Zoreda.

La red de captación existente es del tipo un pozo por línea, con válvulas de regulación en cada línea. El sistema está dividido en varios módulos o casetas de extracción, todas ellas automatizadas excepto una, para la cual fue desarrollado este Plan de Control Manual. Existe una válvula en cada colector de salida de estas casetas para mantener constante la presión de aspiración.

El alcance de las acciones correctoras (cuanto hay que abrir o cerrar la válvula de regulación en función del contenido en metano medido) depende del modelo de válvula de regulación existente y de su forma de accionamiento. Como resultado de las experiencias realizadas en La Zoreda, se ha llegado a la definición de la Figura 79. El Valor Objetivo de Metano se ha fijado en un 49% vol., mientras que el Límite de Oxígeno en un 10%.



**Fig. 79.** Gráfica de regulación del Método de Control Manual de Extracción de Biogás

El método se sintetiza en los siguientes criterios:

- Los controles de regulación se realizan una vez a la semana, preferiblemente siempre a la misma hora del día para una misma línea. Se mide y registra el contenido en metano de la línea. La válvula se mueve tantos puntos o cuartos de vuelta como ordene la gráfica de regulación, registrándose su nueva posición.
- Se recomienda un control al menos diario del contenido en oxígeno en las conducciones generales. Valores superiores al 10% indican un fallo en la red por entrada de aire, y obligan a la desconexión de la caseta por motivos de seguridad.
- Para abrir una línea (de nueva conexión o desconectada por un fallo), primero se analizará el contenido en metano del gas. Mientras se encuentre por encima del valor máximo indicado en la gráfica de control, la válvula se moverá de 20 en 20 unidades sobre 100, esperando entre cada análisis un día. En el momento en que el metano esté dentro de los límites recogidos en la gráfica, se procederá según el método normal (análisis semanales)

#### 6.2.4. Aplicación del Plan de Control Manual y discusión de resultados

Con objeto de comprobar la validez del Método de Control de Manual de Extracción propuesto, se ha realizado un ensayo de más de tres meses de duración (Marzo - Junio de 1994) en el vertedero de La Zoreda (Martín *et al.*, 1994b; Martín *et al.*, 1995b; Martín, 1995c; Martín *et al.*, 1997b).

Se han aprovechado las instalaciones automáticas de extracción del biogás de este vertedero, que permiten el registro periódico de la composición del biogás en cada una de las 60 líneas conectadas al sistema.

Se han escogido dos pozos para realizar el ensayo. Las válvulas de regulación han sido desconectadas del sistema de control automático, para pasar a ser controladas manualmente.

Las tareas realizadas han sido las siguientes:

- Se han registrado los datos de composición de biogás, concentración de metano y oxígeno, con una periodicidad de alrededor de 10 horas, por medio del ordenador.
- Cada 7 días, y durante los tres meses y medio que ha durado el ensayo, se ha registrado la temperatura del gas en cada pozo y la presión, tanto en el vertedero como en la caseta de regulación (antes de la válvula de regulación en el sentido del flujo)
- Cada 7 días, en función de la lectura de contenido en metano del gas, se ha modificado la posición de la válvula de regulación, de acuerdo con la Gráfica de Control

Los resultados obtenidos se muestran en las Tablas 55, 56 y 57, así como en las Figuras 80 y 81. De especial interés son las Figuras 82 y 83, que muestran la dispersión de resultados en torno al valor objetivo de metano, fijado en un 50 % vol.

Los resultados obtenidos por un método *automático* de regulación, con una periodicidad entre acciones correctoras de tan sólo unas 10 horas, no son sustancialmente superiores, como se deduce de la interpretación de las Figuras 84 y 85. Estas figuras han sido obtenidas reincorporando ambos pozos al control del sistema automático durante un período de 1 mes de duración.

Cabe añadir que las medidas más alejadas y por encima del valor objetivo se pueden atribuir a fallos en el sistema de aspiración, que provocan una falta de presión negativa y, por ello, un enriquecimiento del biogás en metano por encima de lo deseable. Es de suponer, además, que al trabajar con varias líneas a la vez en una aplicación real del método, el intervalo de fluctuación se reducirá, pues los picos de una sola línea quedarán amortiguados en la conducción general.

La empresa COGERSA, S.A. está aplicando en la actualidad este método para el suministro de biogás a una Planta de Aprovechamiento de Subproductos Cárnicos en el vertedero de La Zoreda, con un consumo de aproximadamente 1000 m<sup>3</sup>N/h. Un desarrollo del método de control manual, ha sido también adoptado para la próxima ampliación de la red de captación de biogás en este vertedero, que tendrá una capacidad de 4000 m<sup>3</sup>N/h.

**Tabla 55.** Control Manual. Temperaturas y presiones pozo A4 (La Zoreda)

Día	Hora	Temperatura en el pozo °C	Temperatura ambiente °C	Presión caseta mm.c.a.	Presión pozo mm.c.a.
17/03/94	9:30	38,1	13	-25	-10
21/03/94	9:40	37,1	12,7	-20	-8
28/03/94	9:35	40,6	17	-10 a -20	-4,5
11/04/94	16:00	36	17	-20	-10
25/04/94	10:45	35,4	14,5	-30	-11
3/05/94	9:45	38,4	14,8	-30 a -40	-13
10/05/94	9:25	38,3	15,5	-30	-9
16/05/94	9:23	39	15	-30	-12,5
23/05/94	9:23	38,5	16	-25	-11
30/05/94	9:30	39,7	16	-30	-11
6/06/94	9:30	40,5	18	-20	-6,5
13/06/94	9:35	40	20	-20	-6,5
20/06/94	9:50	40,9	19,9	-20	-6,5

**Tabla 56.** Control Manual. Temperaturas y presiones pozo A10 (La Zoreda)

Día	Hora	Temperatura en el pozo °C	Temperatura ambiente °C	Presión caseta mm.c.a.	Presión pozo mm.c.a.
17/03/94	9:30	33,1	13	-210	-4
21/03/94	9:40	27,5	12,7	-230	-6
28/03/94	9:35	32,5	17	-200	-2,5
11/04/94	16:00	29,4	17	-165	-1,5
25/04/94	10:45	32,9	14,5	-185	-3
3/05/94	9:45	33,8	14,8	-230	-5
10/05/94	9:25	34,2	15,5	-175	-3,5
16/05/94	9:23	30	15	-140	-3
23/05/94	9:23	34	16	-125	-2
30/05/94	9:30	34	16	-170	-4
6/06/94	9:30	36,2	18	-130	-2
13/06/94	9:35	35	20	-110	-2
20/06/94	9:50	35,7	19,9	-105	-2

**Tabla 57.** Control Manual. Contenidos en metano y oxígeno, posición de la válvula de regulación y acciones correctoras

FECHA	A4 VALV	A4 %CH <sub>4</sub>	A4 %O <sub>2</sub>	A10 VALV	A10 %CH <sub>4</sub>	A10 %O <sub>2</sub>	CONTROL
17-Mar	44	47	3	73	48	3	*****
17-Mar	44	48	3	73	50	3	
18-Mar	44	49	2	73	47	3	
18-Mar	44	50	2	73	47	4	
18-Mar	44	49	2	73	47	3	
19-Mar	44	49	2	73	47	3	
19-Mar	44	50	2	73	47	3	
20-Mar	44	49	2	73	47	4	
20-Mar	44	49	2	73	46	4	
20-Mar	44	48	2	73	45	4	
21-Mar	44	48	2	73	44	4	
21-Mar	44	49	2	70	45	4	*****
22-Mar	44	49	2	70	47	3	
22-Mar	44	50	2	70	46	4	
23-Mar	44	47	3	70	45	4	
23-Mar	44	48	3	70	46	4	
23-Mar	44	48	2	70	49	3	
24-Mar	44	49	2	70	48	3	
24-Mar	44	49	2	70	49	3	
25-Mar	44	47	3	70	46	3	
25-Mar	44	49	2	70	47	4	
25-Mar	44	50	2	70	48	3	
26-Mar	44	49	2	70	47	3	
26-Mar	44	49	2	70	46	3	
27-Mar	44	48	2	70	45	4	
27-Mar	44	49	2	70	45	4	
27-Mar	44	49	2	70	46	3	
28-Mar	44	52	2	70	52	2	
28-Mar	46	48	2	71	45	4	*****
29-Mar	46	47	3	71	46	3	
29-Mar	46	48	2	71	45	4	
30-Mar	46	47	3	71	45	3	
30-Mar	46	52	3	71	45	4	
31-Mar	46	45	3	71	45	3	
31-Mar	46	45	3	71	43	4	
31-Mar	46	47	2	71	48	2	
1-Abr	46	45	3	71	44	4	
1-Abr	46	46	3	71	43	4	
2-Abr	46	48	3	71	44	4	
2-Abr	46	49	2	71	44	5	
2-Abr	46	50	2	71	47	3	
3-Abr	46	51	2	71	49	3	
3-Abr	46	51	2	71	49	3	
4-Abr	46	48	2	71	46	2	
4-Abr	46	48	2	71	47	3	
4-Abr	46	48	2	71	44	4	
5-Abr	46	49	2	71	46	4	
5-Abr	46	51	2	71	49	3	



**Tabla 57.** Control Manual. Contenidos en metano y oxígeno, posición de la válvula de regulación y acciones correctoras (continuación)

FECHA	A4 VALV	A4 %CH <sub>4</sub>	A4 %O <sub>2</sub>	A10 VALV	A10 %CH <sub>4</sub>	A10 %O <sub>2</sub>	CONTROL
6-Abr	46	51	2	71	49	3	
6-Abr	46	49	2	71	48	3	
6-Abr	46	67	0	71	65	0	
7-Abr	46	47	2	71	47	3	
7-Abr	46	49	2	71	49	3	
8-Abr	46	50	2	71	48	3	
8-Abr	46	50	2	71	46	4	
8-Abr	46	49	2	71	47	3	
9-Abr	46	49	2	71	47	3	
9-Abr	46	51	2	71	52	2	
10-Abr	46	53	1	71	55	1	
10-Abr	46	53	1	71	62	0	
11-Abr	46	58	0	71	60	0	
11-Abr	47	52,6	1,9	72	54,4	1,6	*****
12-Abr	47	50	2	72	47	3	
12-Abr	47	51	2	72	48	3	
12-Abr	47	50	2	72	50	2	
13-Abr	47	49	2	72	47	3	
13-Abr	47	51	2	72	49	3	
14-Abr	47	49	2	72	47	3	
14-Abr	47	54	3	72	53	4	
15-Abr	47	53	1	72	53	2	
15-Abr	47	54	1	72	53	2	
16-Abr	47	53	1	72	52	1	
16-Abr	47	54	1	72	53	1	
17-Abr	47	54	1	72	53	1	
17-Abr	47	55	1	72	55	1	
17-Abr	47	54	1	72	54	1	
18-Abr	47	53	1	72	54	1	
18-Abr	49	55,2	1,1	74	55,7	1,1	*****
18-Abr	49	53	1	74	54	1	
19-Abr	49	51	2	74	52	1	
19-Abr	49	51	2	74	50	2	
19-Abr	49	51	2	74	50	2	
20-Abr	49	50	2	74	53	1	
21-Abr	49	50	2	74	49	2	
22-Abr	49	47	2	74	46	3	
22-Abr	49	50	2	74	57	0	
22-Abr	49	47	2	74	46	3	
23-Abr	49	46	2	74	44	3	
25-Abr	49	52,2	0,5	74	51,8	0,8	*****
25-Abr	49	51	2	74	54	1	
26-Abr	49	50	2	74	52	2	
26-Abr	49	50	2	74	52	2	
27-Abr	49	48	3	74	43	5	
27-Abr	49	47	3	74	42	6	

