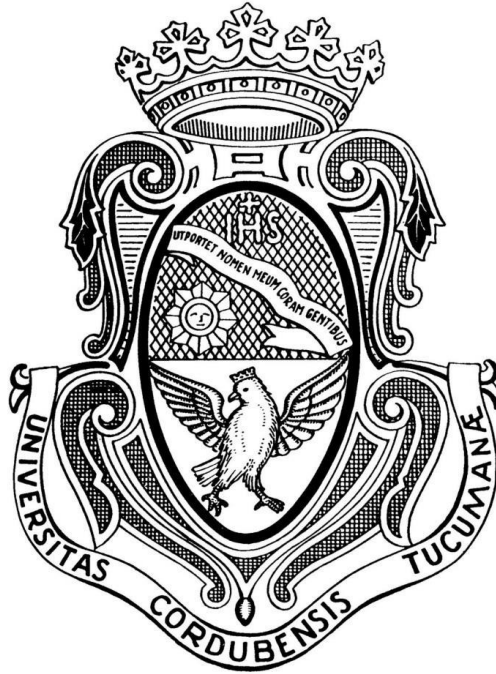


Evaluación de generación de biogás en el vertedero de Piedras Blancas, Córdoba.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA.
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y
NATURALES.



PRÁCTICA SUPERVISADA
Ingeniería Civil

Evaluación de generación de biogás en el vertedero de
Piedras Blancas, Córdoba.

Manuel Alejandro Juarez

Tutor: *Dr. Ing. Marcos A. Montoro.*

Supervisor Externo: *Dra. Ing. Magalí E. Carro Pérez.*

Lugar: *Centro de Vinculación de Ingeniería Geoambiental, Medios Porosos
y Flujos Subterráneos*

Agosto de 2016

Resumen

Nombre del autor: JUAREZ MANUEL ALEJANDRO

Plan: 2005

Matricula: 36.053.377

Título del trabajo: "EVALUACIÓN DE GENERACIÓN DE BIOGÁS EN EL VERTEDERO DE PIEDRAS BLANCAS, CÓRDOBA"

Palabras claves: Biogás, Residuos Sólidos, potencial de generación de metano.

El siguiente informe forma parte de la práctica supervisada de la carrera de Ingeniería Civil, de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. El objetivo principal consiste en la estimación del volumen y velocidad de generación de biogás en el Predio de Enterramiento Sanitario Piedras Blancas. En este sitio se vierten los residuos en la Ciudad de Córdoba y ciudades aledañas. El predio se encuentra en las afueras de la ciudad y el mismo está operando desde abril del 2010.

Este trabajo es una parte del estudio de Cierre, Clausura y Postclausura del predio realizado por el Centro de Vinculación de Ingeniería Geoambiental, Medios Porosos y Flujos Subterráneos.

En este informe se desarrollan diferentes estimaciones de generación de biogás y de metano generados por los residuos dispuestos en el predio. Para ello en una primera instancia se realiza una caracterización de la composición de los residuos sólidos dispuestos en el predio, ensayos de densidad y ensayos de prospección geoelectrica en la celda ubicada en el predio para determinar la situación de humedad en el relleno.

Luego se utilizan diferentes modelos matemáticos para estimar la tasa de generación de biogás, tales como los modelos de primer orden, Landfill Gas Emission Model (LandGEM) desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA), el modelo desarrollado por el Ministerio de Ambiente de British Columbia, Canadá y el Modelo Triangular (Tchobanoglous et al 1993). También se utiliza el modelo de orden cero propuesto por Swana (1998).

Posteriormente se realiza un análisis de sensibilidad de los parámetros involucrados en los modelos de primer orden. Se evalúa las diferencias en la generación total de biogás y los caudales pico.

Por último se realiza un análisis comparativo con otros proyectos captación y tratamiento de biogás desarrollados en la región tales, como el vertedero de Olavarría y de Salta en Argentina y el vertedero de Montevideo en Uruguay.

Agradecimientos

A toda mi familia: especialmente a mis padres, Alicia y Victor, por su apoyo incondicional, por confiar siempre en mí, y por su amor ante todas las cosas.

A mis amigos, tanto dentro como fuera de la facultad: porque los momentos compartidos con ustedes van a ser gran parte de mis recuerdos de estos años en los que han de venir. Enfrentar desafíos y aprender de y con ustedes es uno de las mejores cosas que me llevo de esta etapa de mi vida.

A mi tutor, Dr. Ing. Marcos Montoro: por su seguimiento, paciencia, dedicación y por ser un gran ejemplo como persona y como profesional. Sus consejos y su ayuda fueron muy importantes en la realización de este trabajo.

Al Centro de Vinculación de Ingeniería Geoambiental, Medios Porosos y Flujos Subterráneos de la Universidad Nacional de Córdoba y a todas las personas que forman parte de él, por su apoyo y por darme un espacio para dar mis primeros pasos en el ejercicio de la actividad profesional.

Índice de Contenidos

Resumen.....	1
Agradecimientos	2
Índice de Contenidos.....	3
Índice de Tablas.....	6
Índice de Figuras	8
Capítulo 1: Introducción.....	10
1.1 Marco Institucional	10
1.2 Objetivos del Proyecto	11
1.3 Descripción de las actividades realizadas durante la Práctica Supervisada.....	11
1.4 Estructura del informe	12
Capítulo 2: Generación de Gases: Marco Teórico.....	13
2.1 Introducción	13
2.2 Factores que afectan la generación de biogás.....	14
2.3 Fases de la de generación de gas	15
2.4 Capacidad calorífica del biogás y sus potenciales usos.....	17
2.5 Síntesis de aspectos relevantes.....	18
Capítulo 3: Descripción del Predio	20
3.1 Ubicación del Vertedero de Piedras blancas.....	20
3.2 Operación y condiciones del sitio	20
3.3 Ingreso y gestión de residuos sólidos.....	22
3.4 Gestión de lixiviados.....	23
3.5 Gestión de gases	23
3.6 Síntesis del capítulo.....	24
Capítulo 4: Caracterización del predio	25
4.1 Tonelaje de los residuos dispuestos:.....	25
4.2 Determinación del volumen del vertedero.....	27
4.2.1 Determinación de densidad in- situ de los residuos del vertedero	28
4.2.2 Proyección de la vida útil del vertedero.....	31
4.2.3 Proyección de la masa total de residuos del vertedero	32
4.3 Caracterización de los residuos sólidos dispuesto en el predio.....	32
4.3.1 Informe de las perforaciones realizadas en el predio	32
4.3.2 Ubicación de las perforaciones.	33
4.3.3 Clasificación cualitativa de la composición de los residuos	34
4.4 Procedimiento de ensayos físico – químicos realizados sobre las muestras.....	35

4.4.1	Composición	35
4.4.2	Contenido de humedad.....	36
4.4.3	Contenido de finos	37
4.4.4	Contenido de materia orgánica.....	37
4.4.5	Determinación de pH	38
4.4.6	Conductividad hidráulica de la cobertura temporaria	39
4.5	Prospección geoelectrica	41
4.5.1	Generalidades del método de prospección	41
4.5.2	Ubicación del sondeo	42
4.5.3	Descripción de las tareas de campo.....	43
4.5.4	Resultados obtenidos.....	43
4.5.5	Análisis de los datos	44
4.6	Caracterización de los residuos dispuestos en el relleno sanitario.	44
4.6.1	Clasificación realizada por la empresa operadora CReSE	44
4.6.2	Comparación con los ensayos realizados por CReSE.....	47
4.7	Caracterización del biogás en el relleno sanitario de Piedras Blancas.....	47
4.7.1	Descripción de los procedimientos aplicados por CIQA.....	47
4.7.2	Resultados de las mediciones efectuadas por CIQA	47
4.8	Análisis de resultados.....	51
Capítulo 5: Modelos matemáticos para determinación de la generación de Biogás		53
5.1	Introducción	53
5.2	Modelo de orden cero.....	53
5.3	Modelo triangular	53
5.4	Modelo de SchollCanyon:.....	54
5.4.1	Modelo LandGEM (Landfill Gas Emission Model).....	55
5.4.2	Modelo British Columbia.....	56
Capítulo 6: Estimación de la generación de Biogás.....		57
6.1	Introducción	57
6.2	Tasa de generación de metano de los residuos (k).....	57
6.3	Potencial de generación de metano de los residuos (L_0).....	57
6.4	Valores típicos de k y L_0	57
6.5	Parámetros utilizados para los diferentes modelos.....	58
6.5.1	Modelo de British Columbia.....	58
6.5.2	Modelo LandGEM.....	64
6.5.3	Determinación alternativa mediante el modelo LandGEM	70
6.5.4	Modelo de Orden Cero.....	70
6.5.5	Modelo Triangular	71
6.6	Resultados de los Modelos.....	75

Evaluación de generación de biogás en el vertedero de Piedras Blancas, Córdoba.

6.6.1	Resultado Modelo British Columbia.....	75
6.6.2	Modelo LandGEM.....	76
6.6.3	Estimación alternativa mediante el modelo LandGEM.....	77
6.6.4	Modelo de Orden Cero.....	78
6.6.5	Modelo triangular	79
6.7	Análisis de variabilidad.....	80
6.7.1	Efecto de la cantidad de residuos dispuestos	80
6.7.2	Coeficiente de velocidad de generación de metano k	82
6.7.3	Potencial de generación de metano L_0	82
6.7.4	Factor por adición de agua.....	83
6.7.5	Comparación de resultados	84
6.8	Análisis de resultados.....	86
6.9	Biogás aprovechable	86
6.9.1	Eficiencia de colección de biogás	86
6.10	Comparación de potencial de generación de gas con medidas en el terreno.....	87
6.11	Síntesis y Conclusiones.....	88
Capítulo 7: Comparación generación de biogás estimada con otros predios.....		89
7.1	Justificación del análisis comparativo	89
7.2	Descripción del predio de Olavarría.....	89
7.2.1	Descripción general.....	89
7.2.2	Proyecto de recolección de biogás.....	90
7.2.3	Descripción del predio de enterramiento.....	90
7.2.4	Disposición de Residuos	90
7.2.5	Generación de biogás.....	91
7.2.6	Generación Unitaria	94
7.3	Descripción del predio de salta.....	95
7.3.1	Descripción general.....	95
7.3.2	Descripción del vertedero.....	95
7.3.3	Proyecto de recolección de biogás.....	96
7.3.4	Disposición de residuos en el vertedero	96
7.3.5	Composición de residuos	97
7.3.6	Generación de biogás.....	98
7.3.7	Generación Unitaria	99
7.4	Descripción del predio de Montevideo.....	100
7.4.1	Descripción general.....	100
7.4.2	Descripción del vertedero	100
7.4.3	Disposición de residuos.....	100
7.4.4	Proyecto de colección de biogás.....	102

7.4.5	Generación de biogás.....	102
7.4.6	Generación Unitaria	103
7.5	Comparación resultados	104
7.5.1	Descripción del análisis	104
7.5.2	Córdoba	105
7.5.3	Comparación con Olavarría.....	107
7.5.4	Comparación con Salta.....	108
7.5.5	Comparación con Montevideo.....	109
7.6	Análisis de resultados.....	111
Capítulo 8: Bases para el diseño del sistema de recolección de biogás		112
8.1	Caudales de diseño.....	112
Capítulo 9: Conclusiones finales.....		113
9.1	Condiciones de los residuos dispuestos.....	113
9.2	Potencial de generación de biogás.....	113
9.3	Comparación con otros casos de la región	113
9.4	Materia Práctica supervisada	113
Capítulo 10: Bibliografía		114
Anexo I: Tablas de cálculo de generación de biogás		116

Índice de Tablas

Tabla N° 2.1: Composición típica de gas de vertederos de RSU (Sharma y Reddy 2004)	13
Tabla N° 2.2: Consumo de agua para la reacción de degradación de los diferentes componentes de los residuos (Machado et al. 2009).	17
Tabla N° 2.3: posibles aplicaciones del biogás según su calidad (Ministry of Environment British Columbia, 2010)	18
Tabla N° 4.1: Datos históricos de tonelaje de residuos dispuestos en Córdoba.....	25
Tabla N° 4.2: Tasa de generación de residuos per cápita par la ciudad de Córdoba.....	26
Tabla N° 4.3: Proyección de la población de Córdoba para los años 2010 a 2016	27
Tabla N° 4.4: Generación mensual de residuos estimada para la ciudad de Córdoba	27
Tabla N° 4.5: Volúmenes total, utilizado y libre para el vertedero de Piedras Blancas	27
Tabla N° 4.6: Resultados de ensayos de compactación llevados a cabo por CReSE.....	28
Tabla N° 4.7: Intervalo de confianza de 95% para densidad de compactación húmeda y seca. 31	
Tabla N° 4.8: Proyección de vida útil del vertedero en base a la densidad promedio de los residuos	31
Tabla N° 4.9: Proyección de vida útil del vertedero en base a la densidad de límite inferior del intervalo de confianza de los residuos.....	32
Tabla N° 4.10: Cantidad de residuos depositados en el vertedero.....	32
Tabla N° 4.11: Coordenadas de los sondeos y ensayo de permeabilidad.....	33
Tabla N° 4.12: Determinación de la composición de los residuos (In Situ).....	35
Tabla N° 4.13: Clasificación de las muestras de residuos realizada en laboratorio	36
Tabla N° 4.14: Coordenadas del sondeo geoelectrico	43

Tabla N° 4.15: Ensayos de composición de abril de 2010 a marzo de 2011	45
Tabla N° 4.16: Ensayos de composición de junio de 2011 a mayo de 2012	45
Tabla N° 4.17: Ensayos de composición de junio de 2012 a agosto de 2013	46
Tabla N° 4.18: Ensayos de composición de septiembre de 2013 a noviembre de 2013.	46
Tabla N° 4.19: Ensayos de composición, valores promedio y de desvío estándar	47
Tabla N° 4.20: Valor Umbral de Información Pública (Reglamento 166/2006 (Parlamento Europeo, 2006) y Real Decreto 508/2007 (Ministerio de Medio Ambiente, España, 2007)) y valores analizados en el Relleno Sanitario de Piedras Blancas	50
Tabla N° 4.21: Límites de la Directiva TA-Luft (1996) y análisis del gas de venteo del Relleno Sanitario de Piedras Blancas,	51
Tabla N° 6.1: recopilación de valores de generación de gas.....	57
Tabla N° 6.2: Potencial de generación de metano de acuerdo al tipo de residuo.....	59
Tabla N° 6.3: Tasa de generación de metano k para diferentes niveles de precipitación anual.	59
Tabla N° 6.4: Valores del factor por adición de agua en base a las condiciones de operación del vertedero.....	60
Tabla N° 6.5: Categorización de residuos sólidos. (Ministry of Enviroment, British Columbia). 61	
Tabla N° 6.6 (continuación): Categorización de residuos sólidos. (Ministry of Enviroment, British Columbia).	62
Tabla N° 6.7: Tonelaje de residuos dispuestos de acuerdo a las 3 categorías de residuos	64
Tabla N° 6.8: Determinación de k y L ₀ para cada mes.....	65
Tabla N° 6.9: Valores representativos de k y L ₀ para Piedras Blancas	69
Tabla N° 6.10: Valores de k y L ₀ adoptados.....	70
Tabla N° 6.11: Tonelaje de residuos sólidos.....	70
Tabla N° 6.12: Tonelaje de residuos depositados.	71
Tabla N° 6.13: Producción Anual de Metano por unidad de residuo para residuos biodegradables.	72
Tabla N° 6.14: Producción Anual de Metano por unidad de residuo para residuos moderadamente biodegradables.....	72
Tabla N° 6.15: Cálculo de curva de generación de gas por tonelada de residuo	74
Tabla N° 6.16: Comparación de los resultados obtenidos mediante el modelo LandGEM	76
Tabla N° 6.17: Disposición de residuos con una variación de +/- 10%.	81
Tabla N° 6.18: Biogás total generado en base la variación en +/- 10% en la disposición de residuos sólidos.	81
Tabla N° 6.19: Variación del coeficiente de velocidad de generación de metano k en +/- 10%. 82	
Tabla N° 6.20: Biogás total generado y valor pico en base la variación k en +/- 10% de su valor promedio.	82
Tabla N° 6.21: Variación del potencial de generación de metano L ₀ en +/- 10%.	83
Tabla N° 6.22: Biogás total generado en base la variación L ₀ en +/- 10% de su valor promedio.	83
Tabla N° 6.23: Variación del Factor por adición de agua en -10%	84
Tabla N° 6.24: Generación total de biogás para diferentes valores del Factor por Adición de Agua	84
Tabla N° 6.25: Comparación de biogás total generado en base la variación de la disposición de residuos, factor por adición de agua, k y L ₀	85
Tabla N° 6.26: Generación total de biogás según cada modelo y generación unitaria de los mismos.	86
Tabla N° 6.27: Eficiencia de colección de biogás.....	87
Tabla N° 6.28: Potencial de colección de biogás del vertedero de Piedras Blancas	87
Tabla N° 6.29: Eficiencia de los sistemas de colección de gases.....	88
Tabla N° 7.1: Estimación de disposición de residuos para el vertedero de la ciudad de Olavarría.	91

Tabla N° 7.2: Emisiones base calculadas en Ton CO ₂ e.	92
Tabla N° 7.3: Parámetros utilizados. Fuente: informe del Banco Mundial	92
Tabla N° 7.4: Generación de biogás para el vertedero de Olavarría.....	93
Tabla N° 7.5: Generación unitaria de biogás para el vertedero de Olavarría.	94
Tabla N° 7.6: Disposición de residuos en el vertedero de la Ciudad de Salta	96
Tabla N° 7.7: Composición de residuos de varias ciudades de la República Argentina.	97
Tabla N° 7.8: Clasificación de residuos.....	97
Tabla N° 7.9: Parámetros utilizados en la determinación en la cantidad de metano	98
Tabla N° 7.10: Generación de biogás y metano en el vertedero de la Ciudad de Salta.....	98
Tabla N° 7.11: Generación unitaria de metano para el vertedero de Salta.....	99
Tabla N° 7.12: Disposición de residuos en el vertedero de la Ciudad de Montevideo.	101
Tabla N° 7.13: Parámetros k y L ₀ tenidos en cuenta en la determinación de la generación de Biogás.	102
Tabla N° 7.14: Generación de biogás y metano en el vertedero de la Ciudad de Montevideo.	103
Tabla N° 7.15: Generación unitaria de metano para el vertedero de Montevideo.	103
Tabla N° 7.16: Residuos Orgánicos dispuestos para el vertedero de Piedras Blancas.....	105
Tabla N° 7.17: Generación de biogás por tonelada de residuos para Córdoba	105
Tabla N° 7.18: Generación unitaria de los vertederos de Córdoba y Olavarría	107
Tabla N° 7.19: Generación unitaria de los vertederos de Córdoba y Salta	109
Tabla N° 7.20: Generación unitaria de los vertederos de Córdoba y Montevideo	110

Índice de Figuras

Figura N° 3.1: Ubicación del vertedero de Piedras Blancas	20
Figura N° 3.2 : Geomembrana utilizada en el fondo de la celda.....	21
Figura N° 3.3: Vista del fondo de la celda.	22
Figura N° 3.4: Chimenea de venteo de gases.....	23
Figura N° 4.1 : Ubicación relativa de los sondeos (S1, S2, S3, S4) y ensayo de permeabilidad in situ.....	33
Figura N° 4.2: Perforación y obtención de las muestras de residuo en: (a) Sondeo 2 (S ₂) y (b) Sondeo 4 (S ₄)	34
Figura N° 4.3: Clasificación de los residuos muestreados.	35
Figura N° 4.4: Variación del contenido de humedad con la profundidad para los sondeos 2 y 4.	37
Figura N° 4.5: Variación pasante Tamiz N°200 con la profundidad para el Sondeo 2 y Sondeo 4	37
Figura N° 4.6: Variación del contenido de materia orgánica con la profundidad para el Sondeo 2 y Sondeo 4.....	38
Figura N° 4.7: Variación del pH con la profundidad para el Sondeo 2 y Sondeo 4	38
Figura N° 4.8: Esquema representativo del ensayo de permeabilidad in situ	39
Figura N° 4.9: Fotografía tomada durante la realización del ensayo	40
Figura N° 4.10: Distribución de tamaños de partículas del suelo excavado durante la realización del pozo a cielo abierto	40
Figura N° 4.11: Variación del coeficiente de permeabilidad con el tiempo de permealdo para diferentes lecturas realizada	41
Figura N° 4.12: Dispositivo tetraelectrónico para la medida de la resistividad aparente del suelo	42
Figura N° 4.13: Ubicación relativa de la traza geoelectrica	43

Figura N° 4.14: Dispositivo tetraelectrónico para la medida de la resistividad aparente del suelo	44
Figura N° 4.15: Variación temporal de metano en los gases generados en el Relleno Sanitario de Piedras Blancas.....	48
Figura N° 4.16: Variación temporal de dióxido de azufre en los gases generados en el Relleno Sanitario de Piedras Blancas.	48
Figura N° 4.17: Variación temporal de sulfuro de hidrógeno en los gases generados en el Relleno Sanitario de Piedras Blancas.	49
Figura N° 4.18: Variación temporal de monóxido de carbono en los gases generados en el Relleno Sanitario de Piedras Blancas.	49
Figura N° 4.19: Variación temporal de óxidos de nitrógeno en los gases generados en el Relleno Sanitario de Piedras Blancas.	50
Figura N° 6.1: tasa de generación de residuos biodegradables y moderadamente biodegradables.	73
Figura N° 6.2: Tasa de generación por unidad de residuo.	73
Figura N° 6.3: Generación de biogás según el modelo de British Columbia.....	75
Figura N° 6.4: Generación de metano según el modelo de British Columbia.....	75
Figura N° 6.5 : Generación de biogás según el modelo LandGEM.....	76
Figura N° 6.6 : Estimación de la generación de metano mediante el modelo LandGEM.	77
Figura N° 6.7: Generación de biogás según la estimación alternativa utilizando el modelo LandGEM.....	77
Figura N° 6.8: Generación de biogás según la estimación alternativa utilizando el modelo LandGEM.....	78
Figura N° 6.9 : Generación de biogás según el modelo de orden cero.....	78
Figura N° 6.10 : Generación de metano según el modelo de orden cero.....	79
Figura N° 6.11: Generación de biogás según el modelo triangular.....	79
Figura N° 6.12: Generación de metano según el modelo triangular.	80
Figura N° 6.13 : Biogás generado calculado en base a una variación de los residuos de +/- 10%.	81
Figura N° 6.14 : Biogás generado calculado en base a una variación de k en +/- 10% de su valor promedio.....	82
Figura N° 6.15 : Biogás generado calculado en base a una variación de L_0 en +/- 10% de su valor promedio.....	83
Figura N° 6.16 : Comparación de biogás total generado en base a la variación de la disposición de residuos, factor por adición de agua, k y L_0	85
Figura N° 6.17 : Comparación de los valores de caudal pico en base a la variación de la disposición de residuos, factor por adición de agua, k y L_0	85
Figura N° 7.1: Ubicación del partido de Olavarría.....	89
Figura N° 7.2: Ubicación de la Ciudad de Salta	95
Figura N° 7.3: Ubicación del vertedero de Montevideo	100
Figura N° 7.4 : Generación unitaria de los vertederos de Córdoba y Olavarría.....	108
Figura N° 7.5 : Generación unitaria de los vertederos de Córdoba y Salta.....	108
Figura N° 7.6 : Generación unitaria de los vertederos de Córdoba y Montevideo.....	110

Capítulo 1: Introducción

1.1 Marco Institucional

El presente trabajo corresponde a la asignatura Práctica Supervisada de la carrera de Ingeniería Civil de Universidad Nacional de Córdoba.

El mismo fue realizado en el marco de un Convenio Específico celebrado entre la Municipalidad de Córdoba y la Universidad Nacional de Córdoba, con la participación de profesionales pertenecientes al Centro de Vinculación de Ingeniería Geoambiental, Medios Porosos y Flujos Subterráneos (IMPAS) de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (FCEfYN - UNC) y del Instituto Superior de Estudios Ambientales (UNC), con el fin de realizar un análisis y elaborar una propuesta de Proyecto de Cierre, Clausura y Post Clausura del vertedero de residuos sólidos Piedras Blancas, sitio destinado a la disposición de residuos sólidos de la ciudad de Córdoba y otras localidades del interior de la provincia de Córdoba.