**Tabla 57.** Control Manual. Contenidos en metano y oxígeno, posición de la válvula de regulación y acciones correctoras (continuación)

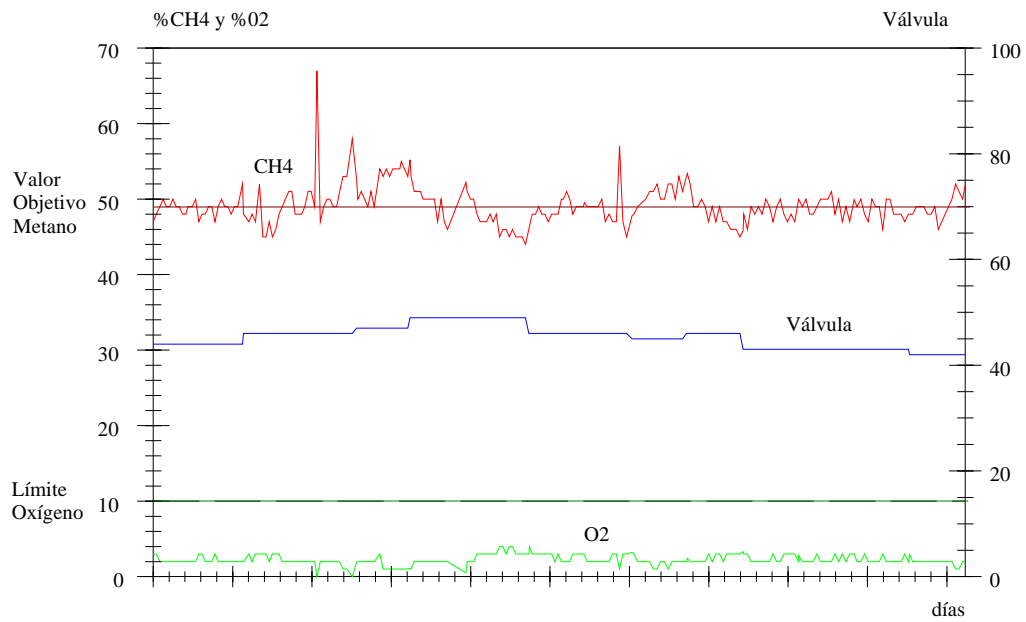
FECHA	A4 VALV	A4 %CH <sub>4</sub>	A4 %O <sub>2</sub>	A10 VALV	A10 %CH <sub>4</sub>	A10 %O <sub>2</sub>	CONTROL
27-Abr	49	47	3	74	44	4	
28-Abr	49	47	3	74	44	4	
28-Abr	49	48	3	74	47	3	
29-Abr	49	47	3	74	48	3	
29-Abr	49	48	3	74	48	3	
29-Abr	49	45	4	74	54	1	
30-Abr	49	46	4	74	50	2	
30-Abr	49	46	3	74	53	1	
1-May	49	45	4	74	51	2	
1-May	49	46	4	74	48	3	
1-May	49	45	3	74	57	0	
2-May	49	45	3	74	49	2	
2-May	49	45	3	74	56	0	
3-May	49	44	3	74	54	0	
3-May	46	46,4	4	68	43,3	5,4	*****
3-May	46	46	3	68	44	5	
4-May	46	48	3	68	45	4	
4-May	46	48	3	68	45	4	
4-May	46	49	3	68	45	4	
5-May	46	48	3	68	45	4	
5-May	46	48	3	68	60	0	
6-May	46	47	3	68	45	4	
6-May	46	48	3	68	45	4	
6-May	46	48	2	68	46	3	
7-May	46	48	3	68	45	4	
7-May	46	50	2	68	47	3	
7-May	46	50	2	68	47	3	
8-May	46	51	2	68	46	4	
8-May	46	50	2	68	48	3	
9-May	46	48	3	68	44	4	
9-May	46	49	3	68	43	5	
9-May	46	49	3	68	44	4	
10-May	46	49,5	2,9	64	46,2	4,2	*****
10-May	46	49	3	64	47	4	
10-May	46	49	2	64	49	2	
11-May	46	49	2	64	47	3	
11-May	46	49	2	64	47	3	
12-May	46	49	2	64	48	3	
12-May	46	50	2	64	49	2	
13-May	46	47	2	64	45	3	
13-May	46	48	2	64	46	3	
14-May	46	47	3	64	43	4	
14-May	46	47	3	64	45	4	
15-May	46	57	1	64	56	1	
15-May	46	47	3	64	49	2	
15-May	46	45	3	64	47	3	
16-May	45	47,8	3,2	64	50,3	2,6	*****

**Tabla 57.** Control Manual. Contenidos en metano y oxígeno, posición de la válvula de regulación y acciones correctoras (continuación)

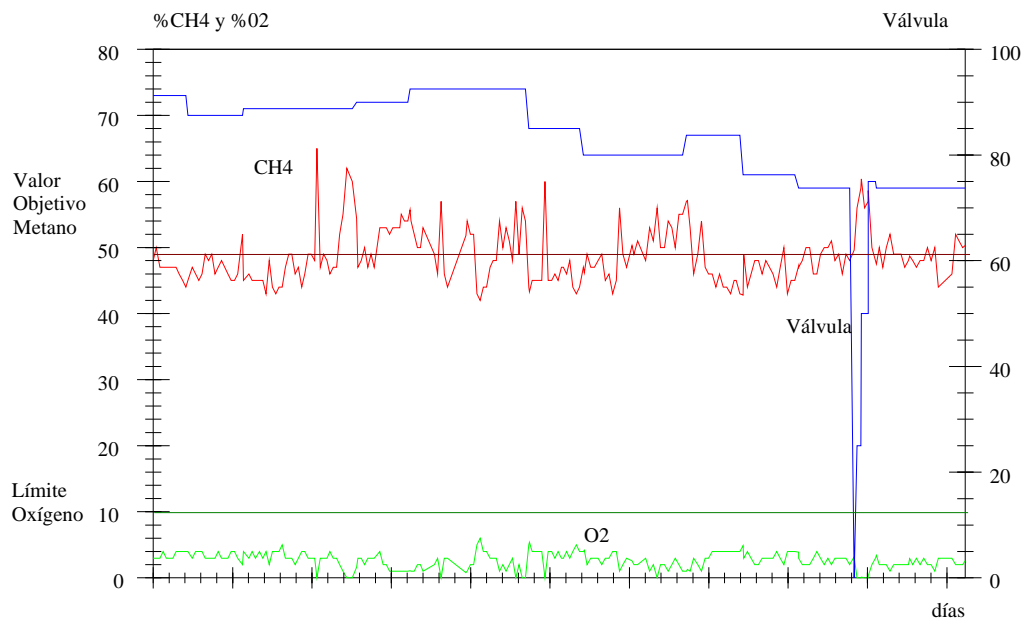
FECHA	A4 VALV	A4 %CH <sub>4</sub>	A4 %O <sub>2</sub>	A10 VALV	A10 %CH <sub>4</sub>	A10 %O <sub>2</sub>	CONTROL
16-May	45	48	3	64	49	2	
17-May	45	49	2	64	51	2	
18-May	45	50	2	64	48	3	
18-May	45	51	2	64	53	1	
19-May	45	51	1	64	51	2	
19-May	45	52	1	64	56	0	
20-May	45	50	2	64	50	2	
20-May	45	50	2	64	50	2	
21-May	45	52	1	64	54	1	
21-May	45	52	2	64	53	2	
22-May	45	50	2	64	50	3	
22-May	45	53	2	64	55	2	
22-May	45	51	2	64	55	1	
23-May	46	53,4	2,4	67	57,1	1,3	*****
23-May	46	53	2	67	57	1	
23-May	46	52	2	67	53	1	
24-May	46	49	2	67	46	3	
24-May	46	49	2	67	49	2	
25-May	46	50	2	67	54	1	
25-May	46	49	2	67	47	3	
26-May	46	47	3	67	46	3	
26-May	46	49	2	67	46	4	
27-May	46	47	3	67	44	4	
27-May	46	49	3	67	46	4	
28-May	46	47	2	67	44	4	
28-May	46	47	3	67	44	4	
29-May	46	46	3	67	43	4	
29-May	46	46	3	67	45	4	
29-May	46	46	3	67	45	4	
30-May	46	45	3	67	43	4	
30-May	43	45,8	3,3	61	42,8	4,9	*****
30-May	43	48	3	61	49	3	
31-May	43	46	3	61	44	4	
31-May	43	49	2	61	46	3	
1-Jun	43	48	2	61	48	2	
1-Jun	43	49	2	61	48	2	
1-Jun	43	48	2	61	46	3	
2-Jun	43	50	2	61	48	3	
2-Jun	43	49	2	61	47	3	
3-Jun	43	47	3	61	46	3	
3-Jun	43	49	2	61	44	4	
4-Jun	43	50	2	61	47	3	
4-Jun	43	48	3	61	50	2	
5-Jun	43	47	3	61	43	4	
5-Jun	43	48	3	61	45	4	
6-Jun	43	47	3	61	45	4	
6-Jun	43	50	2,8	59	47,2	3,9	*****

**Tabla 57.** Control Manual. Contenidos en metano y oxígeno, posición de la válvula de regulación y acciones correctoras (continuación)