Para ello el autor del presente informe colaboró en el proyecto como ayudante bajo la modalidad PSPI/B (Práctica Supervisada Pasante Interno/Becario) en el Centro de Vinculación de Ingeniería Geoambiental, Medios Porosos y Flujos Subterráneos, mediante el régimen de promoción de becas establecido por resolución N° 306 -HCD- 2009 de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

El Centro de Vinculación de Ingeniería Geoambiental, Medios Porosos y Flujos Subterráneos tiene como principal función promover y ejecutar actividades de desarrollo, transferencia y de servicios en el área de la geotecnología ambiental. Las líneas de trabajo en las que se especializa dicho centro son:

- Geotecnia Ambiental.
- Remediación de sitios contaminados.
- Modelación numérica de transporte de contaminantes y remediación de acuíferos.
- Disposición y aislación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU).
- Proyectos de Ingeniería Geotécnica.

El Centro de Vinculación fue constituido el 29/10/2010, por resolución 988-HCD-2010 el mismo es dirigido por Dr. Ing. Franco M. Francisca.

El equipo de trabajo que desarrolló el proyecto del cual forma parte esta práctica supervisada estuvo integrado por:

Dr. Ing. Franco M. Francisca

Dr. Ing. Marcos A. Montoro

Dra. Ing. Magalí E. Carro Pérez

Dr. Ing. Daniel A. Glatstein

Dr. Ing. Victor A. Rinaldi

Mg. Ing. Gerardo Hillman.

Dr. Ing. Julio A. Capdevila

Colaboradores:

Augusto Barraud.

Bernardo Begué Aliaga.

Joaquín González.

Manuel Alejandro Juarez.

Daniela Cemino.

Vanina Vico.

1.2 Objetivos del Proyecto

A fines de evaluar la potencialidad de generación, tratamiento y aprovechamiento de biogás del predio se plantean los siguientes objetivos específicos a cumplir en la realización de este trabajo:

- Cuantificar la cantidad de gas que potencialmente se generará en el predio.
- Evaluar si existe la necesidad de implementar un proceso de tratamiento del gas.
- Realizar una estimación de la generación total de biogás mediante la aplicación de diferentes modelos matemáticos y su posterior análisis.
- Estimar caudales de generación de biogás y su variabilidad a lo largo del tiempo, incluyendo el periodo post-clausura.
- Analizar la influencia que tiene la variabilidad de los diferentes parámetros involucrados en la producción de biogás.
- Realizar un análisis comparativo entre la cantidad de gas a generar estimada en el vertedero de Piedras blancas y otros verteros que ya cuenten con un sistema de recolección de biogás para establecer un marco de referencia de los resultados obtenidos.
- Realizar un análisis preliminar del volumen de gas efectivamente extraíble y sus posibles aplicaciones.

1.3 Descripción de las actividades realizadas durante la Práctica Supervisada

Todas las tareas realizadas en este proyecto fueron llevadas a cabo en el Centro de Vinculación de Ingeniería Geoambiental, Medios Porosos y Flujos Subterráneos de la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales (UNC) y el Instituto Superior de Estudios Ambientales de la Universidad Nacional de Córdoba.

Las principales tareas desarrolladas en esta práctica supervisada se resumen a continuación:

- Análisis de las condiciones de operación y disposición de los residuos en el vertedero de Piedras Blancas.
- Análisis y caracterización del biogás y de la masa de residuos dispuestos.
- Análisis de la composición de los residuos mediante los datos proporcionados por los operadores del predio y ensayos realizados por el equipo de trabajo.
- Determinación de la tasa de disposición de residuos y la vida útil del vertedero.
- Determinación de los parámetros que afectan la generación biogás.
- Cuantificación de la producción de biogás mediante el uso de diferentes modelos físico-matemáticos.

- Confección de análisis de sensibilidad de los parámetros analizados.
- Comparación de los resultados de generación obtenidos con otros vertederos similares de Olavarría, Salta y Montevideo.
- Cuantificación del volumen de gas efectivamente extraíble del predio mediante diferentes métodos.

1.4 Estructura del informe

El capítulo 1 presenta una introducción las actividades realizadas en la práctica supervisada, el contexto institucional en la cual esta fue realizada y la organización general del informe.

En el capítulo 2 se presenta el marco teórico del proceso de generación de biogás, la importancia de la valoración del mismo, los parámetros que lo afectan y las fases en la cual esto sucede.

El capítulo 3 muestra la descripción general del predio y sus condiciones de operación.

El capítulo 4 detalla los diferentes aspectos que involucran la caracterización del predio tales como tasa de disposición de residuos, vida útil del vertedero, ensayos físico químicos realizados sobre la masa de residuos y caracterización del biogás generado en el mismo.

El capítulo 5 describe los modelos físico- matemáticos considerados en la cuantificación de la generación de biogás, ventajas, desventajas de cada uno y los parámetros de los cuales dependen.

En el capítulo 6 se expone la metodología utilizada para obtener los parámetros de los distintos modelos y los resultados de la aplicación de los mismos. También se realiza un análisis de variabilidad de dichos parámetros y finalmente se realiza una síntesis y análisis de los resultados, en el cual se incluyen además los ensayos de composición de biogás realizados por el Centro de Ingeniería Química y Ambiental de la Universidad Tecnológica Nacional (CIQA – UTN).

En el capítulo 7 se realiza el análisis de otros proyectos de captación y tratamiento de biogás en la región y se compara la cantidad generada de biogás en dichos casos con los resultados obtenidos para el vertedero de Piedras Blancas

En el capítulo 8 se detalla una serie de pautas a tener en cuenta para el futuro diseño del sistema de recolección y tratamiento del biogás.

En el capítulo 9 se exponen las conclusiones finales del trabajo

Capítulo 2: Generación de Gases: Marco Teórico

2.1 Introducción

El gas producido en un vertedero es una secuencia de procesos físicos, químicos y biológicos desarrollados dentro del mismo. La composición del gas depende fuertemente de la composición y la antigüedad de los residuos depositados. El gas de vertedero está compuesto de varios gases que están presentes en grandes cantidades (gases principales) y de varios gases que están presentes en pequeñas cantidades (oligogases). Generalmente el gas de vertedero consiste en aproximadamente un 50% de gas metano (CH₄) y un 50% de dióxido de carbono (CO₂) (US EPA, 2005; Sharma y Reddy, 2004). En la Tabla N° 2.1 se muestra la composición típica de los gases que se encuentran en un vertedero de RSU.

Tabla N° 2.1: Composición típica de gas de vertederos de RSU (Sharma y Reddy 2004)

Componente	Porcentaje (base volumen seco)
Metano	45 – 60
Dióxido de carbono	40 – 60
Nitrógeno	2 – 5
Oxígeno	0,1 – 1,0
Sulfuros, disulfuros, mercaptanos, etc.	0 – 1,0
Amoníaco	0,1 – 1,0
Hidrógeno	0 – 0,2
Monóxido de carbono	0 – 0,2
Constituyentes en cantidades traza	0,01 – 0,6

Los componentes principales del gas son metano y dióxido de carbono, aunque más de cien compuestos diferentes fueron identificados en gases extraídos de vertederos (Tchobanoglous et al. 1993).

El metano es un potente gas de efecto invernadero, siendo su potencial de calentamiento global 21 veces mayor que el dióxido de carbono (Ministry of Environment Ontario, 2008). Ambos componentes principales son gases asfixiantes y en el caso del metano también inflamable (Irlanda EPA, 2000). Es por esto que existe un interés en su recolección y tratamiento.

Contar con un adecuado sistema de gestión de gases en las instalaciones de los vertederos de residuos sólidos urbanos durante la operación y luego de la clausura de los mismos es de fundamental importancia por los impactos que pueden tener el manejo incorrecto de los gases en el entorno. Entre los más importantes se pueden citar (USACE, 2013):

- El gas metano es altamente combustible generando un riesgo importante en el sitio e inmediaciones del sitio de disposición final de residuos.
- El gas puede infiltrar a través del suelo y migrar distancias significativas, expandiendo los riesgos.
- Dependiendo de la tasa de generación de gas, puede aumentar la presión en el depósito de residuos generando daños estructurales a las coberturas o a las barreras de fondo.
- El gas metano en grandes concentraciones presenta riesgos para seres humanos y animales.
- La migración del gas en los poros del suelo puede causar problemas en la vegetación circundante del sitio por menor disponibilidad de oxígeno para las raíces.

- El gas generado en el vertedero y venteado directamente a la atmósfera tiene olores desagradables generando impacto en los vecinos al predio.

Para lograr un buen sistema de gestión de gases resulta necesario estimar el volumen de gas que puede producir un sitio en particular. Por otro lado el dimensionamiento de las tuberías y equipos para tratamiento y aprovechamiento de gas requiere una estimación del caudal de gas generado y la variabilidad de este caudal con la edad del vertedero.

2.2 Factores que afectan la generación de biogás

La generación de gases en los vertederos es afectada por los siguientes factores (USACE, 2013):

- a) Disponibilidad de nutrientes
- b) Temperatura
- c) Humedad
- d) pH
- e) Condiciones atmosféricas
- f) Cobertura del vertedero
- g) Densidad de los residuos
- h) Edad de los residuos

Disponibilidad de nutrientes: las bacterias en los vertederos requieren la presencia de diferentes tipos de nutrientes para desarrollarse, los principales o macronutrientes incluyen carbono, hidrógeno, nitrógeno y fósforo, los micronutrientes o los que se requieren en menor cantidad incluyen sodio, potasio, sulfuro, calcio y magnesio. La disponibilidad de nutrientes afecta la cantidad de agua que se genera y la composición del gas. Los vertederos que utilizan suelo como cobertura diaria tienen un aporte adecuados de nutrientes para los procesos microbiológicos.

Temperatura: influencia el tipo de bacteria que es dominante y el nivel de producción de gas. La temperatura óptima para la descomposición aeróbica se encuentra en el rango entre 54 a 71° C mientras que para la descomposición anaeróbica entre 30 y 41° C.

La temperatura dentro del vertedero suele ser mayor que la del ambiente circundante, ya que la descomposición de residuos ocurre como un resultado de un proceso exotérmico. Esta tiende a estar influenciada por la profundidad a la que se encuentran los residuos. A mayor profundidad la temperatura tiende a equilibrarse, mientras que los residuos que se encuentran más cerca de la superficie están más influenciados por la temperatura ambiente y las condiciones climáticas. (Ministry of Environment British Columbia, 2010).

Humedad: es el parámetro más importante relativo al procedimiento de descomposición y la producción de gas. El contenido inicial de humedad de los residuos puede variar ampliamente entre un 15% y un 40%. A su vez, esta varía en los residuos ya depositados según la zona del vertedero en que se encuentre. Altos contenidos de humedad (50 a 60%) propicia la generación de condiciones anaeróbicas dentro del vertedero y favorece la generación de metano.

La humedad provee el ambiente acuoso necesario para la generación de gas y además sirve como medio de transporte de nutrientes y bacterias.

El contenido de humedad en un vertedero está fuertemente influenciado por las condiciones climáticas, contenido inicial de humedad en los residuos y por las características de diseño del vertedero tales como la barrera de fondo, el sistema de colección de lixiviados, tipo de cobertura y las condiciones de operación del sitio (Ministry of Environment British Columbia, 2010).

pH: Los materiales depositados en el vertedero pueden causar que el pH del lixiviado generado varíe ampliamente. Sin embargo, el pH de los residuos se suele encontrar en el rango entre 5 a

9. PH bajos indican condiciones ácidas que pueden remover metales que se convierten en tóxicos para las bacterias encargadas de la degradación. Durante la fase de descomposición anaeróbica este puede oscilar en un rango de entre 6 y 8.

Condiciones atmosféricas: Las condiciones atmosféricas afectan la temperatura, presión y contenido de humedad dentro del vertedero. Los sistemas de cobertura y las barreras de fondo del mismo ayudan a aislar los residuos de las condiciones atmosféricas limitando la intrusión de oxígeno, la infiltración proveniente de las precipitaciones y amortiguando los cambios de temperatura externos.

- **Temperatura ambiente:** Las temperaturas características de climas fríos reducen la actividad biológica en las capas superficiales de residuos, reduciendo el volumen de gas generado. Sin embargo, a mayor profundidad estos efectos son superados por el calor generado por la actividad de descomposición biológica. Los principales factores que afectan la temperatura son la profundidad del vertedero, la densidad de los residuos, humedad y el clima.
- **Presión:** la presión atmosférica puede tener efecto menor en la velocidad a la cual el biogás liberado a la atmosfera. Una disminución de la presión barométrica resulta en un aumento temporario de producción de gas y lo contrario ocurre si la presión aumenta.
- **Precipitación:** La precipitación afecta dramáticamente el proceso de generación de biogás aportando agua mediante la infiltración de la misma a través de los sistemas de cobertura y llevando oxígeno disuelto con ella. Altos niveles de precipitación pueden incluso inundar ciertos sectores del vertedero impidiendo en consecuencia el flujo de gas. La cantidad de agua infiltrada que llega a los residuos depende principalmente del diseño del sistema de cobertura del vertedero y de la gestión de las aguas de escorrentía superficial.