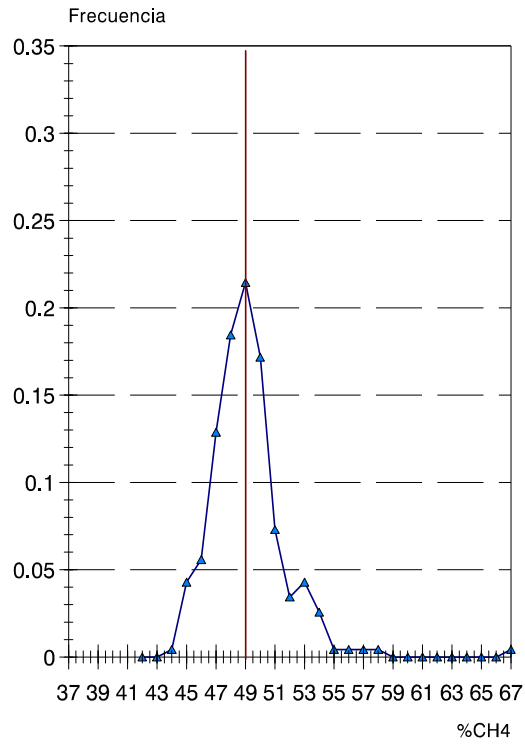
FECHA	A4 VALV	A4 %CH <sub>4</sub>	A4 %O <sub>2</sub>	A10 VALV	A10 %CH <sub>4</sub>	A10 %O <sub>2</sub>	CONTROL
6-Jun	43	50	2	59	47	3	
7-Jun	43	49	2	59	48	2	
7-Jun	43	50	2	59	50	2	
7-Jun	43	48	2	59	50	2	
8-Jun	43	48	2	59	46	3	
8-Jun	43	49	3	59	46	4	
9-Jun	43	50	2	59	49	3	
9-Jun	43	50	2	59	50	2	
10-Jun	43	50	2	59	50	3	
10-Jun	43	51	2	59	51	2	
11-Jun	43	48	3	59	48	3	
11-Jun	43	50	2	59	49	3	
12-Jun	43	47	3	59	46	3	
12-Jun	43	49	2	59	49	3	
13-Jun	43	47	3	59	48	2	
13-Jun	43	49,9	3	0	49,6	3,2	*****
13-Jun	43	49	2	20	56	0	
14-Jun	43	50	2	20	59	0	
14-Jun				40	60,4	0,1	*****
14-Jun	43	48	3	40	56	0	
15-Jun	43	47	2	40	57	0	
15-Jun				60	58,6	0,3	*****
15-Jun	43	50	2	60	50	2	
16-Jun	43	49	2	60	48	3	
16-Jun				59	47,5	3,4	*****
16-Jun	43	49	2	59	50	2	
17-Jun	43	46	3	59	47	2	
17-Jun	43	50	2	59	50	2	
18-Jun	43	50	2	59	52	1	
18-Jun	43	48	2	59	49	2	
19-Jun	43	48	2	59	49	2	
19-Jun	43	48	2	59	49	2	
19-Jun	43	47	3	59	47	2	
20-Jun	43	48	2	59	48	2	
20-Jun	42	48	2,9	59	48,7	2,9	*****
20-Jun	42	48	2	59	48	2	
21-Jun	42	49	2	59	47	3	
21-Jun	42	49	2	59	48	2	
22-Jun	42	49	2	59	48	3	
22-Jun	42	48	2	59	50	2	
23-Jun	42	48	2	59	48	2	
23-Jun	42	49	2	59	50	1	
24-Jun	42	46	2	59	44	3	
25-Jun	42	50	2	59	46	3	
26-Jun	42	52	1	59	52	2	
26-Jun	42	51	1	59	51	2	
27-Jun	42	50	2	59	50	2	
27-Jun	42	51,9	2,1	59	50,3	2,6	*****



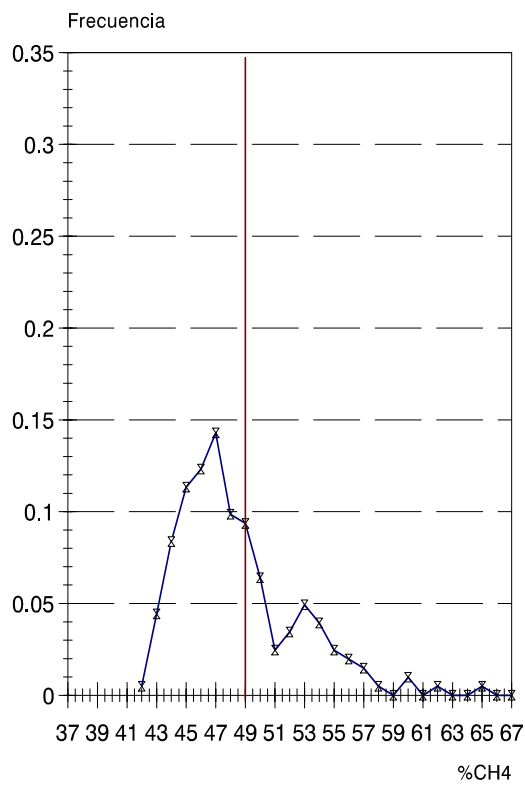
**Fig. 80.** Ensayo de Control Manual, pozo A4 (del 17/3/94 al 27/6/94)



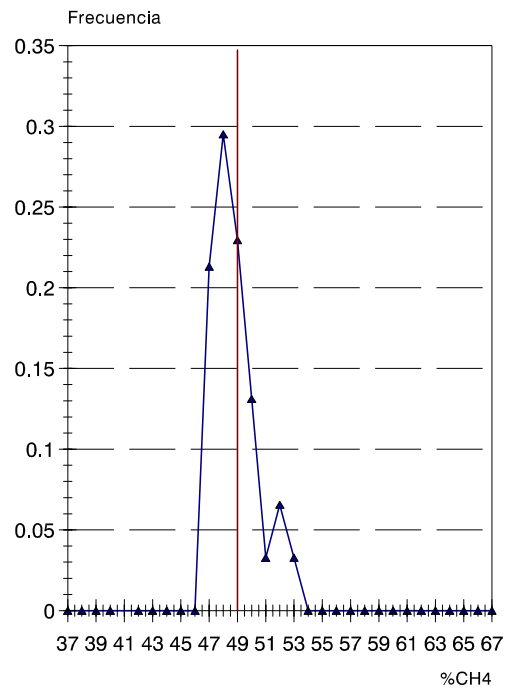
**Fig. 81.** Ensayo de Control Manual, pozo A10 (del 17/3/94 al 27/6/94)



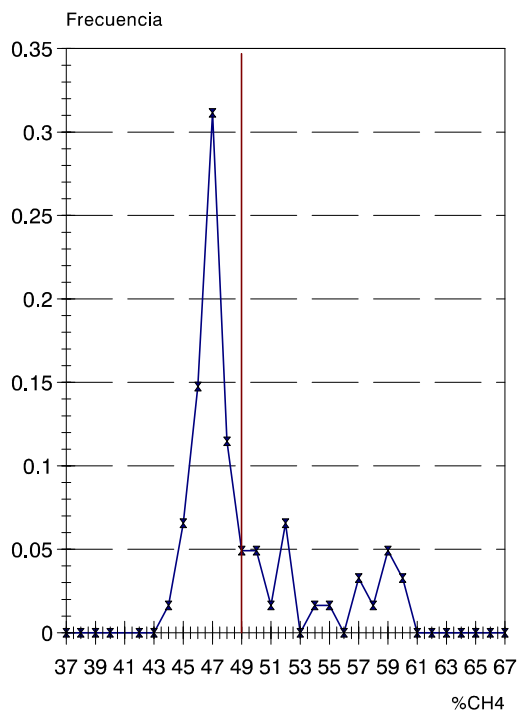
**Fig. 82.** Dispersión de resultados bajo control manual, pozo A4



**Fig. 83.** Dispersión de resultados bajo control manual, pozo A10



**Fig. 84.** Dispersión de resultados bajo control automático, pozo A4



**Fig. 85.** Dispersión de resultados bajo control automático, pozo A10

## **7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS**

---



## 7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

### 7.1. Conclusiones

1. Es notable la carencia, especialmente dentro del ámbito empresarial, de documentación rigurosa en castellano sobre la generación de biogás en vertederos controlados de RSU. En este sentido, este trabajo aporta una visión profunda del estado actual de la investigación y de la tecnología sobre el gas de vertedero. No sólo se apoya en numerosa bibliografía científica, sino también en la experiencia propia derivada de los trabajos en los vertederos de La Zoreda y Bratovo principalmente. Ello ha permitido reunir una serie de conceptos sobre la *generación y recuperación* del biogás. En esta labor se han introducido aportaciones propias en forma de nuevas o más precisas definiciones, sacando a la luz las relaciones que existen entre distintos aspectos de la generación y recuperación del biogás. Así tenemos que:
  - 1.1. Se han clasificado los **impactos ambientales** derivados de la generación del biogás, demostrando que la emisión de gases en un vertedero constituye un problema tanto desde el punto de vista del *Medio Ambiente global* como desde el punto de vista de la *Seguridad e Higiene* de trabajadores y población vecina al vertedero.
  - 1.2. Se han definido los vínculos existentes entre la generación de biogás en el vertedero y la generación de **lixiviados**.
  - 1.3. Se han clasificado los **factores que influyen en el vertedero**, distinguiendo entre *factores ambientales, composición y cantidad de residuos depositados, diseño del vertedero y tratamiento de los residuos*. La definición de estos factores y del efecto que tienen sobre la metanogénesis, así como de las relaciones que existen entre ellos, es de suma utilidad para la correcta operación del vertedero.
  - 1.4. Se ha introducido de forma clara la diferencia entre los conceptos de **generación y recuperación** del gas. Esta diferencia permite, por ejemplo, la correcta interpretación de los factores que intervienen en la metanogénesis. También permite interpretar los análisis de composición del biogás, al establecer la diferencia entre el gas generado, que se ha denominado **Gas de Vertedero**, y el gas recuperado, que se ha denominado **Biogás**.
  - 1.5. También se ha distinguido entre los conceptos de **composición, volumen y caudal de gas**. Ello permite, por ejemplo, que al analizar los factores que intervienen sobre el vertedero, se descubra que unos modifican la *composición* del biogás recuperado sin alterar el *caudal* de gas generado en el vertedero, o que otros aceleran la metanogénesis, aumentando el *caudal* de biogás recuperado sin alterar el *volumen* final acumulado de biogás que se puede generar en el vertedero.
2. Otra carencia detectada y que este trabajo pretende contribuir a paliar, es la escasez de *métodos experimentales* que permitan, de una parte, el conocimiento del funcionamiento interno del vertedero, la definición de variables y su modelización y, de otra parte, la comparación entre distintos vertederos. Se han propuesto una

serie de **ensayos** en este trabajo, en su mayoría originales, cuyas características se resumen a continuación:

- 2.1. El **Ensayo Biogás/Gas de Vertedero**, que permite la correcta interpretación de los análisis del biogás. Establece, por su distinción implícita entre los conceptos de generación y recuperación, una de las claves de entendimiento del proceso de recuperación del biogás.
  - 2.2. El **Ensayo Presión/Tiempo**, quizás el más sencillo y sin embargo uno de los más útiles. Introduce la variable *presión* en el estudio de las captaciones de biogás. Desde el punto de vista práctico, permite comparar la capacidad de generación de biogás de dos pozos. Desde el punto de vista teórico, adelanta conceptos del modelo de captación de biogás.
  - 2.3. El **Ensayo Caudal Aire/Caudal Gas**, que permite deducir el caudal recuperable de biogás en un pozo. Es un instrumento útil para la comparación entre pozos de un mismo vertedero y para la comparación entre vertederos distintos. También permite medir el rendimiento de distintos diseños de sondas de captación de biogás y de la influencia en estas de los distintos materiales utilizados en el recubrimiento de los residuos.
  - 2.4. El **Ensayo de Régimen Permanente**, que da una medida de la estabilidad de la metanogénesis en el vertedero. Es necesario debido a que los anteriores ensayos han sido diseñados para su realización en pocos minutos o, a lo sumo, horas y, por tanto, no reflejan en sus resultados posibles inercias en la evolución de las variables.
  - 2.5. El **Ensayo de Emisiones Superficiales**, cuyos resultados permiten conocer el *Radio de Influencia* óptimo de un pozo para el diseño de la red de captación. También permite detectar de forma sencilla las zonas de fuga de biogás.
- 3 Los vertederos han comenzado a ser objeto de estudio científico sólo en fechas relativamente recientes, por lo que la modelización de los fenómenos que tienen lugar en su interior es aún muy deficiente. En este trabajo también se realizan aportaciones para corregir esta deficiencia. Utilizando los resultados de estos ensayos y leyes fundamentales de la Física, se han definido varios **modelos** sobre los siguientes temas:
- 3.1. Un modelo sobre la **generación anual del biogás en un vertedero controlado** a partir de los datos de composición de los residuos, cantidades vertidas anualmente y precipitaciones, que permite predecir la producción de biogás a lo largo de la vida del vertedero y después de su clausura. Este modelo es útil, por ejemplo, para conocer, en una primera aproximación, cuál es el caudal recuperable de biogás en un vertedero y decidir, de acuerdo con ello, la viabilidad de un aprovechamiento energético del mismo.
  - 3.2. Un modelo sobre la **generación mensual de biogás en cada celda de un vertedero controlado**, a partir de los mismos datos particularizados para cada zona o celda de vertido, que permite calcular las fluctuaciones en la producción de biogás debidas a las operaciones normales de vertido. Esta información es útil, por ejemplo, a la hora de coordinar los trabajos de vertido de RSU con los de recuperación del gas.

- 3.3. Un modelo sobre la **migración del biogás en el interior del vertedero**, si bien complejo en su planteamiento y resolución, basado en consideraciones físicas sencillas. Este modelo introduce el concepto de **Zona de Influencia**, útil en el diseño de redes de captación de biogás; ratifica los presupuestos del Ensayo Biogás/Gas de Vertedero sobre la entrada de aire al vertedero; anticipa teóricamente el *método de control de la extracción del biogás*; y permite la comprensión de los fenómenos de **migración lateral** del biogás.
- 3.4. Un modelo sobre la **captación del biogás en un pozo**, a partir de un circuito hidráulico sencillo y didáctico, que se ajusta perfectamente a los fenómenos observados en las captaciones de biogás e introduce definitivamente los conceptos utilizados en la definición del método de control de extracción del biogás. Este modelo, a diferencia del modelo de migración del biogás, permite el estudio de *fenómenos transitorios*.
- 4 El desconocimiento de los problemas ambientales derivados de la generación de biogás en un vertedero, así como de las posibilidades de revalorización del biogás, son una de las causas del escaso número de vertederos en que el biogás es tratado adecuadamente. La falta de estudios rigurosos para el correcto dimensionamiento de plantas de extracción y revalorización del biogás ha propiciado en algunos casos el fracaso de un proyecto. En este trabajo contribuye a la solución de estos problemas proponiendo una **metodología para la determinación de la producción de biogás en un vertedero**, que combina modelos matemáticos, criterios de estudio y ensayos de campo. Ha sido aplicada en el vertedero búlgaro de Bratovo (Burgas).
- 5 Finalmente, la tecnología utilizada para el control de la extracción de biogás puede ser revisada, de forma que su grado de automatización sea el adecuado al tamaño del vertedero y al tipo de uso que se va a dar al biogás. En este trabajo se ha definido y ensayado un **sistema de control manual de extracción de biogás**. Este sistema es adecuado para el control de *pequeñas redes de extracción y aprovechamiento de biogás* o para el control de *redes de desgasificación sin revalorización energética*. Actualmente es utilizado para el control de extracción de biogás en la Planta de Aprovechamiento de Subproductos Cárnicos del vertedero de La Zoreda. Un desarrollo de este mismo método ha sido adoptado para la inminente ampliación de la red de captación de biogás en este mismo vertedero.

## 7.2. Posibles desarrollos futuros de la investigación

Dentro de los aspectos desarrollados en este trabajo, el que plantea más posibilidades de desarrollo es, a nuestro juicio, el modelo matemático sobre migración del biogás. La resolución numérica de este modelo puede ser aún mejorada, permitiendo el cálculo, con ordenadores más potentes, de problemas en tres dimensiones y con una nitidez mayor. Ello, acompañado de la realización de ensayos con medición de presiones a distintas profundidades para el perfecto contraste del modelo, permitirá mejorar el diseño de los pozos de biogás, de las redes de extracción, aumentar el conocimiento sobre los riesgos de migraciones laterales, etc.

Relacionados con la tecnología del gas de vertedero, serían de gran utilidad la investigación de nuevos sistemas de incineración del biogás (antorchas), por su repercusión en el medio ambiente, y de nuevos sistemas de depuración del biogás, que aumentarían las posibilidades de uso industrial del mismo.

Desde un punto de vista más general, existen otros trabajos sobre la degradación anaerobia de residuos muy interesantes, como la metanización de residuos orgánicos de alta degradabilidad, la digestión anaerobia de lodos de depuradora o la digestión anaerobia de purines de animales estabulados.

## **8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

## **8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

### **8.1. Actas de Congresos y Seminarios**

“1<sup>eras</sup> Jornadas Técnicas sobre Gestión de Residuos: Tratamiento de Lixiviados y Aprovechamiento de Biogás” Agencia de Medio Ambiente del Principado de Asturias, 1988

"International Conference of Landfill Gas and Anaerobic Digestion of Solid Waste", Chester, Gran Bretaña, 1988

“V Congreso y Exposición Internacional de Residuos Sólidos” ATEGRUS, Madrid, 1992

"Fifth International Landfill Symposium" CISA, Sardinia, Italia, 1995

"Landfill Gas Management" CISA & University of Cagliari, Sardinia, Italia, 1996

"VI Congreso Iberoamericano de Residuos Sólidos" ATEGRUS, Madrid, 1996

"Curso Superior de Diseño de Vertederos" Instituto Tecnológico de Ingeniería Ambiental & CISA, Madrid, 1997

## 8.2. Documentos de Empresas e Instituciones Públicas

BIOARTIGAS “Planta de autogeneración eléctrica eléctrica con biogás. Vertedero de Artigas (Bilbao)” BIOARTIGAS, Bilbao, 1992

CARBIOGAS "Cirmac - BF - Carbiosystem. Upgrading of landfill gas into pseudo-natural gas" CARBIOGAS B.V. JOURE, p/a Gulberg 7, 5674 TE Neunen, The Netherlands, European Commission, Thermie, Final Report EUR 15071 NL/EN, 1994

CETESB “Programa regional OPS/EHP/CEPIS de mejoramiento de los servicios de aseo urbano - Recuperación de gas metano de relleno sanitario” Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), Sao Paulo (Brasil), 1982

ENADIMSA “Reciclaje de residuos sólidos-Valdemingómez” ENADIMSA (Empresa Nacional Adaro de Investigaciones Mineras, S.A.), Madrid, 1982

EPA "Design, Operation and Closure of Municipal Solid Waste Landfills", EPA (United States Environmental Protection Agency), 1994

Mancomunidad de la Comarca de Pamplona “Centro de Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos” Mancomunidad de la Comarca de Pamplona, 1990

Principado de Asturias "La Gestión de los Residuos en Asturias, 1982 - 1993" Cuadernos de Medio Ambiente, Serie Técnica 1, Oviedo, 1994

United Kingdom Department of the Environment "Landfill Gas", Waste Management Paper N° 27, 1994

Universidad de Antioquia “Relleno sanitario El Rosal: Estimación de la producción y drenaje de lixiviados y gases” Centro de Investigaciones Ambientales y de Ingeniería de la Universidad de Antioquia, Medellín (Colombia), 1994

### 8.3. Legislación

#### 8.3.1. Disposiciones relativas a los residuos

Directiva 75/442/CEE del Consejo, de 15 de julio de 1975, relativa a los residuos

Ley 42/1975, de 19 de noviembre de 1975, sobre recogida y tratamiento de los desechos y residuos sólidos urbanos (BOE nº 280, de 21 de noviembre)

Recomendación del Consejo 81/972/CEE, de 3 de diciembre de 1981, relativa a la reutilización del papel usado y a la utilización del papel reciclado

Directiva 86/278/CEE del Consejo, de 12 de junio de 1986, relativa a la protección del medio ambiente y, en particular, de los suelos, en la utilización de lodos de depuradora en agricultura

Real Decreto Legislativo 1163/1986, de 13 de junio de 1986, por el que se modifica la Ley 42/1975, de 19 de noviembre, sobre desechos y residuos sólidos urbanos

Directiva 89/369/CEE del Consejo, de 8 de junio de 1989, relativa a la prevención de la contaminación atmosférica procedente de nuevas instalaciones de incineración de residuos municipales

Directiva 89/429/CEE del Consejo, de 21 de junio de 1989, relativa a la reducción de la contaminación atmosférica procedente de las instalaciones existentes de incineración de residuos municipales

Resolución del Consejo 90/C122/02, de 7 de mayo de 1990, sobre la política en materia de residuos

Real Decreto 1310/1990, de 29 de Octubre de 1990, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario

Directiva 91/156/CEE del Consejo, de 18 de marzo de 1991, por la que se modifica la Directiva 75/442/CEE relativa a los residuos

Decisión 94/3/CEE, de 20 de diciembre de 1993, por la que se establece una lista de residuos de conformidad con la letra a) del artículo 1 de la Directiva 75/442/CEE del Consejo relativa a los residuos

Directiva 94/67/CEE del Consejo, de 16 de diciembre de 1994, relativa a la incineración de residuos peligrosos

Directiva 94/62/CEE del Consejo, de 20 de diciembre de 1994, relativa a envases y residuos de envases



Ley 11/1997, de 24 de abril de 1997, sobre envases y residuos de envases (BOE nº 99, de 25 de abril)

Propuestas de Directiva ../../CE del Consejo de ... relativa al vertido de residuos:

- Propuesta presentada por la Comisión el 22 de mayo de 1991
- Propuesta modificada presentada por la Comisión el 10 de junio de 1993
- Proposición Común (CE) nº4/96 aprobada por el Consejo el 6 de octubre de 1995
- Propuesta presentada por la Comisión el 10 de marzo de 1997

### 8.3.2. Disposiciones energéticas españolas de apoyo a la autogeneración eléctrica

Ley 30 de Diciembre de 1980, número 82/80 (Jefatura de Estado). ENERGÍA. Conservación

Real Decreto 5 de Marzo de 1982, número 872/82 (Presidencia). ENERGÍA. Tramitación de expedientes de solicitud de beneficios establecidos por la Ley de conservación del 30 de Diciembre de 1980

Real Decreto 2 de Abril de 1982, número 907/82 (Ministerio de Industria y Energía). ELECTRICIDAD. Fomento de la autogeneración de energía eléctrica