Densidad de los residuos: La densidad de los residuos dispuestos puede ser muy variable, dependiendo principalmente de su composición y de la energía de compactación empleada.

Edad de los residuos: Una vez que se establecen las condiciones anaeróbicas, la generación de biogás debería ser significativa por al menos 10 o 20 años. A medida que los residuos dispuestos envejecen, disminuye en estos la capacidad de producir gas.

2.3 Fases de la de generación de gas

La generación de gas se produce por tres mecanismos diferentes:

- a) Evaporación/volatilización
- b) Reacciones químicas
- c) Degradación biológica

Evaporación/Volatilización: el gas se produce cuando los compuestos orgánicos volátiles dentro del vertedero se volatilizan hasta que la concentración de vapor en la fase gaseosa alcanza un nuevo equilibrio. El proceso es acelerado cuando los residuos se vuelven biológicamente activos como resultados del incremento de temperatura debido a la actividad bacteriana. La tasa a la cual se vaporizan los compuestos depende de las características químicas de los mismos.

Reacciones químicas: pueden ocurrir entre diferentes materiales y elementos presentes en los residuos y como resultados puede generar gases. Suelen ocurrir cuando dos materiales incompatibles se desechan en forma incorrecta.

Degradación Biológica: los rellenos sanitarios producen grandes cantidades de biogás, siendo sus mayores componentes metano y dióxido de carbono. La generación de gas ocurre como

resultado la acción de bacterias que descomponen la materia orgánica tanto en condiciones aeróbicas como anaeróbicas.

De todos los mecanismos el más importante en la generación de gas es el de degradación biológica. La generación de gas por degradación biológica se produce en cinco o menos fases secuenciales:

Fase I. Ajuste inicial. En esta fase se produce descomposición biológica bajo condiciones aerobias debido a que generalmente siempre queda una cierta cantidad de aire atrapado dentro del vertedero. La fuente principal de organismos aerobios y anaerobios es el material del suelo que se utiliza como cobertura diaria y final. Otras fuentes de organismos es la recirculación de lixiviado.

Fase II. Fase de transición. En esta fase disminuye la concentración de oxígeno y comienzan a desarrollarse las condiciones anaerobias. Los miembros de la comunidad microbiana responsables de la conversión de material orgánico de los RSU en metano y dióxido de carbono empiezan un proceso de tres pasos, con la conversión de material orgánico complejo en ácidos orgánicos y otros productos intermedios, como se describe en la fase III.

Fase III. Fase ácida. Aquí se acelera la actividad microbiana iniciada en la fase II con la producción de cantidades significativas de ácidos orgánicos y pequeñas cantidades de gas hidrógeno. El primer paso en el proceso de tres pasos implica la transformación, mediada por enzimas (hidrólisis), de compuestos de alto peso molecular en compuestos aptos para ser utilizados por los microorganismos como fuentes de energía y de carbono celular. El segundo paso en el proceso (acidogénesis) implica la conversión microbiana de los compuestos resultantes del primer paso en compuestos intermedios de bajo peso molecular, como son el ácido acético y las pequeñas concentraciones de ácido fúlvico y otros ácidos más complejos. El dióxido de carbono es el principal gas generado durante la fase III. También se producirán cantidades más pequeñas de gas hidrógeno. Los microorganismos implicados en la conversión, llamados colectivamente no metanogénicos, son las bacterias anaerobias facultativas y obligadas.

El pH del lixiviado, disminuirá hasta un valor de 5 o menos, por la presencia de ácidos orgánicos y por las elevadas concentraciones de CO₂ dentro del vertedero, en forma simultánea aumentará la demanda química y bioquímica de oxígeno y también se solubilizarán algunos constituyentes inorgánicos, principalmente metales pesados, debido a los bajos valores de pH del lixiviado.

Fase IV. Fase de fermentación del metano. En esta fase, un segundo grupo de microorganismos convierten el ácido acético y gas hidrógeno producidos por los formadores de ácidos en la fase ácida en CH₄ y CO₂. En algunos casos, estos microorganismos comenzarán a desarrollarse hacia el final de la fase III. En la fase IV la formación de metano y ácido se produce simultáneamente, aunque la velocidad de formación de ácidos es considerablemente más reducida.

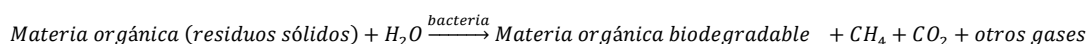
En esta etapa el pH dentro del vertedero subirá a valores en el rango de 6,8 a 8 debido a que los ácidos y el gas de hidrógeno producidos se convierten en CH₄ y CO₂ en la fase IV.

Fase V. Fase de maduración. La fase V se produce después de convertirse el material orgánico biodegradable en CH₄ y CO₂ durante la fase IV. Mientras la humedad sigue migrando a través de los residuos, se convierten porciones de material biodegradable que anteriormente no estaban disponibles. Durante la fase V la velocidad de generación del gas de vertedero disminuye significativamente, porque la mayoría de los nutrientes disponibles se han separado con el lixiviado durante las fases anteriores, y los sustratos que quedan en el vertedero son de una degradación lenta. Los principales gases del vertedero que han evolucionado en la fase V son

CH₄ y CO₂. Según las medidas de sellado del vertedero, también puede encontrarse pequeñas cantidades de nitrógeno y oxígeno en el gas del vertedero. Durante la fase de maduración, el lixiviado a menudo contendrá ácidos húmico y fúlvico, que son difíciles de degradar biológicamente.

La duración de las fases individuales de producción del gas de vertedero variará según la distribución de los componentes orgánicos en el vertedero, la disponibilidad de nutrientes, el contenido de humedad de los residuos, el paso de la humedad por el relleno y el grado de compactación inicial (Tchobanoglous et al. 1993).

La reacción química generalizada para la descomposición anaerobia de residuos sólidos puede escribirse de la forma siguiente:



De acuerdo a la reacción de formación de gas, para que la misma ocurra se requiere consumo de agua. La cantidad de agua necesaria para la producción de gas, depende del tipo de residuo. En la Tabla N° 2.2 se muestra la cantidad de agua requerida en base a peso de residuo seco para degradar los distintos componentes típicos de un residuo.

Tabla N° 2.2: Consumo de agua para la reacción de degradación de los diferentes componentes de los residuos (Machado et al. 2009).

Componente orgánico del residuo	Consumo de agua en Kg por Kg de residuo seco.
Residuo de comida	0.26
Papel	0.20
Cartón	0.16
Textil	0.41
Cuero	0.64
Residuos de jardín	0.28
Madera	0.24

2.4 Capacidad calorífica del biogás y sus potenciales usos

Debido a su alto contenido de metano el biogás es altamente combustible, con un poder calorífico que oscila entre 15 a 21 MJ/m³, aproximadamente la mitad de la capacidad calorífica del gas natural (Irlanda EPA, 2000). Debido a esto entre sus principales aplicaciones se encuentra la producción de energía eléctrica mediante su incineración, y en menor medida es utilizado como gas natural posteriormente a su refinamiento, así como combustible en vehículos, hornos o calderas. (Ministry of Environment British Columbia, 2010).

La utilización del biogás para la producción de energía eléctrica tiene como beneficio adicional el suplantar en parte el uso de combustibles fósiles. Se considera que la producción mediante la quema de biogás es más limpia que esta última (Ministry of Environment British Columbia, 2010).

Las posibles aplicaciones del biogás dependen de varios factores, entre los que se pueden citar:

- Nivel de concentración de sustancias que condicionan su aplicación tales como compuestos halogenados, siloxanos, contenido de humedad, contenido de partículas y componentes sulfúricos.

- Grado de tratamiento que se requiere para remover dichas sustancias.
- Cantidad de biogás producido y escala del proyecto.
- Poder calorífico del biogás.
- Viabilidad económica y precio de venta de la energía producida.

Generalmente, el combustible derivado del biogás puede ser clasificado dentro de tres categorías, teniendo en cuenta el nivel de tratamiento y calidad requerida para cada aplicación. La Tabla N° 2.3 describe las categorías por grado de combustión y sus posibles usos.

Tabla N° 2.3: posibles aplicaciones del biogás según su calidad (Ministry of Environment British Columbia, 2010)

Calidad del combustible derivado del biogás	Aplicaciones
Combustible de bajo poder calorífico	Combustible para calderas, hornos y microturbinas.
Combustible de mediano poder calorífico	Combustible para calderas industriales, motores reciprocantes, turbinas de gas y de ciclos combinados.
Combustible de alto poder calorífico	Posibilidad de mejoramiento del biogás para utilizado como gas natural, en celdas de combustible y como combustible para vehículos.

El poder calorífico del combustible derivado depende principalmente de su contenido de metano. Los que se ubican en la categoría de bajo y medio grado de combustión poseen un poder calorífico que ronda los 16,8 MJ/m³. Si se aplica la remoción del dióxido de carbono a combustibles de alto poder calorífico, este puede alcanzar los 37,3 MJ/m³, pudiendo llegar a ser un sustituto directo del gas natural.

2.5 Síntesis de aspectos relevantes

A modo de resumen, entre los aspectos más relevantes mencionados en este capítulo se pueden citar:

- El biogás está compuesto de varios gases, siendo los principales el gas metano (CH₄), con valores que oscilan entre el 40% y 60 % en volumen y dióxido de carbono (CO₂), cuya concentración se ubica entre el 45% y 60%.
- El metano es un potente gas de efecto invernadero, siendo su potencial de calentamiento global 21 veces mayor que el dióxido de carbono. Ambos componentes principales son gases asfixiantes y en el caso del metano también inflamable por lo que existe un gran interés en su recolección y tratamiento.
- Los factores que afectan la producción de biogás son la humedad, la composición de los residuos, condiciones atmosféricas, la edad de los residuos y la densidad de los mismos, siendo los más determinantes la composición de los residuos y el contenido de humedad de estos.
- El mecanismo de generación de biogás más relevante es el de degradación biológica. Este mecanismo puede ser dividido en cinco fases, cuya duración variará según la

distribución de los componentes orgánicos en el vertedero, la disponibilidad de nutrientes, el contenido de humedad de los residuos, el paso de la humedad por el relleno y el grado de compactación inicial.

- Con un poder calorífico que oscila entre 15 a 21 MJ/m³, el biogás tiene numerosas aplicaciones, siendo la más frecuente su incineración para producir de energía eléctrica. Los principales factores que inciden en su aplicación uso son el volumen de gas generado, su poder calorífico, grado de pre tratamiento necesario y la viabilidad económica del proyecto.

Capítulo 3: Descripción del Predio

3.1 Ubicación del Vertedero de Piedras blancas

El predio de enterramiento transitorio denominado “Piedras Blancas” se encuentra localizado en la zona sur de la ciudad de Córdoba, sobre la vera de la Ruta RN 36, Latitud 31°30’ Sur, Longitud 64°13’ Oeste. A una distancia de 5,8 Km de la avenida de Circunvalación y a 2,2 km del Barrio Nuestro Hogar III en el extremo sur de la ciudad.

El predio está conformado por 60 hectáreas, la denominación catastral del mismo es Distrito 32, Zona 09, Manzana 01. De acuerdo a lo comunicado por los operadores del predio, los planes de trabajo prevén que la fosa de enterramiento de residuos ocupe una superficie de aproximadamente 25 hectáreas. En la Figura N° 3.1 se muestra la ubicación relativa del predio en la ciudad de Córdoba.