Orden 7 de Julio de 1982 (Ministerio de Industria y Energía). Establecimiento de normas para la obtención de la condición de autogenerador eléctrico

Orden de 5 de Septiembre de 1985 (Ministerio de Industria y Energía). ELECTRICIDAD. Normas administrativas y técnicas de centrales hidroeléctricas de hasta cinco mil KVA y centrales de autogeneración eléctrica

Real Decreto de 9 de diciembre de 1994, número 2366/94, (Ministerio de Industria y Energía). ELECTRICIDAD. Producción de energía eléctrica por instalaciones hidráulicas, de cogeneración y otras abastecidas por recursos o fuentes de energía renovables

#### 8.4. Artículos y libros

Andersen, T "Soluciones a los problemas de medio ambiente en el lugar de trabajo de recogida y tratamiento de residuos sólidos" 6º Congreso y Exposición Internacional de Residuos Sólidos, Madrid, 1992

Attal, A.; Akunna, J.; Camacho, P.; Salmon, P.; Paris, J. "Anaerobic Digestion of Municipal Wastes in Landfill" *Wat. Sci. Tech.*, 25, 243 - 253, 1992

Bala, B.K. "Kinetic and economic considerations of biogas production systems" *Biological Wastes*, 34, 21 - 38, 1990

Beone, G. "Valoración y metodología de la contaminación de aire en los rellenos" 6º Congreso y Exposición Internacional de Residuos Sólidos, Madrid, 1992

Berenyi, E.B.; Gould R.N. "Methane recovery from municipal landfills in the USA" *Waste Management & Research*, 4, 189 - 196, 1986

Bird, R. D.; Steward, W. E.; Lighfoot, E. N. "Fenómenos de transporte" Ed. Reverté, Barcelona, 1975

Bogner J.E. "Understanding natural and induced gas migration through landfill cover materials The basis for improved landfill gas recovery" 21st Conf. "Intersociety Energy Conversion Engineering", San Diego, California, EE.UU., 1, 199 - 204, 1986 (Publicado por: American Chemical Society, 1155, 16th Street, NW, Washington DC 20023 EE.UU. - ISBN 0 8412 0986 3 -)

Britz, T.J. "Anaerobic treatment of municipal landfill leachate using an anaerobic hybrid digester" *Biological Wastes*, 32, 181 - 191, 1990

Brosseau, J. "Trace gas compounds emissions from municipal landfill sanitary sites" *Atmospheric Environment*, 28, 285 - 293, 1994

Brown, K.A.; Maunder, D.H. "Exploitation of Landfill Gas: a UK Perspective" *Wat. Sci. Tech.*, 30, 143-151, 1994

Coops, O.; Luning, L.; Oonk, H.; Weenk, A. "Validation of Landfill Gas Formation Models" Sardinia 95, Fifth International Landfill Symposium by CISA, 1, 635 - 646, 1995

Christensen, T. H.; Cossu, R. y Stegmann, R. "Landfilling of Waste: Biogas" ISBN 0 419 19400 2, E&FN Spon, Londres, 1996

Constant, M.; Naveau, H.; Nyns, E. J. y Ferrero, G. L. "Biogas End-Use in the European Community" ISBN 1 85166 339 8, Elsevier Science Publisher Ltd., Gran Bretaña, 1989

Couceiro, A. "Tendencias en la eliminación y tratamiento de los RSU" Ingeniería Municipal, Junio, 35 - 47, 1987

Crescenti, A.; Magnani, P. "Recupero energetico nelle discariche per RSU e fanghi civili" Difensa Ambientale, 9, 59-62, 1985

Crowhurst, D. y Manchester, S.J. "The measurement of methane and other gases from the ground" Obtenido de: CIRIA (Construction Industry Research and Information Association), 6 Storey's Gate, Westminster, London SW1P 3AU, ISBN 0 86017 3720, 1993

D'Antonio, G. "Utilización de biogás en la planta municipal de tratamiento de residuos sólidos de Nápoles" 6º Congreso y Exposición Internacional de Residuos Sólidos, Madrid, 1992

De Benito, A. "Tratamiento biológico de residuos: fermentación aerobia y anaerobia" Proma, 24 - 26, 1993

Dehli, M.; Erb, P.; Luik, K.-O. y Reinicke, B. "Economic utilization of landfill gas from small and medium-sized waste dumps", Commission of the European Communities, Final Report EUR 12166 DE/EN, 1989

Delás J.E. "La política de la R.F.A. en el sector de las energías renovables" DYNA, 1, 25 - 28, 1991

Dubini, S. "Instrumentos tecnológicos para monitor de rellenos sanitarios" 6º Congreso y Exposición Internacional de Residuos Sólidos, Madrid, 1992

Eden, R.D. "Utilisation of landfill gas" Institute of Wastes Management, Gran Bretaña, 1990 (Obtenida de: UKPS Limited, The Barclay Centre, University of Warwick Science Park, Coventry CV4 7EZ, Gran Bretaña)

Eden, R.D. "Flare Specification to meet european standards" Proceedings of "Methane - Facing the problems", Nottingham University, Gran Bretaña, 1991 (Obtenida de: UKPS Limited)

Eden, R.D. "Toxic emissions from different types of landfill gas burners" Proceedings of "Sanitation and pollution in urban areas", Río de Janeiro, Brasil, 1992 (Obtenida de: UKPS Limited)

Eden, C.P.; Eden, R.D. "The successful implementation of automatic borehole monitoring systems" Proceedings of Envirotech'93, Edinburgh, Gran Bretaña, 1993 (Obtenida de: UKPS Limited)

Feal, A. "Incidencia en el medio atmosférico de la disposición final de residuos" Ingeniería Química, 37 - 46, 1988,

Fernández, M.E.; Martín, S.; Marañón, E.; Sastre, H. "Production Potencial of Biogas in Sanitary Landfills" Proceedings Sardinia 95, Fifth International Landfill Symposium by CISA, 1, 629-635, 1995

Fernández, M.E. "Optimización de la generación y captación de biogás en vertederos controlados de RSU" Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Proyecto nº 9270, Universidad de Oviedo, España, 1995

Figuerola, R.A. "Posibilidades de extracción controlada de gas activo en antiguos rellenos" 6º Congreso y Exposición Internacional de Residuos Sólidos, Madrid, 1992

Gandolla, M. "Características cualitativas y cuantitativas de la condensación de biogás producida en los vertederos MSW" 6º Congreso y Exposición Internacional de Residuos Sólidos, Madrid, 1992

Gandolla, M.; Bressi, G.; Dugnani, L.; Baldi, M. "Determinación de efectos de hundimiento en vertederos sanitarios municipales para residuos sólidos" 6º Congreso y Exposición Internacional de Residuos Sólidos, Madrid, 1992

García-Parra, E. "Tratamiento y gestión de los RSU en grandes núcleos de población. El caso concreto de Valladolid" RETEMA, 33 - 40, 1991

García-Salmones, J. "Aprovechamiento del gas en vertederos", Residuos Sólidos, 21-25, 1980

Gendebien, A.; Pauwels, M.; Constant, M.; Ledrut-Damanet, M.-J.; Nyns, E.-J.; Willumsen, H.-C.; Butson, J.; Fabry, R. y Ferrero, G.-L. "Landfill Biogás. From Environment to Energy" Commission of the European Communities. Final report EUR 14017 / 1 EN, Luxemburgo, 1992

Gil Díaz, J.L. "El plan de gestión de RSU de Cantabria" RETEMA, 63 - 68, 1991

Ginovart, C. "Biogás en vertederos de residuos sólidos urbanos" Revista Residuos, 3, 18 - 21, 1992

Gutiérrez, J.C.; Beyebach, A. "Gardelegui: Una nueva instalación de biogás" IntecUrbe, 53-55, 1995

Gutiérrez, J. "Valoración de vertederos", DYNA, 8, 52-54, 1995

Held, A.; Cornet, C. "Aprovechamiento energético de los gases de vertedero" Residuos, 23, 25-32, 1995

Jaramillo, J.A. "Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales" Organización Panamericana de la Salud, Washington D.C., 1991

Laínez, C. "Reciclaje y valorización de los residuos sólidos urbanos en la Comarca de Pamplona" Medio Ambiente, 51-55, 1993

Lee, J.J.; Jung, I.H.; Lee, W.B.; Kim, J.-O. "Computer and experimental simulations of the production of methane gas from municipal solid waste" *Wat. Sci. Tech.*, 27, 225-234, 1993

Lema, J.L. "Chemical reactor engineering concepts in design and operation of anaerobic treatment processes" *Wat. Sci. Tech.*, 24, 79 - 86, 1991

Levine, I. N. "Physical Chemistry" Mc Graw Hill, 1978

Louwman, D. "Papel de los vertedero en un sistema integrado de gestión de residuos" 6º Congreso y Exposición Internacional de Residuos Sólidos, Madrid, 1992

López, M.R. "Aprovechamiento energético de residuos sólidos urbanos" *Energía*, 129-135, 1988

López, M. "Estudio sobre la producción , control y aprovechamiento del biogás producido en el depósito de COGERSA", COGERSA, 1987

Magagni, A. "Normativa técnica y tecnología italiana para el diseño y administración de vertederos sanitarios" 6º Congreso y Exposición Internacional de Residuos Sólidos, Madrid, 1992

Marticorena, B.; Attal, A.; Camacho, P.; Manem, J.; Hesnault, D.; Salmon, P. "Prediction rules for biogas valorisation in municipal solid waste landfills" *Wat. Sci. Tech.*, 27, 235-241, 1993

Martín, S.; Fernández, M.E.; Marañón, E.; Sastre, H. "Captaciones de biogás en vertederos de RSU: modelización matemática" III Congreso Internacional de Química de la ANQUE, ISBN 84 - 88233 - 17 - 5, Tenerife (España), 1994a

Martín, S.; Fernández, E; Sastre, H. "Sistema de Captación de Biogás: Diseño de Redes y Control del Biogás Generado en Vertederos de RSU" Informe del proyecto de colaboración con la Universidad de Oviedo, COGERSA, 1994b

Martín, S.; Fernández, M.E.; Marañón, E.; Sastre, H. "Biogas End-Uses at COGERSA Sanitary Landfill" III International Congress, "Energy, Environment and Technological Innovations", Caracas, Venezuela, 1995a

Martín, S.; Fernández, M.E.; Marañón, E.; Sastre, H. "Biogas Manually Controlled Extracting System at COGERSA Landfill" III International Congress, "Energy, Environment and Technological Innovations", Caracas, Venezuela, 1995b

Martín, S. "Tecnología de control y aprovechamiento energético del biogás recuperado en vertederos controlados de RSU" Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Proyecto nº 9408, Universidad de Oviedo, España, 1995c

Martín, S.; Fernández, E.; Sastre, H. "Separata para la Captación y Regulación de Biogás Procedente del Depósito Controlado de COGERSA, S.A." Proyecto de ampliación de la red de captación de biogás, COGERSA, 1995d