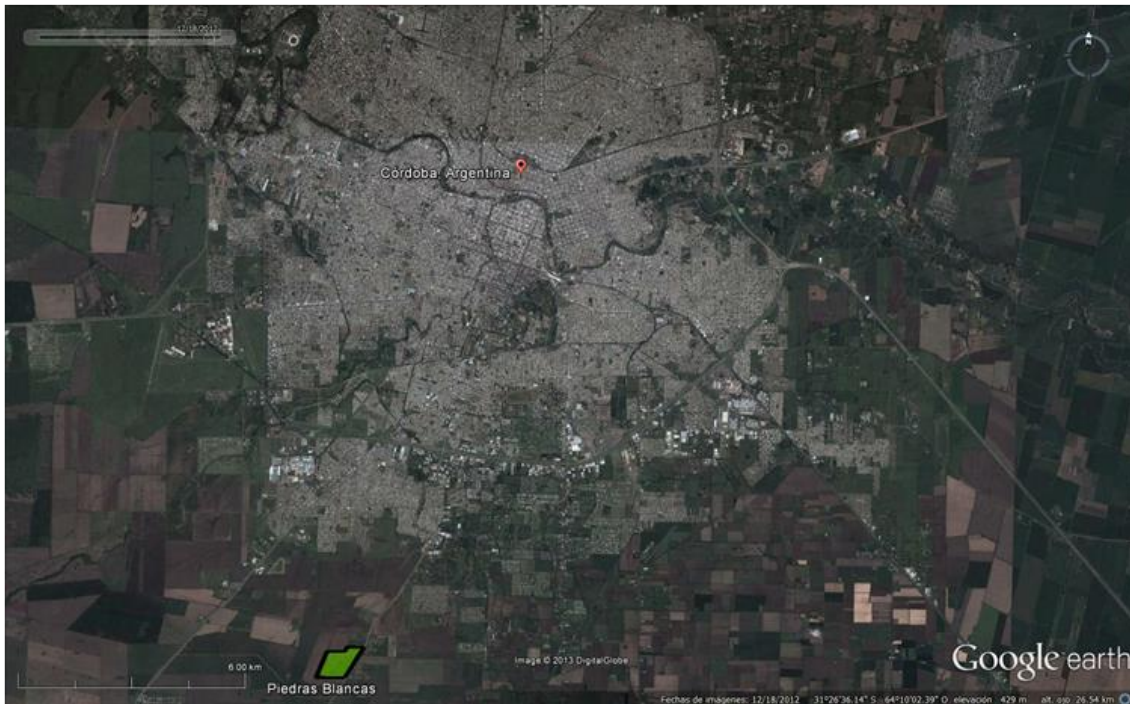


Figura N° 3.1: Ubicación del vertedero de Piedras Blancas

En este predio se depositan los residuos de la ciudad de Córdoba, y de dieciocho municipios del área metropolitana de Córdoba: Villa General Belgrano, La Falda, La Calera, Despeñaderos, Ríos Ceballos, Unquillo, Corralito, La Cumbrecita, Saldán, Malvinas Argentinas, Villa Allende, Alta Gracia, José de la Quintana, Santa Mónica, Valle de Anisacate, Los Aromos, La Bolsa, Estación Juárez Celman.

3.2 Operación y condiciones del sitio

El predio de enterramiento transitorio comenzó a funcionar en Abril del año 2010. Para la primera etapa de operación del sitio y debido al escaso tiempo disponible para la construcción y acondicionamiento del sitio se comenzó a operar con una celda excavada de 135 metros de ancho por 69 metros de largo y con una profundidad de 11 metros.

Se indica que el suelo disponible en el sitio presenta una conductividad hidráulica entre 1×10^{-5} cm/s y 9×10^{-5} cm/s. Según el informe final del Proyecto de Cierre, Clausura y Post-Clausura, los mismos fueron determinados durante las etapas de proyecto del enterramiento en permeámetros de pared flexible en muestras extraídas a 4 y 8 metros de profundidad. Las determinaciones fueron realizadas por el Laboratorio de Geotecnia de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba.

En forma complementaria, el fondo de la celda debería ser compactado por encima del 90% del peso unitario máximo obtenido en un ensayo de compactación Proctor estándar. El peso unitario seco máximo obtenido resultó aproximadamente $1,55 \text{ tn/m}^3$. Una densidad relativa del 90% estaría resultando en pesos unitarios de suelos compactadas muy similares al peso unitario natural del material (experiencia de resultados obtenidos en el laboratorio de Geotecnia de la FCEfyN-UNC).

Para mitigar la migración de lixiviados y gases en el subsuelo sobre la base compactada se proyectó una impermeabilización, la que se materializa mediante la colocación de una geomembrana flexible de PEAD de 1,4 mm de espesor. A efectos de proteger la geomembrana de posibles daños por punzonamiento, sobre la misma se dispone un geotextil de espesor mínimo de 3 mm. Los paños de las geomembrana se solaparon y se soldaron entre ellos. Todos los trabajos de impermeabilización están sujetos a control de calidad. Para el caso particular de las soldaduras de las geomembranas el proyecto especifica la realización de ensayos de corte (ASTM D 6398) y ensayos de laminación o desprendimiento (ASTM D 413) en muestras obtenidas directamente de la obra. Finalmente el aviso de proyecto indica que se debe cubrir el geotextil con una capa de suelo compactada con un espesor mínimo de 0,40 metros, tanto en el fondo de la fosa como en los taludes, no especificándose el peso unitario que debe alcanzar esta capa de suelo compactado (según el citado informe final del proyecto se verificó en repetidas ocasiones que este aspecto no se pudo respetar).

En la Figura N° 3.2 se muestra una fotografía de la geomembrana utilizada para impermeabilizar las celdas y en la Figura N° 3.3 se muestra una fotografía de la celda en operación en donde se puede apreciar claramente el sector de la celda impermeabilizado y la berma de fondo para separar aguas de lluvias con aguas de lixiviación a través de la pila de residuos.



Figura N° 3.2 : Geomembrana utilizada en el fondo de la celda.



Figura N° 3.3: Vista del fondo de la celda.

3.3 Ingreso y gestión de residuos sólidos

Los vehículos cargados con los residuos ingresan al predio por una única entrada, pasan por una báscula para registrar su peso y descargan en el frente de trabajo. También existen datos de análisis de composición de residuos mensuales desde abril del año 2010. La ejecución de estos ensayos están a cargo del operador del predio, la empresa Córdoba Recicla Sociedad del Estado (CReSE).

En lo que respecta a la densidad de compactación de los residuos sólidos en la celda, de acuerdo al plan de trabajo presentado en el aviso de proyecto, los residuos se deben descargar en el frente de trabajo, luego los mismos debieran ser distribuidos por una topadora conformando capas de no más de 30 cm de espesor para su posterior compactación. Según lo indicado en el aviso de proyecto, el espesor máximo de la capa a compactar no debe ser superior a 60 cm, en tanto que la altura máxima de residuos compactados permitida entre coberturas es de 1,5 metros.

La tapada diaria se realiza con suelo propio del lugar en capas de espesores de 20 centímetros. La cobertura debe realizarse con frecuencia diaria o cuando la altura de residuos compactados alcance 1,5 metros de espesor, cuidando que toda la superficie de los residuos quede cubierta. El aviso de proyecto estima un peso unitario de la tapada diaria de 900 Kg/m³.

De acuerdo a la información aportada, la empresa CReSE realiza ensayos periódicos de compactación de residuos con una frecuencia promedio de 15 días, registrándose las densidades húmedas y secas de los residuos analizados.

3.4 Gestión de lixiviados

Para el sistema de gestión de lixiviados propuesto para el enterramiento de Piedras Blancas se ejecutó la excavación de las celdas con pendiente hacia uno de los vértices de manera de facilitar el escurrimiento de los líquidos hacia el punto de extracción, en esos sectores se instala el sistema de extracción.

A fines de separar aguas de lluvia de los líquidos lixiviados se disponen a distancia adecuada, sobre el fondo de las celdas, bermas que permiten contener los lixiviados que fluyen desde el frente de trabajo, aunque no se especifica la separación precisa entre bermas.

El sistema recolector consta de una tubería de poliéster reforzado con fibra de vidrio de 350 mm de diámetro. Esta tubería se coloca recostada sobre uno de los taludes de la excavación, concurrente con el vértice más profundo.

Los primeros tres metros del conducto se perforan para permitir la captación de los líquidos.

Durante la operación del sitio no se llevan registros de los volúmenes de lixiviados generados. Según CRESE indica por nota con fecha de 18 de diciembre 2013 que los lixiviados generados en el frente de trabajo son bombeados y reinyectados en la zona de la celda ya cerrada.

3.5 Gestión de gases

Para la gestión de gases se instalaron tuberías subterráneas perforadas para permitir el desfogue seguro del gas. Estas tuberías finalizan aproximadamente un metro por sobre el nivel actual de la cobertura de la celda. El venteo de gases no cuenta con sistema de tratamiento alguno. En la Figura N° 3.4 se muestra una fotografía de la chimenea de venteo de gases. Se realizó una caracterización de las corrientes gaseosas por el Centro de Investigación y Transferencia en Ingeniería Química y Ambiental (CIQA) perteneciente a la Universidad Tecnológica Nacional-Facultad Regional de Córdoba. Esta caracterización se llevó a cabo desde 2010 con un promedio de tres mediciones anuales.



Figura N° 3.4: Chimenea de venteo de gases

3.6 Síntesis del capítulo

A modo de resumen se pueden resaltar ciertos aspectos sobre lo comentado acerca de la gestión del relleno sanitario:

- Los residuos que ingresan al predio son vertidos en el frente de trabajo y luego compactados. No existe ningún tipo de tratamiento o separación de los mismos.
- Se prevé una tapada diaria con suelo propio del lugar en capas de espesores de 20 centímetros, la cual se realiza diariamente o cuando el espesor de la capa de residuos alcance 1,50 m.
- La cobertura de fondo de la celda está formada por suelo del lugar compactado. Sobre estas se extiende una geomembrana PEAD de 1,4mm de espesor y un geotextil para prevenir la migración de gases y lixiviados. Sobre estos debe ir una cobertura con suelo de lugar de aproximadamente 0,40m la cual no ha sido colocada en su totalidad.
- La recolección de lixiviados se realiza mediante una tubería la cual se coloca recostada sobre uno de los taludes de la excavación, concurrente con el vértice más profundo. Los mismos luego son bombeados y reinyectados en la zona de la celda ya cerrada.
- La extracción del gas generado se realiza a través de un conjunto de tuberías que finalizan en una chimenea a un metro por encima de la superficie de la celda. El mismo es venteado libremente a la atmósfera y no cuenta con tratamiento alguno.

Capítulo 4: Caracterización del predio

4.1 Tonelaje de los residuos dispuestos:

El vertedero de Piedras Blancas comenzó a recibir residuos sólidos en el mes de abril de 2010 y se pretende que funcione hasta el año 2015 inclusive. Al momento de la confección del informe de esta Práctica Supervisada y debido a los retrasos en la apertura del nuevo predio de tratamiento, la Municipalidad de Córdoba y CreSe han tomado medidas para ampliar la capacidad del predio de Piedras Blancas y poder prolongar la vida útil del mismo hasta fines del año 2016.

La estimación de generación de residuos sólidos depositados en el vertedero de Piedras Blancas se puede realizar en base a datos históricos recopilados de generación de residuos en Córdoba. En la Tabla 4.1 se muestran los datos disponibles entre los años 1988 y 2012.

Tabla N° 4.1: Datos históricos de tonelaje de residuos dispuestos en Córdoba.

Año	Población	Total	Residuos	Residuos de Barrido
		Residuos [Tn]	escombros [Tn]	urbano y poda [Tn]
1988		201500		
1989		178500		
1990		190000		
1991		228400		
1992		287700		
1993		325300		
1994		428800		
1995		390000		
1996		379000		
1997		443800		
1998		529200		
1999	1262815	708380	79187	259866
2000	1273652	821580	73057	337834
2001	1284582	770721	45082	320163
2004	1317938	601709	27165	218539
2005	1329249	648571	35789	219146
2006	1340656	793943	38395	344748
2007	1352161	846807	35891	380451
2008	1315540	934659	32366	184902
2009	1315540	670547	20547	117086
2010	1329604	577794	8741	29845
2011	1329604	769142	76209	252914
2012	1329604	366263	46365	87245

Evaluación de generación de biogás en el vertedero de Piedras Blancas, Córdoba.

En base los datos de deposición de residuos y los datos sobre la población de la Ciudad de Córdoba es posible determinar la tasa de generación per cápita promedio. Para la estimación de la cantidad de residuos generados se utiliza la tasa de generación sin escombros que corresponde a la calculada en base a los residuos totales menos los residuos provenientes de escombros. En la Tabla N° 4.2 se muestran los resultados obtenidos para las tasas de generación domiciliaria de residuos considerando únicamente residuos sólidos urbanos, escombros y residuos de poda y barrido urbano.