Martín, S.; Fernández, E.; Sastre, H. "Extractor Portátil de Biogás" Proyecto para la construcción de un Sistema Portátil de Extracción de Biogás, COGERSA, 1995e

Martín, S.; Campos, F.; Sastre, H. "Evaluación de la Producción de Biogás en el Vertedero de Bratovo (Burgas, Bulgaria)" Informe del programa APERTURA con Bulgaria de la Unión Europea, COGERSA, 1995f

Martín, S. "Vertederos Controlados de Residuos Sólidos Urbanos. Análisis y Determinación de la Producción de la Biogás" Trabajo de Investigación, Dpto. de Ing. Química y Tecnología del M.A., Universidad de Oviedo, España, 1996a

Martín, S.; Fernández, S.; Sastre, H. "Sistema de Captación, Aspiración y Control de Biogás en el Vertedero de Bratovo (Burgas, Bulgaria)" Proyecto Técnico para el programa APERTURA con Bulgaria de la Unión Europea, COGERSA, 1996b

Martín, S. "Gestión de los Residuos Sólidos en el Relleno Sanitario de Cerro Patacón y Establecimiento de una Red de Estaciones de Transferencia" Asesoría para la Dirección Metropolitana de Aseo de Panamá de la Agencia Española de Cooperación Internacional, ZOREDA INTERNACIONAL, S.A., 1996c

Martín, S.; García, J.A. y Corral, J.L. "Digestores Anaerobios de Residuos Pecuarios" DYNA, 7, 50-55, 1996d

Martín, S.; Marañón, E. y Sastre, H. "Modelización Matemática del Proceso Físico de Migración del Biogás en Vertederos de RSU" VI Congreso Iberoamericano de Residuos Sólidos, ATEGRUS, Madrid, 1996e

Martín, S. "Ampliación de la Red de Captación de Biogás en el Vertedero de La Zoreda" Proyecto Técnico para la empresa COGERSA, S.A., ZOREDA INTERNACIONAL, S.A., 1997a

Martín, S.; Marañón, E. y Sastre, H. "Modelización Matemática del Proceso Físico de Migración del Biogás en Vertederos Controlados de RSU" Residuos, 36, 52-56, 1997b

Martín, S.; Marañón, E. y Sastre, H. "Landfill Gas Extraction Technology" Bioresource Technology (aceptada febrero 1997c)

Martín, S.; Campos, F.; Sastre, H. y Fernández, S. "Evaluation o Biogas Production from the Landfill o Bratovo (Burgas, Bulgaria)" Hungarian Journal of Industrial Chemistry (acptada mayo 1997d)

Meijer, J.E. "Diseño de celdas para la producción de gas en vertederos" 6º Congreso y Exposición Internacional de Residuos Sólidos, Madrid, 1992

Nyns, E.J.; Gendebien, A. "Landfill gas: from environment to energy" *Wat. Sci. Tech.*, 27, 253-259, 1993

Otero del Peral, L.R. "Residuos Sólidos Urbanos" Unidades Temáticas Ambientales de la Secretaría de Estado para las Políticas del Agua y el Medio Ambiente, MOPT, 1992

Pacey, J.G.; DeGier, J.P. "The factors influencing landfill gas production" Proc. Conf. "Energy from Landfill Gas", Solihull, Gran Bretaña, 1986

Pereira, F.J. "Potencial de extracción de biogás en rellenos/vertederos portugueses" 6º Congreso y Exposición Internacional de Residuos Sólidos, Madrid, 1992

Pérez, F. "Estudio de prefactibilidad sobre aprovechamiento energético de un vertedero controlado de RSU" *Técnica Industrial*, 208, 56 - 69, 1991

Pohland, F.G.; Al-Yousfi, B. "Design and Operation of Landfills for Optimum Stabilization and Biogas Production" *Wat. Sci. Tech.*, 30, 117-124, 1995

Popov, V. y Power, H. "Landfill emissions of gases to the atmosphere" *Urban Air Pollution*, 223 - 265, 199\*

Power, H.; Mouffiopoulos, N. y Brebbia, C. A. "Urban Air Pollution" Computational Mechanics Publications, Southampton, Boston, EE.UU., 1994

Rao Gurijala, K.; Suflita, J.M. "Environmental factors influencing methanogenesis from refuse in landfill samples" *Environ. Sci. Technol.*, 27, 1176 - 1181, 1993

Reinhart, D.R.; Cooper, D.C.; Walker, B.L. "Flux Chamber Design and Operation for the Measurement of Municipal Solid Waste Landfill Gas Emission Rates" *J. Air Waste Management Assoc.*, 42, 1067 - 1070, 1992

Resa, J.M. Cepeda, E. "Estudios previos al diseño de una planta de tratamiento de RSU. Aplicación a un caso particular" *Ingeniería Química*, 203 - 211, 1990

Sastre, H.; Martín, S. y Fernández, S. "Aprovechamiento energético del biogás. El caso de COGERSA" *DYNA*, 2, 11-14, 1997a

Sastre, H.; Fernández, J. y Grillo, G. "Análisis del Sistema de Captación del Biogás en el Vertedero de La Zoreda" Informe preliminar del proyecto Biogás 97/1, COGERSA, 1997b

Sastre, H.; Berrueta, J.; Gutiérrez, A.; Fernández, S. J.; Fueyo, G. "Alternativas al tratamiento de lixiviados de la instalación de COGERSA: análisis de secuencias de tratamiento aerobio, anaerobio y físico-químico" Informe final, DEGREMONT y COGERSA, 1997c

Spoerry, R. "Revalorización energética del biogás del vertedero controlado de RSU de San Marcos" *Residuos*, 23, 17-18, 1995

Straka, F.; Crha, J.; Musilova, M. "Design of Landfill Gas Extraction Systems" Proceedings Sardinia 95, Fifth International Landfill Symposium by CISA, 1, 679 -687, 1995

Stegman, R. ; Spendlin, H. "Research activities on enhancement of biochemical processes in sanitary landfills" Water poll. Res. J. Canada, 21, 1986

Stookey, D.; Boustany, K.; Kilgour, R. "Recovery of methane from biogás with Monsanto's Prism<sup>TM</sup> Separators" Proceedings of "Bioenergy 84 World Conference and Exhibition", Gothemburg, Sweden, 1984

Suárez Marcos, A.; Fernández Fernández, S. "La Gestión de los Residuos en Asturias" Obtenido de: Servicio de Publicaciones del Principado de Asturias, 1988

Suárez Quirós, J. "Caracterización Gráfica de Volúmenes mediante redes de tetraedrización" Tesis doctoral, Departamento de Construcción e Ingeniería de la Fabricación, Area de Expresión Gráfica en la Ingeniería, ETSIIeII de Gijón, 1997

Suflita, J.; Gerba, C.; Ham, R.; Palmisano, A.; Rathje, W.; Robinson, J. "The World's Largest Landfill: A Multidisciplinary Investigation" Environmental, Science and Technology, 26, 1486 - 1495, 1992

Szantó, M.; Espinace, R.; Arias, A.; Henríquez, J.; Tejero, I.; Fantelli, M. "Recuperación de un vertedero en emergencia y efectos de la recirculación de lixiviado sobre la producción de biogás en el vertedero El Molle (Chile)" RETEMA, 33, 41 - 43, 1993

Tabasaran, O. "Methane recovery from municipal waste in landfills" Trib. Cebedeau, 35, 483 - 488, Bélgica, 1982

Tomasini, P. "Biogas: captazione e recupero in discariche controllate per RSU" Not. Ecol., 4, 9 - 15, 1986

Unda Opazo, F. "Ingeniería Sanitaria" Ed. Hispano Americana, Méjico, 1969

Uriarte, J.; Carreras, N.; Solano, M.L. "Management of Biogas Generated in Sanitary Landfills. Electrical Autogeneration in Artigas Sanitary Landfill" CIEMAT, Madrid, 1992

Uriarte, J.; Carreras, N.; Dorronsoro, J.L. "Electrical Autogeneration in Artigas Landfill: Current State of Proyect" CIEMAT, Madrid, 1992

Uriarte, J. "El vertedero de Artigas: gestión del biogás generado" 6º Congreso y Exposición Internacional de Residuos Sólidos, Madrid, 1992



Valderrama, J.O.; Montenegro, E.C.; Arrue, D.O.; Jiménez, W.T. "Producción de biogás a partir de desechos orgánicos y energía solar" *Ingeniería Química*, 252, 189-196, 1990

Vazoller, R.F. "Estudios fundamentales sobre potencial de biodegradabilidad, microbiología y bioquímica de dos rellenos experimentales" 6º Congreso y Exposición Internacional de Residuos Sólidos, Madrid, 1992

Welander, T.; Bramryd, T.; Meijer, J.-E.; Persson, B.-L. "El efecto de las diferentes acciones de control sobre la producción microbiana anaeróbica de biogás en los vertederos" 6º Congreso y Exposición Internacional de Residuos Sólidos, Madrid, 1992

Willumsen, H. "Optimización de la recuperación de gas procedente de vertederos" *Ingeniería Municipal*, 33 - 36, 1989

Yasuda, K. "El inventario de emisiones de gases del efecto invernadero en las instalaciones de tratamiento de residuos de Japón" *Residuos*, 32, 18 - 19, 1996

Young, A. "Mathematical Modelling of Landfill Degradation" *J. Chem. Tech. Biotechnol.*, 46, 189 - 208, 1989

## **9. ANEXOS**

## 9. ANEXOS

### A. APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS

#### A-1. Propiedades del biogás como combustible

A la hora de decidir cuál es el aprovechamiento más adecuado para el biogás extraído de un vertedero controlado, deben tenerse en cuenta tres tipos de variables: **económicas, medioambientales y tecnológicas.**

El criterio *económico* decide en última instancia la viabilidad del proyecto, ya definido de acuerdo con los dos factores restantes. La voluntad política puede tornar rentable, mediante incentivos tipo subvención, exención fiscal, etc. un aprovechamiento de otro modo imposible.

Las restricciones *medioambientales* también seleccionan el tipo de proyecto. Así, independientemente de que vaya o no a ser aprovechado, el biogás de vertedero debe ser extraído y quemado para evitar riesgos de explosiones y molestias por malos olores. Este factor debe ser tenido en cuenta a la hora de cuantificar el coste real del proyecto de aprovechamiento energético, que no incluye los gastos del sistema de captación, al menos al cien por cien.

Finalmente, existen *restricciones tecnológicas* evidentes. Cada vertedero produce, en función de variables tales como el volumen de residuos depositados o las condiciones ambientales de la región, un *caudal* de gas distinto con una *composición* también variable. Esto condiciona las soluciones técnicas viables, haciendo necesarios sistemas de Control de Extracción y de Depuración del Biogás.

Quedan *otros factores* difícilmente previsibles que, no obstante, serán decisivos para la solución final. Tales son, por ejemplo, la proximidad del vertedero a polígonos industriales o agrícolas donde el gas pueda ser consumido o la posible utilización del gas en procesos internos del vertedero, como son hornos incineradores, plantas de reciclaje, tratamiento de lixiviados, etc.