Por otra parte, es necesario realizar una estimación de la población de la Ciudad de Córdoba para los años durante los cuales se estime que va a funcionar el vertedero. Esto se realiza tomando como dato la población del año 2010, la cual se estima en 1.329.604 habitantes y la tasa de crecimiento la población intercensal (0,0063).

En la Tabla N° 4.3 se muestran los resultados obtenidos para la proyección de población de la ciudad de Córdoba entre 2010 y 2016. Estos datos fueron obtenidos del informe “Estudio de sitios para la localización del centro de tratamiento y disposición final de residuos sólidos urbanos para el área metropolitana de la ciudad de Córdoba” del año 2012.

Tabla N° 4.2: Tasa de generación de residuos per cápita par la ciudad de Córdoba

Año	Población	Total Residuos [Tn]	Residuos de escombros [Tn]	Residuos de Barrido urbano y poda [Tn]	Tasa generación domiciliaria [Kg/hab/día]	Tasa generación Total [Kg/hab/día]	Tasa generación sin escombros [Kg/hab/día]
1999	1262815	708380	79187	259866	0,801	1,537	1,365
2000	1273652	821580	73057	337834	0,881	1,767	1,610
2001	1284582	770721	45082	320163	0,865	1,644	1,548
2002	1295606	529206	21400	182410	0,688	1,119	1,074
2003	1306725	570538	21860	227563	0,673	1,196	1,150
2004	1317938	601709	27165	218539	0,738	1,251	1,191
2005	1329249	648571	35789	219146	0,811	1,337	1,263
2006	1340656	793943	38395	344748	0,839	1,622	1,544
2007	1352161	846807	35891	380451	0,872	1,716	1,643
2008	1315540	934659	32366	184902	1,490	1,947	1,879
2009	1315540	670547	20547	117086	No Disponible	No Disponible	No Disponible
2010	1329604	577794	8741	29845	No Disponible	No Disponible	No Disponible
2011	1329604	769142	76209	252914	0,907	1,947	1,428
2012	1329604	366263	46365	87245	No Disponible	No Disponible	No Disponible
Promedio					0,870	1,553	1,427

Tabla N° 4.3: Proyección de la población de Córdoba para los años 2010 a 2016

Año	Población
2010	1329604
2011	1337980
2012	1346410
2013	1354892
2014	1363428
2015	1372018
2016	1380661

Por último se procede a multiplicar la tasa de generación sin escombros promedio per cápita con los datos sobre la población para calcular la generación mensual de residuos de la Ciudad de Córdoba. La cantidad de residuos generados se presenta en la Tabla N° 4.4.

Tabla N° 4.4: Generación mensual de residuos estimada para la ciudad de Córdoba

Año	Población	Tasa de generación domiciliaria [kg/hab/día]	Residuos generados [Tn/mes]
2010	1329604	1,427	56914
2011	1337981	1,427	57272
2012	1346410	1,427	57633
2013	1354892	1,427	57996
2014	1363428	1,427	58361
2015	1372018	1,427	58729
2016	1380661	1,427	59099
		Promedio	58001

La tasa de generación calculada para los diferentes años de operación presenta una gran coincidencia con la informada por los operadores del predio. Esta última es de 60.000 toneladas por mes en promedio.

4.2 Determinación del volumen del vertedero

En base a los relevamientos topográficos realizados en agosto de 2013 en el vertedero, y también a las proyecciones sobre el volumen a utilizar, fue posible determinar el volumen de los residuos depositados y el volumen libre proyectado. En la Tabla N° 4.5 se muestra el volumen total de la celda, el volumen utilizado y el volumen disponible

Tabla N° 4.5: Volúmenes total, utilizado y libre para el vertedero de Piedras Blancas

Volumen Total del Vertedero	4.783.746 m ³
Volumen Utilizado	2.791.626 m ³
Volumen libre proyectado	1.992.120 m ³

4.2.1 Determinación de densidad in- situ de los residuos del vertedero

La empresa operadora del enterramiento, CReSE realizó dos ensayos mensuales de compactación de residuos entre marzo de 2010 y diciembre de 2013, con una diferencia promedio de 14 días entre cada ensayo. Para cada ensayo se extrajeron 5 muestras de residuos del vertedero determinándose como resultado del ensayo la densidad de compactación en base húmeda y en base seca promedio. En la Tabla N° 4.6 se indican los resultados de densidad de residuos informados por CReSE.

Tabla N° 4.6: Resultados de ensayos de compactación llevados a cabo por CReSE.

Fecha de Ensayo	Densidad de compactación húmeda [kg/m ³]	Densidad de compactación seca [kg/m ³]
10/03/2010	1235	1114
29/03/2010	1239	1111
13/04/2010	1358	1217
29/04/2010	1255	1126
10/05/2010	1184	1074
27/05/2010	1259	1117
11/06/2010	1270	1122
28/06/2010	1246	1085
05/07/2010	1332	1057
22/07/2010	1324	1181
09/08/2010	1328	1178
24/08/2010	1345	1188
07/09/2010	1304	1151
28/09/2010	1234	1080
06/10/2010	1239	1106
20/10/2010	1215	1088
03/11/2010	1258	1116
18/11/2010	1221	1092
10/12/2010	1233	1099
04/01/2011	1287	1150
21/01/2011	1287	1142
08/02/2011	1326	1181
25/02/2011	1285	1145
14/03/2011	1272	1128
30/03/2011	1306	1148
14/04/2011	1295	1143
29/04/2011	1271	1115
14/05/2011	1326	1171
31/05/2011	1313	1157

Tabla 4.6 (continuación): Resultados de ensayos de compactación llevados a cabo por CReSE.

Fecha de Ensayo	Densidad de compactación húmeda [kg/m ³]	Densidad de compactación seca [kg/m ³]
14/06/2011	1230	1093
29/06/2011	1295	1141
12/07/2011	1247	1101
29/07/2011	1299	1144
16/08/2011	1169	1052
30/08/2011	1210	1086
16/09/2011	1180	1053
14/10/2011	1309	1156
31/10/2011	1325	1168
15/11/2011	1223	1087
30/11/2011	1304	1148
13/12/2011	1247	1101
30/12/2011	1307	1154
02/01/2012	1304	1164
16/01/2012	1277	1133
01/02/2012	1328	1183
14/02/2012	1285	1145
05/03/2012	1269	1126
20/03/2012	1310	1151
09/04/2012	1295	1144
12/04/2012	1195	1016
24/04/2012	1270	1114
27/04/2012	1278	1114

Tabla 4.6 (continuación): Resultados de ensayos de compactación llevados a cabo por CReSE.

Fecha de Ensayo	Densidad de compactación húmeda [kg/m ³]	Densidad de compactación seca [kg/m ³]
08/05/2012	1268	1090
24/05/2012	1294	1162
06/06/2012	1253	1073
29/06/2012	1322	1078
13/07/2012	1295	1071
27/07/2012	1396	1242
23/08/2012	1235	1079
30/08/2012	1304	1120
14/09/2012	1286	1064
27/09/2012	1233	1011
18/10/2012	1164	949
25/10/2012	1238	999
08/11/2012	1247	984
22/11/2012	1180	967
11/12/2012	1094	943
28/12/2012	1098	936
08/01/2013	1039	906
22/01/2013	1069	918
05/02/2013	833	749
19/02/2013	796	697
10/09/2013	943	854
18/09/2013	920	835
10/10/2013	919	835
24/10/2013	927	838
14/11/2013	883	804
29/11/2013	930	848
13/12/2013	922	837
27/12/2013	943	857
Promedio	1215,43	1066,28
Desvío estándar	135,18	117,08

Asumiendo una distribución normal de los resultados se puede calcular los valores extremos de un intervalo de confianza de 95% para los valores de densidad de los residuos. En la Tabla N° 4.7 se muestran estos parámetros.

Tabla N° 4.7: Intervalo de confianza de 95% para densidad de compactación húmeda y seca.

	Densidad de compactación húmeda [kg/m ³]	Densidad de compactación seca [kg/m ³]
Límite Superior	1480,37	1295,75
Límite Inferior	950,48	836,80
Promedio	1215,43	1066,28

4.2.2 Proyección de la vida útil del vertedero

Considerando el volumen libre proyectado y la tasa de generación de residuos es posible calcular el tiempo necesario para que se agote la capacidad de recepción de residuos del predio. En la Tabla N° 4.8 se muestra el cálculo de tiempo de vida útil del vertedero en base a la densidad promedio de los residuos.

Tabla N° 4.8: Proyección de vida útil del vertedero en base a la densidad promedio de los residuos

Año	Tasa de generación [Ton/mes]	Meses en Funcionamiento	Densidad Promedio [kg/m ³]	Volumen Disponible [m ³]	Volumen Ocupado [m ³]
2013	60000	3	1215,43	1.992.120	148096
2014	60000	12	1215,43	1.844.024	592383
2015	60000	12	1215,43	1.251.641	592383
2016	60000	12	1215,43	659.258	592383
2017	60000	1	1215,43	66.875	49365
2018	60000	0	1215,43	17.510	0

Si se tiene en cuenta los parámetros promedio es posible deducir que el vertedero podrá funcionar hasta enero de 2017, sin embargo para considerar un margen de seguridad más conservador, se puede realizar el mismo análisis tomando como parámetros la densidad y la tasa de generación para el límite inferior en base a los ensayos de densidad. En la Tabla N° 4.9 se muestra el cálculo de tiempo de vida útil del vertedero en base a la densidad de límite inferior del intervalo de confianza de los residuos.

Se observa en este caso una reducción de 9 meses en la vida útil del vertedero. Esto puede tomarse como una estimación conservadora, teniendo en cuenta que muy probablemente la vida útil esté por encima de este valor.

Tabla N° 4.9: Proyección de vida útil del vertedero en base a la densidad de límite inferior del intervalo de confianza de los residuos

Año	Tasa de generación [Tn/mes]	Meses en Funcionamiento	Densidad Límite Inferior [kg/m ³]	Volumen Disponible [m ³]	Volumen Ocupado [m ³]
2013	60000	3	950,48	1.992.120	189378
2014	60000	12	950,48	1.802.742	757512
2015	60000	12	950,48	1.045.230	757512
2016	60000	4	950,48	287.718	252504
2017	60000	0	950,48	35.214	0

4.2.3 Proyección de la masa total de residuos del vertedero

En un principio se prevé que el vertedero de piedras blancas funcione hasta el año 2014. Sin embargo, dado el análisis de la vida útil de vertedero, se consideran un año y 4 meses más de funcionamiento del vertedero para el cálculo de la generación de biogás. Se considera una tasa aproximada de disposición de residuos de 60000 toneladas mensuales para el cálculo de la generación de biogás. Esta tasa de generación se toma como resultado de las pequeñas diferencias (menos de 5%) entre la calculada anteriormente con la aportada como dato por los operadores del predio.

En la Tabla N° 4.10 se presenta la cantidad de residuos depositados por año en base a la tasa de generación de residuos adoptada y los meses de funcionamiento para cada año.

Tabla N° 4.10: Cantidad de residuos depositados en el vertedero

Año	Meses en funcionamiento	Cantidad de residuos depositados [Tn]
2010	9	540000
2011	12	720000
2012	12	720000
2013	12	720000
2014	12	720000
2015	12	720000
2016	4	240000

4.3 Caracterización de los residuos sólidos dispuesto en el predio

4.3.1 Informe de las perforaciones realizadas en el predio

A efectos de lograr una mejor caracterización de los residuos dispuestos en el predio se realizaron una serie de ensayos en campo. El objetivo de dichos ensayos fue determinar el grado de descomposición y características físico-química básicas, las cuales son indicativas del proceso de degradaciones relevantes para la generación de gases. El equipo de trabajo realizó las siguientes tareas:

- Perforaciones para extracción de muestras

- Ensayos de conductividad hidráulica en cobertura superior temporal

4.3.2 Ubicación de las perforaciones.

Para la ejecución de la presente tarea se realizaron cuatro perforaciones mediante una perforadora con helicoide y avance rotativo. Estas perforaciones se designaron como S₁, S₂, S₃ y S₄ y su ubicación se consigna en la Figura 4.1. En esta figura también se muestra la ubicación del punto donde se realizó el ensayo de conductividad hidráulica de la cobertura temporal de las celdas. En la Tabla N° 4.11 se indican las coordenadas de cada uno de las perforaciones y el punto donde se midió la conductividad hidráulica de la cobertura temporal.

El sondeo S₁ se extendió hasta la profundidad de 1,00 m, el sondeo S₂ hasta 12 m de profundidad, el sondeo S₃ hasta 1,00 m de profundidad y el sondeo S₄ hasta 5 m de profundidad. Cada un metro de avance de la perforación se obtuvieron muestras de residuos. Los sondeos S₁ y S₃ fueron realizados hasta la profundidad de 1,00 metro ya que por las características del material dispuesto en el sitio se hizo imposible continuar con el avance de las perforaciones. En la Figura N° 4.2 se muestran fotografías tomadas durante la ejecución de las perforaciones.



Figura N° 4.1 : Ubicación relativa de los sondeos (S1, S2, S3, S4) y ensayo de permeabilidad in situ.

Tabla N° 4.11: Coordenadas de los sondeos y ensayo de permeabilidad

Nº	Zona	Lat.	Long.
S ₁	20J	31°30'51.55"S	64°13'44.88"O
S ₂	20J	31°30'52.98"S	64°13'44.59"O
S ₃	20J	31°30'51.59"S	64°13'43.78"O
S ₄	20J	31°30'53.84"S	64°13'45.93"O
Permeabilidad <i>in situ</i>	20J	31°30'50.17"S	64°13'42.85"O



(a)

(b)

Figura N° 4.2: Perforación y obtención de las muestras de residuo en: (a) Sondeo 2 (S_2) y (b) Sondeo 4 (S_4)

A las muestras obtenidas se le realizaron los siguientes ensayos:

- Composición
- Contenido de humedad
- Pasante tamiz 200
- Contenido de materia orgánica
- pH

4.3.3 Clasificación cualitativa de la composición de los residuos

La composición del residuo fue determinada siguiendo los procedimientos propuestos por Sivakumar et al. (2010). El mismo consistió en clasificar a la muestra de residuo obtenida en las categorías de plásticos, papel, suelo y material orgánico, metales y textiles. La clasificación fue realizada por inspección visual de la muestra y los porcentajes determinados estimativamente en el campo. Este procedimiento permitió obtener una descripción del material presente a distintas profundidades. En los primeros 5 m desde el nivel de terreno en la fecha de muestreo, el relleno está compuesto por una mezcla de suelo con diferentes porcentajes de residuo, en su mayoría inertes y escombros. En la Tabla N° 4.12 se muestran los resultados de la composición de los residuos muestreados a partir de los 5 m de profundidad. En la Figura 3 se muestran fotografías selectas tomadas a las muestras de residuos.

Tabla N° 4.12: Determinación de la composición de los residuos (In Situ).

Muestra	S ₂ - 5a6m	S ₂ - 6a7m	S ₂ - 7a8m	S ₂ - 8a9m	S ₂ - 9a10m	S ₂ - 10a11m
Componente						
Plástico [%]	50,00	30,00	50,00	40,00	60,00	30,00
Papel [%]	20,00	5,00	10,00	10,00	2,00	10,00
Restos de suelo y orgánicos [%]	30,00	64,00	19,95	30,00	38,00	60,00
Metal [%]	0,00	1,00	0,05	0,00	0,00	0,00
Textiles [%]	0,00	0,00	20,00	20,00	0,00	0,00
Suma	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00



Figura N° 4.3: Clasificación de los residuos muestreados.

4.4 Procedimiento de ensayos físico – químicos realizados sobre las muestras

4.4.1 Composición

Las muestras extraídas de las perforaciones fueron trasladadas al laboratorio para una clasificación más detallada, en la Tabla N° 4.13 se muestran los resultados de la clasificación. Los sondeos S₁ y S₃ sólo se pudieron extender hasta una profundidad de 1 m, debido a que las características del material dispuesto hacía imposible continuar con las perforaciones. A partir de observaciones visuales fue posible detectar la importante variabilidad en la composición de los residuos encontrados a diferentes propiedades. En los primeros 5 m desde el nivel de terreno el relleno está compuesto por una mezcla de suelo con diferentes porcentajes de residuo, en su mayoría inertes y escombros. El contenido de partículas de suelo local disminuye con el incremento de la profundidad hasta encontrarse residuos compuestos sólo por plástico, textiles, residuos orgánicos, metales y papel. Estos residuos poseen un nivel de descomposición importante el cual se evidencia en la coloración, el olor y la apariencia que tienen los mismos. En diferentes zonas se encuentran lentes de material de baja permeabilidad, los cuáles son susceptibles de acumular lixiviados. En el sondeo S₂ se pudo detectar esto a una profundidad aproximada de 7 m por debajo del nivel de terreno. En la tabla 4.13 se muestra la clasificación de los residuos realizada en laboratorio de las muestras extraídas.

Tabla N° 4.13: Clasificación de las muestras de residuos realizada en laboratorio

Muestra	S ₁ - 0a1m	S ₂ - 1a2m	S ₂ - 2a3m	S ₂ - 3a4m	S ₂ - 4a5m	S ₂ - 5a6m	S ₂ - 6a7m	S ₄ - 0a1m	S ₄ - 1a2m	S ₄ - 2a3m	S ₄ - 3a4m	S ₄ - 4a5m
Componente												
Papel [%]	0,00	0,01	0,22	0,16	0,75	9,82	8,87	0,00	0,00	0,00	0,75	0,00
Plásticos [%]	0,10	0,00	3,06	0,81	3,33	11,06	23,30	0,00	0,00	0,02	0,37	0,00
Residuos de comida [%]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,68	0,00
Madera [%]	0,13	0,94	0,94	0,18	1,18	1,96	0,00	0,00	0,59	0,26	0,30	0,82
Otros orgánicos [%]	0,00	0,00	1,16	9,10	2,64	65,79	58,08	0,00	0,00	0,00	0,00	2,01
Metales [%]	0,00	1,01	0,00	3,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,24	1,51
Vidrio [%]	0,38	0,19	0,09	0,03	0,17	0,44	0,40	0,00	0,00	0,14	0,83	0,00
Otros inorgánicos [%]	99,39	96,37	89,93	86,66	91,92	10,45	9,35	100,00	99,41	99,57	95,83	95,67
Residuos especiales [%]	0,00	1,48	4,61	0,00	0,00	0,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

4.4.2 Contenido de humedad

El contenido de humedad fue determinado mediante la medición de la pérdida de peso de la muestra de residuo antes y después de ser sometido a secado en estufa a 105° C durante 24 hs. La Figura N° 4.4 ilustra el perfil de humedades obtenido para las muestras extraídas en el Sondeo 2 y Sondeo 4. Se puede observar que el contenido de humedad varía entre 10 y 100 % evidenciándose un incremento importante del contenido de humedad a partir de los 5 metros

de profundidad, alcanzándose contenidos de humedad cercanos al 100% en profundidades subsiguientes.

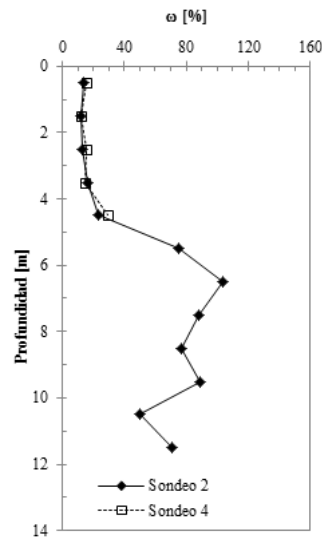


Figura N° 4.4: Variación del contenido de humedad con la profundidad para los sondeos 2 y 4.

4.4.3 Contenido de finos

El ensayo consiste en determinar el porcentaje en peso de muestra seca que pasa por un tamiz con una apertura de 0,074 mm (Tamiz 200). El proceso de tamizado se realizó por vía húmeda. La Figura N° 4.5 muestra el perfil del pasante tamiz N° 200 obtenido para las muestras extraídas en el Sondeo 2 y Sondeo 4.

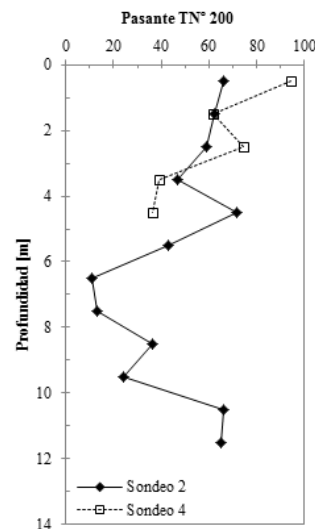


Figura N° 4.5: Variación pasante Tamiz N°200 con la profundidad para el Sondeo 2 y Sondeo 4

4.4.4 Contenido de materia orgánica

El contenido de materia orgánica de los residuos se determinó a partir de la pérdida de peso por calcinación según las recomendaciones generales realizadas por Maciel y Jucá (2011). Cada muestra de residuo fue inicialmente secada en estufa a 110 ± 5 °C y luego calcinada en una mufla a 600 °C durante 90 minutos. La Figura N° 4.6 ilustra el perfil de contenido de materia orgánica obtenido para las muestras extraídas en el Sondeo 2 y Sondeo 4. En esta Figura es posible observar que el contenido de materia orgánica varía entre 5 y 25% evidenciándose un aumento

importante en el contenido de materia orgánica partir de los cuatro metros de profundidad en coincidencia con el incremento de contenido de humedad determinado.

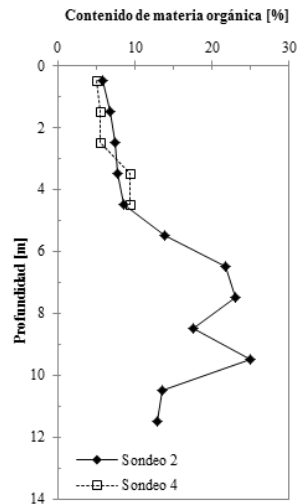


Figura N° 4.6: Variación del contenido de materia orgánica con la profundidad para el Sondeo 2 y Sondeo 4

4.4.5 Determinación de pH

La determinación del pH se realizó mediante el procedimiento descrito en Maciel y Jucá (2011). Para ello se preparó una solución compuesta por 100 mL de agua destilada a la que se le agregó 25 gramos de la muestra de residuos. Esta mezcla fue agitada durante una hora. Al fluido sobrenadante se le determinó el pH, repitiendo el procedimiento en el tiempo hasta obtener un valor constante. Las mediciones de pH fueron realizadas con un pH-metro Hanna HI8424, mediante un electrodo HI332B de la misma marca. La Figura N° 4.7 revela la variación del pH de las muestras extraídas en el Sondeo 2 y Sondeo 4 con la profundidad, valores que oscilan entre 8 y 9,50.

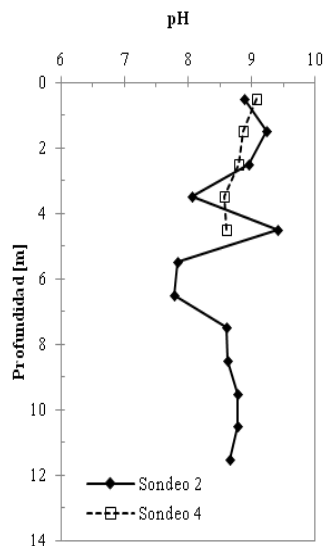


Figura N° 4.7: Variación del pH con la profundidad para el Sondeo 2 y Sondeo 4

4.4.6 Conductividad hidráulica de la cobertura temporaria

A efectos de estimar la conductividad hidráulica de la cobertura temporaria construida en los sectores antiguos de la celda de enterramiento se realizó un ensayo in situ en el punto indicado en la Figura N° 4.1.

Para efectuar el mismo se realizó una perforación de 0,30 m de diámetro y 0,20 m de profundidad. Una vez alcanzada la profundidad se limpió el fondo de la perforación y se ubicó el caño en el medio del mismo. Alrededor del caño se rellenó con una mezcla del suelo excavado y bentonita con el objeto de evitar el escape del agua por el contacto entre la pared del caño y el suelo. El ensayo realizado incluyó la determinación de la permeabilidad in situ a carga variable tomando lecturas del tiempo que tarda en descender el agua por el caño a 1, 2 y 5 cm. Las mediciones se repitieron cuatro veces.

La fórmula utilizada para cuantificar el valor de la permeabilidad es la indicada en Lambe y Whitman (1972):

$$k = \frac{\pi \cdot D}{11 \cdot (t_2 - t_1)} \cdot \ln\left(\frac{H_1}{H_2}\right)$$

Donde k es el coeficiente de permeabilidad, D el diámetro del tubo, t_1 el tiempo inicial, t_2 el tiempo que tarda en descender el fluido a la altura especificada, H_1 la altura piezométrica para $t=t_1$ y H_2 la altura piezométrica para $t=t_2$.