Las alternativas de aprovechamiento del biogás comúnmente aceptadas son:

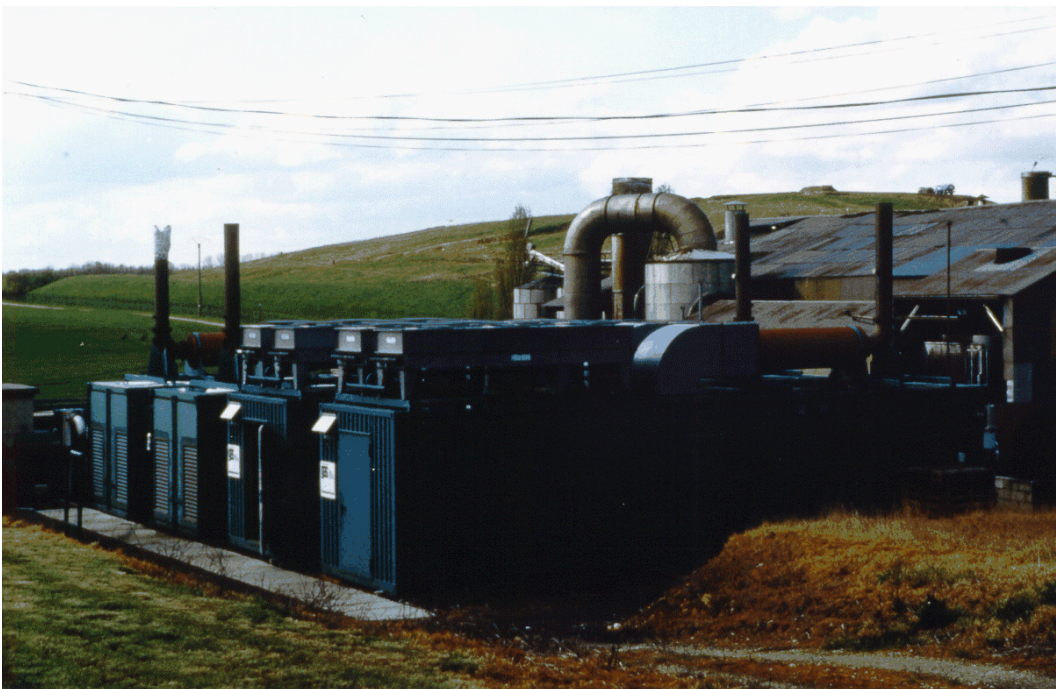
- a) *Combustión* directa para la producción de calor
- b) *Motores* de combustión interna, con aprovechamiento de la potencia mecánica o eléctrica y con o sin recuperación de calor (*cogeneración*)
- c) *Turbinas* de gas o vapor, con aprovechamiento de la potencia eléctrica y con o sin recuperación de calor
- d) *Vehículos*, con recuperación de la energía mecánica
- e) Enganche a la red de *gas natural*
- f) Producción de *sustancias químicas*

En la Fotografía A1 se muestra un evaporador de lixiviados. El biogás es utilizado para vaporizar el lixiviado recolectado en el vertedero, concentrando su carga orgánica, que es recirculada al vertedero. Los gases de combustión son tratados antes de ser emitidos para evitar transferir la contaminación a la atmósfera.

En las Fotografías A2 y A3 se muestran sendas plantas de generación de energía eléctrica con biogás, en el primer caso combinada con una instalación para el secado de forraje de animales.



**Fotografía A1.** Evaporador de lixiviados alimentado con biogás (vertedero de Soignolles en Brie, Metz, Francia)



**Fotografía A2.** Planta de generación de electricidad y nave para el secado de forraje, ambas alimentadas con biogás (vertedero de Mont St Sébastien, París, Francia)

**Fotografía A3.** Planta de generación de energía eléctrica (vertedero de Dunsink, Dublín, Irlanda)

Para la utilización del biogás en cualquiera de los sistemas descritos es necesario tener en cuenta sus características particulares. El **caudal** de biogás generado en un vertedero, así como su **composición**, está sometido a fluctuaciones debidas a factores ambientales (precipitaciones, temperatura ambiente, etc.) y de gestión (cantidad y composición de los residuos, tipo de recubrimiento, operaciones de computación y trituración, etc.). Al ser la mayoría de estos factores incontrolables, previamente a la elección de un sistema de aprovechamiento es necesario realizar estudios en campo y, como conclusión de los mismos, diseñar una *Red de Captación, Control de Extracción y Depuración del Biogás*.

Una vez conocida la composición del biogás es posible determinar el **Poder Calorífico Inferior** (PCI) del mismo, mediante la fórmula (A-1). Este dato es necesario para el cálculo de la potencia de la instalación.

$$\text{PCI} = \% \text{CH}_4 \cdot 35.880 / 100 \text{ [kJ/m}^3\text{N]} \quad \text{[A-1]}$$

Dependiendo del tipo de equipo, el fabricante requerirá otros datos, tales como la **altitud sobre el nivel del mar, temperatura ambiente, fluctuaciones** permitidas por el sistema de control **en el caudal y la composición** del biogás suministrado, las **condensaciones de agua** en las líneas o en los equipos, la presencia de **partículas abrasivas** en suspensión y también de **compuestos orgánicos halogenados**. Todo ello exige algún tipo de sistema de depuración.

## A-2. Ejemplos de usos del biogás en Asturias

### A-2.1. Uso del Biogás en Quemadores: Hornos y Calderas

El uso del biogás en quemadores presenta como inconvenientes la necesidad de ubicar el centro de consumo próximo al vertedero y los problemas derivados de la contaminación atmosférica generada.

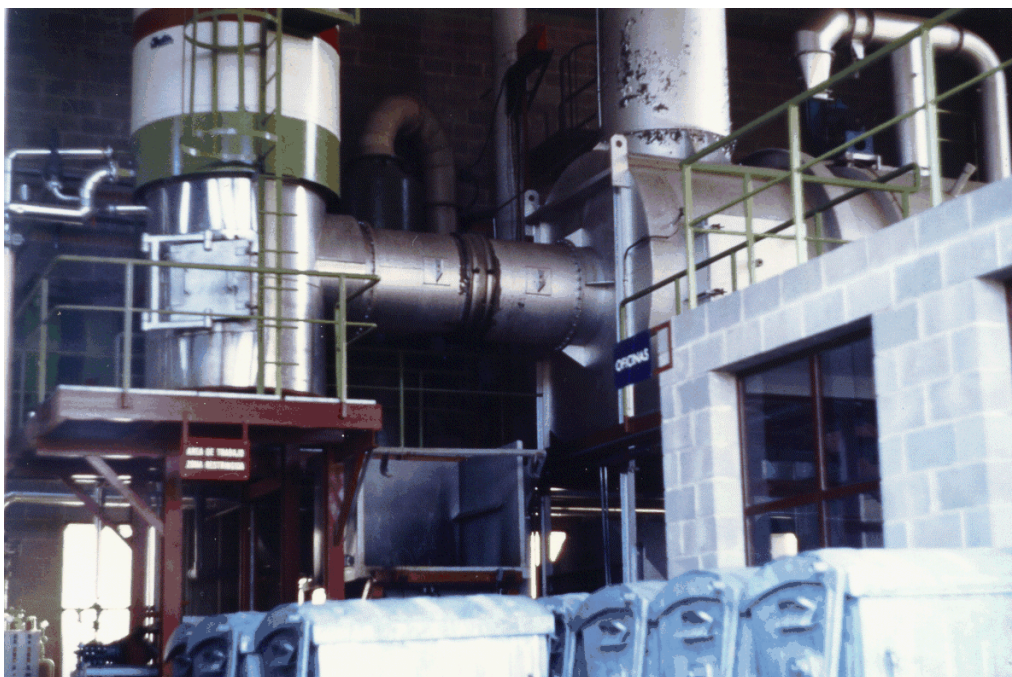
Debido al bajo Poder Calorífico del biogás, éste no puede ser trasladado de forma rentable por tubería lejos del vertedero. Por ello es frecuente que el biogás se emplee en instalaciones relacionadas con la gestión de residuos en el propio vertedero, como son los hornos incineradores.

La adaptación de un sistema de combustión para el trabajo con el biogás es ante todo un problema del quemador. Hay que adaptarlo al bajo PCI del biogás, para lo que basta con agrandar el orificio de salida del quemador y disminuir la sección del de entrada de aire. Esto supone modificar el sistema de inyección del biogás y el sistema de control.

En COGERSA existen actualmente dos instalaciones de consumo de biogás de este tipo: un **Horno Incinerador de Residuos Hospitalarios** y una **Planta de Aprovechamiento de Subproductos Cárnicos**.

El *Horno Incinerador de Residuos Hospitalarios*, Fotografía A4, fue construido en 1993 para la eliminación de los residuos clínicos e infecciosos generados en los hospitales asturianos, utiliza como combustible el biogás. Se consume un promedio de aproximadamente 300 m<sup>3</sup>N/h de biogás. Se diseñó para eliminar unas 1708 t/año de residuos clínicos y 299 t/año de residuos infecciosos (2007 t/año en total) correspondientes a la producción media de residuos hospitalarios en Asturias.

El Horno Incinerador, del tipo pirolítico, dispone de un sistema de depuración de gases por vía húmeda, con el que no sólo se cumplen los límites para las emisiones por chimenea establecidos por la normativa de la Unión Europea sino que se mejoran muchos de ellos, como se indica en la Tabla A1. La temperatura en la cámara de postcombustión es superior a 1.100 °C y el tiempo de residencia mínimo de 2 segundos, con lo que se logra el objetivo de destruir los compuestos precursores de la formación de dioxinas y furanos.



**Fotografía A4.** Horno Incinerador de Residuos Hospitalarios (La Zoreda)

**Tabla A1.** Emisiones por chimenea del Horno Incinerador de Residuos Hospitalarios

Contaminante	mg/m <sup>3</sup> N
Partículas	100 (máx. 200)*
HCl	100 (máx. 250)*
CO	100 (máx. 100)*
SO <sub>2</sub>	300
HF	2
Pb + Cr + Cu + Mn	5
Ni + As	1
Cd + Hg	0,2
Compuestos Orgánicos (en carbono orgánico total)	20 (máx.200)*

(1) Valores máximos admitidos por la Directiva 89/369/CEE

Fuente: COGERSA, S.A.

La *Planta de Aprovechamiento de Subproductos Cárnicos*, Fotografía A5, ha sido construida en 1995. Aprovecha los restos de industrias de alimentación no aptos para el consumo humano en la obtención de grasas y proteínas para la fabricación de piensos. La planta está dimensionada para el tratamiento de unas 900 toneladas de restos cárnicos al mes. El biogás se utiliza como sustituto del fuel-oil en una caldera para la generación de vapor. La sustitución del fuel-oil por el biogás como combustible se realiza modificando la relación de aire en los quemadores, para un *exceso de aire del 5%*. El consumo de biogás es de 875 m<sup>3</sup>N/h.

**Fotografía A5.** Estación de regulación para el suministro de biogás a la Planta de Aprovechamiento de Subproductos Cárnicos



### A-2.2. Uso Del Biogás en Motores de Combustión Interna para la Generación de Electricidad

El biogás es *poco lubricante*, presenta un *alto contenido en humedad*, *bajo PCI* (es poco detonante), tiene un carácter *corrosivo* fuerte y puede dar origen a problemas de *contaminación atmosférica*. Por ello, los motores de combustión interna que trabajan con biogás deben sufrir algunas **modificaciones**.

Tanto los *motores de encendido por compresión* (MEC ó ciclo Diésel) como los *motores de encendido provocado* (MEP ó ciclo Otto) deberán estar dotados de un carburador para suministrar la mezcla de aire - gas. Debido a su bajo contenido energético, esta mezcla es difícil de detonar en los motores MEP con la bujía. Una solución consiste en disponer de una cámara de precombustión en la cual la mezcla aire - gas esté enriquecida. Esta cámara requiere una alimentación de biogás a alta presión.

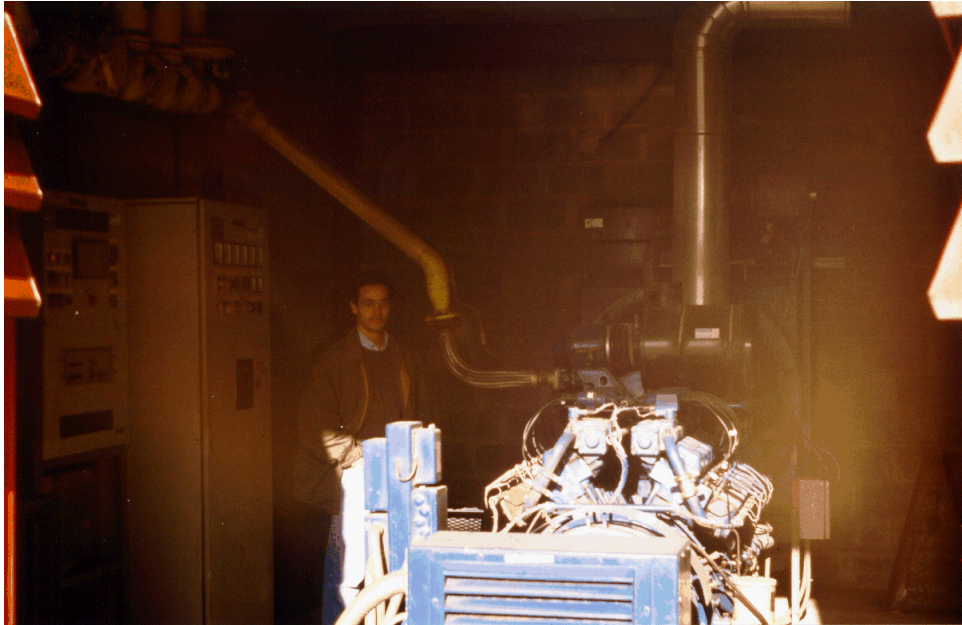
En el caso de los motores MEC Diesel - Gas, debido a la alta resistencia del metano a la autoignición, que aumenta por la presencia del CO<sub>2</sub>, las condiciones de temperatura y presión que se alcanzan en el cilindro son insuficientes. La mezcla de aire - gas ya comprimida debe detonarse mediante la inyección de fuel. Un motor MEC Diesel también puede trabajar con biogás, pero las modificaciones técnicas son más complicadas.

Debido a las variaciones en el contenido en metano del biogás, el sistema de carburación debe ajustar en continuo la mezcla aire - gas, por ejemplo mediante una sonda que detecte el exceso de aire en los humos. Ello a menos que minimicemos las fluctuaciones del contenido en metano aguas arriba, mediante un adecuado sistema de control. El valor del contenido en metano debe ser superior al mínimo especificado por el fabricante de los motores. Así, por ejemplo, los motores MEP suelen especificar un valor mínimo de metano del 35% vol.

El uso del biogás en motores de combustión interna puede acarrear importantes problemas de corrosión interna debida a la presencia de **compuestos orgánicos halogenados** y de **sulfuro de hidrógeno**.

En La Zoreda existen dos plantas de generación de energía eléctrica alimentadas con biogás. En 1989 fue construida la *Planta de generación de electricidad para consumo interno del área de lixiviados*, pionera en España, que consta de un sólo grupo electrógeno de 400 kVA de potencia eléctrica (200 m<sup>3</sup>/h, 259 kW), mostrado en la Fotografía A6.

Posteriormente, en 1992 se construyó una *Planta de generación de electricidad para venta a la red eléctrica*, mostrada en la Fotografía A7. Está formada por seis grupos motor - alternador de 970 kVA por unidad , lo que supone una entrega de energía a la red de más de 30.000.000 kWh/año. En las Figuras A1 y A2 se muestran los resultados de fiabilidad de esta planta.



**Fotografía A6.** Planta de generación de electricidad para consumo en el área de lixiviados (La Zoreda)



**Fotografía A7.** Planta de generación de electricidad para la venta a la red eléctrica (La Zoreda)

PRODUCCION ELECTRICA  
 INSTALACIONES DE COGERSA, 1993 / 1994

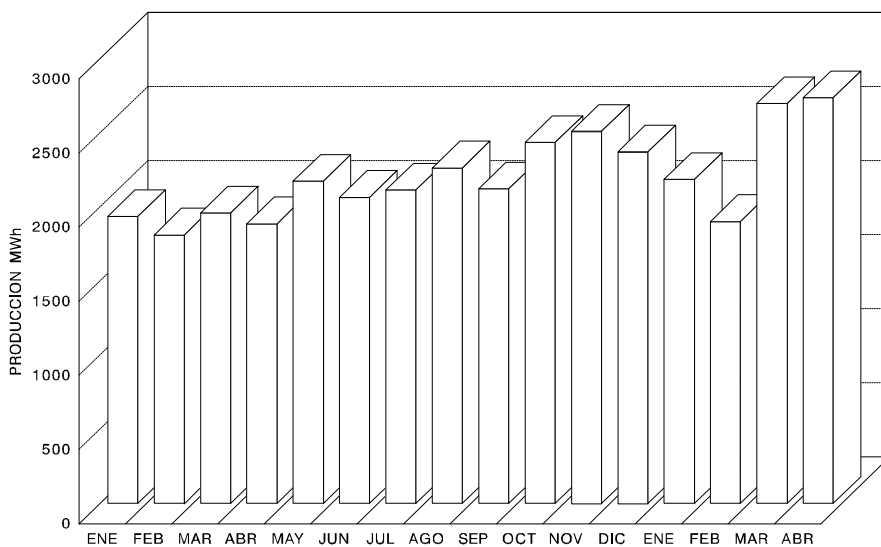


Fig. A1. Producción eléctrica en La Zoreda (COGERSA, 1993/94)

TASA DE UTILIZACION  
 INSTALACIONES DE COGERSA, 1993 / 1994

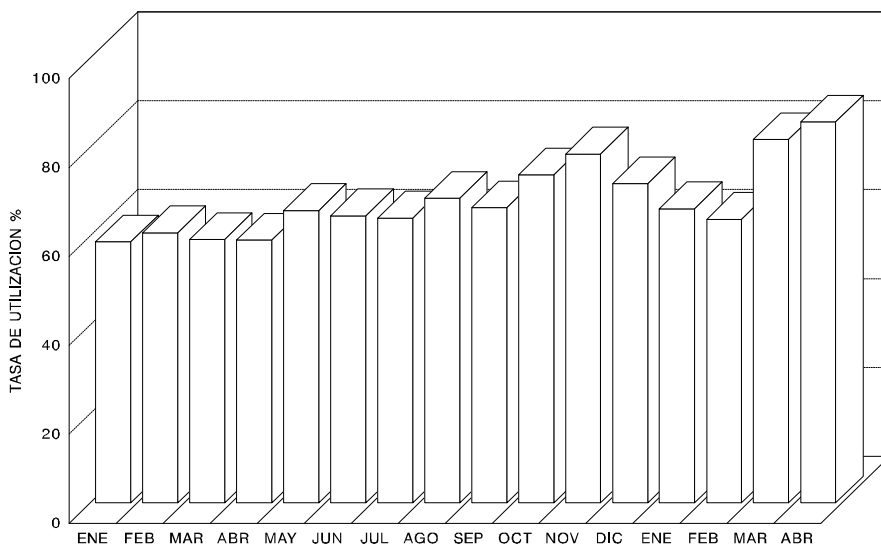


Fig. A2. Utilización de los motores en La Zoreda (COGERSA, 93/94)

### A-3. Otras instalaciones de aprovechamiento del biogás en España

En la actualidad, existen en España tan sólo dos plantas de aprovechamiento del gas de vertedero en funcionamiento, a parte de la planta de La Zoreda. Próximamente se pondrá en marcha otra instalación en el vertedero de Góngora, de la Mancomunidad de Pamplona. En todos estos casos el biogás es utilizado para la generación de energía eléctrica. A continuación se resumen las características de estas plantas.

#### A-3.1. Vertedero de Artigas (Bilbao)

El vertedero de Artigas fue inaugurado en 1977. Tiene una superficie de 10 Ha aproximadamente y se encuentra ubicado en un estrecho y angosto valle. Recibe desde 1988 aproximadamente 150.000 t/año de RSU, más otras 100.000 t/año de otros residuos, fundamentalmente escombros (Uriarte, 1992).

Se han instalado en este vertedero 22 pozos verticales para la captación del biogás. La extracción es controlada de forma automática. De esta forma se recuperan unos 600 m<sup>3</sup>N/h de biogás, estando prevista la ampliación del sistema hasta 1200 m<sup>3</sup>N/h. La composición del biogás generado en el vertedero es de 54,4% de metano, 17,2% de dióxido de carbono, 21,4% de nitrógeno y 2,0% de oxígeno. El biogás, previamente deshidratado, alimenta dos motores para la generación de energía eléctrica, cada uno de los cuales tiene un consumo a plena carga de 240 m<sup>3</sup>N/h y una producción de energía eléctrica de 450 kW.

#### A-3.2. Vertedero de San Marcos (Mancomunidad de San Marcos, Vizcaya)

Este vertedero recibe aproximadamente 300 t/día de RSU. El biogás es captado mediante 15 pozos. La regulación de la extracción del biogás se realiza en tres estaciones automáticas. El biogás es deshumidificado y mezclado con gas natural, en proporción 30 - 70%, con objeto de incrementar su PCI. Esta mezcla alimenta dos grupos de 651 kWe para el consumo propio y la venta de excedentes a la red eléctrica.

#### A-3.3. Vertedero de Góngora (Mancomunidad de Pamplona)

Actualmente aún no se ha puesto en marcha la instalación de aprovechamiento del biogás en este vertedero. Está previsto, como novedad a los sistemas anteriormente descritos, incorporar un gasómetro, que acumulará los excedentes de biogás para su posterior empleo en los motores. Cada grupo electrógeno tendrá una potencia de 759 kWe.