En la Figura N° 4.8 se muestra el esquema empleado para el ensayo y en la Figura N° 4.9 se observa la realización del ensayo in-situ.

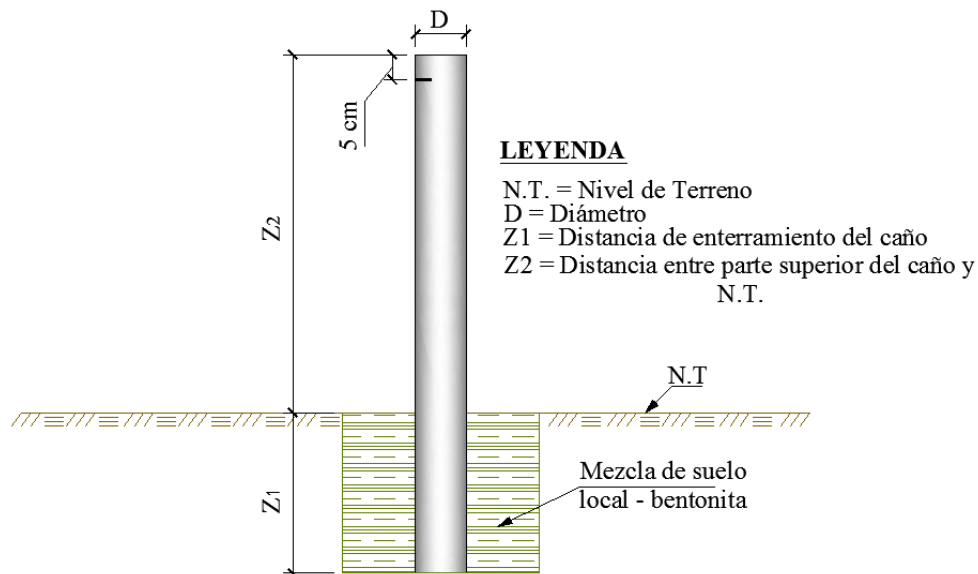


Figura N° 4.8: Esquema representativo del ensayo de permeabilidad in situ



Figura N° 4.9: Fotografía tomada durante la realización del ensayo

De la perforación realizada, se obtuvo una muestra de suelo a la cual se le realizaron ensayos de contenido de humedad y granulometría. La humedad de la muestra de suelo a la profundidad ensayada resultó del 10,2%. En la Figura N° 4.10 se muestra la curva granulométrica obtenida para el material utilizado como cobertura temporal.

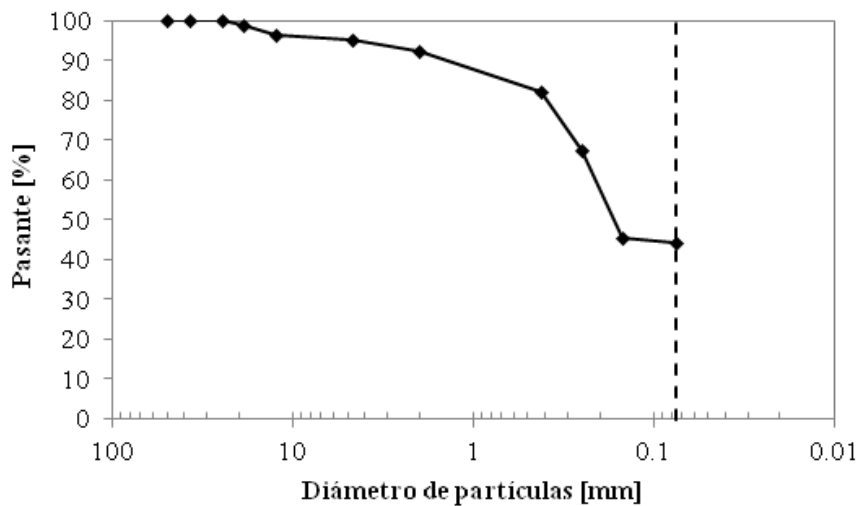


Figura N° 4.10: Distribución de tamaños de partículas del suelo excavado durante la realización del pozo a cielo abierto

En la Figura N° 4.11 se muestran los resultados de conductividad hidráulica obtenidos. En esta Figura es posible destacar que a medida que se incrementa la saturación del suelo los valores de conductividad hidráulica disminuyen.

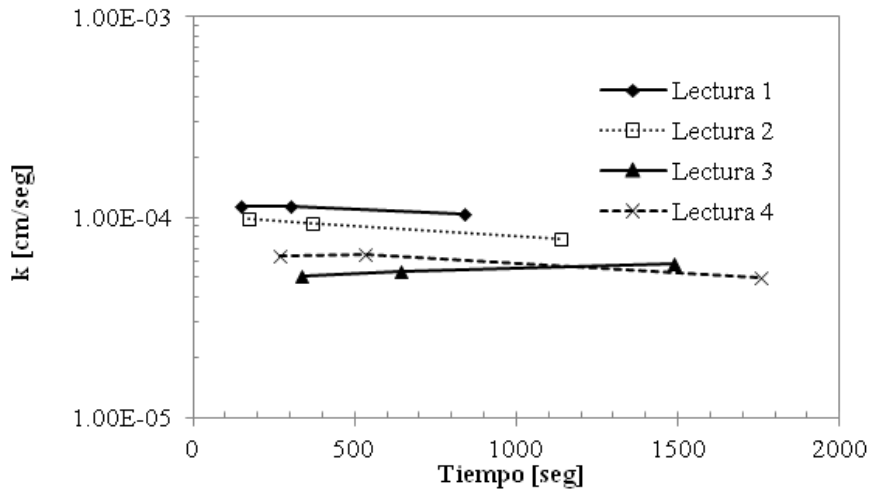


Figura N° 4.11: Variación del coeficiente de permeabilidad con el tiempo de permeado para diferentes lecturas realizada

4.5 Prospección geoelectrica

4.5.1 Generalidades del método de prospección

La resistividad eléctrica de un material, es una propiedad intrínseca del mismo que depende de las cargas eléctricas presentes en los mismos. En los suelos y rocas, los iones en solución en el agua de los poros son el principal elemento que da lugar a la conducción eléctrica. Estos iones son más abundantes en suelos finos (arcillas) por lo que resultan menos resistivos (más conductivos) que los suelos gruesos (arenas).

Las diferentes resistividades entre los materiales geológicos permiten identificar a los mismos a través de un perfil geoelectrico. El método geofísico para generar un perfil geoelectrico lo constituye el sondeo eléctrico vertical SEV. Este método utiliza cuatro electrodos tal como se muestra en la Figura N° 4.12, en donde a través de los electrodos externos AB se genera una corriente eléctrica de amplitud conocida, mientras que en los electrodos interiores MN se mide la diferencia de potencial. Si el medio es homogéneo, la resistividad aparente puede calcularse como:

$$\rho_a = K \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

$$K = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right)^{-1}$$

Donde K es un factor geométrico que depende exclusivamente de la disposición de los electrodos; asimismo AM, AN, BM, BN son las distancias entre electrodos. La operación se repite para distintas separaciones (con respecto al punto medio de los electrodos) o configuraciones espaciales con lo que se va aumentando la profundidad de exploración. Así, la profundidad de investigación está en función de la resistividad de los distintos estratos y de la distancia AB la cual va variando para distintas posiciones de los electrodos A_i y B_i .

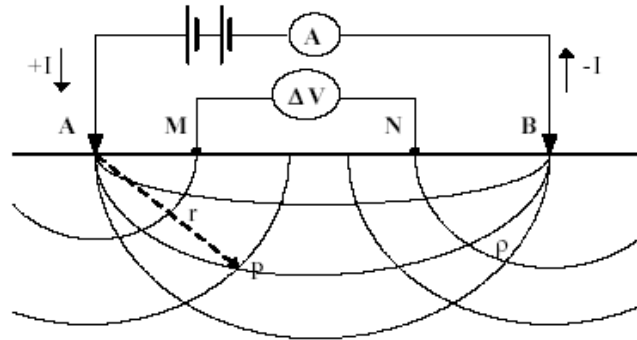


Figura N° 4.12: Dispositivo tetraelectrónico para la medida de la resistividad aparente del suelo

Los resultados obtenidos de las mediciones de campo se conocen como perfiles de resistividad aparente, los cuales a través de programas iterativos de ajustes automáticos, se pueden obtener los espesores de los distintos estratos atravesados con sus resistividades. La interpretación cuantitativa de las curvas de los SEV, brinda como resultado el corte geoelectrico en cada punto investigado. El método geoelectrico tiene la ventaja de ser rápido, confiable y no presenta mayores inconvenientes en su aplicación dado que para este tipo de aplicaciones se requiere de corrientes de muy baja intensidad sin ningún tipo de riesgo para quien lo manipula, ni tampoco para el medio ambiente, ya que es inocuo.

4.5.2 Ubicación del sondeo

En la Figura N° 4.13 se muestra la ubicación de la traza del sondeo. Se muestra también las ubicaciones de las perforaciones realizadas como una referencia relativa al mismo. En la Tabla N° 4.14 se indica las coordenadas del punto central de la traza del sondeo



Figura N° 4.13: Ubicación relativa de la traza geoelectrica

Tabla N° 4.14: Coordenadas del sondeo geoelectrico

	Zona	Latitud	Longitud
Traza del sondeo geoelectrico	20J	31°30'51.50"S	64°13'43.24"O

4.5.3 Descripción de las tareas de campo

En el predio se realizó un sondeo geoelectrico vertical utilizando la configuración de electrodos de Schlumberger con una apertura máxima de 140 metros. Se utilizó un equipo digital, que mide el valor de potencial para corrientes constantes inducidas.

4.5.4 Resultados obtenidos

En la Figura N° 4.14 se presenta el perfil geoelectrico determinado.

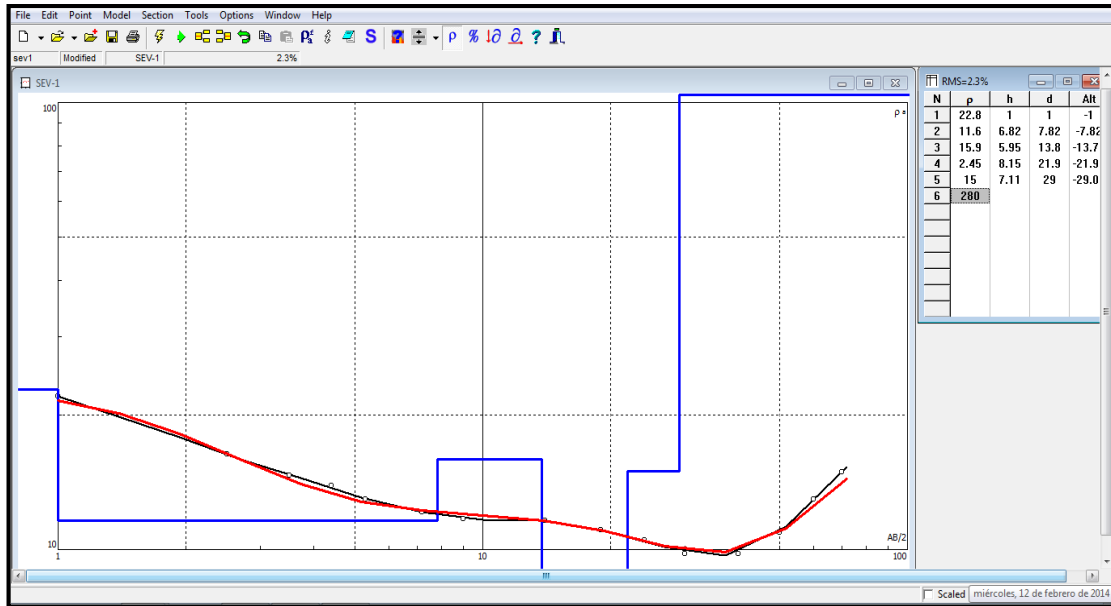


Figura N° 4.14: Dispositivo tetraelectrónico para la medida de la resistividad aparente del suelo

4.5.5 Análisis de los datos

A partir del análisis de la se puede estimar la siguiente secuencia estratigráfica:

- **0,00 m a 13,00 m:** Corresponde a un estrato de resistividad promedio 11 a 16 Ohm.m el cual se puede asociar a materiales de baja resistividad semejante a la de limos húmedos. En el presente caso se puede intuir la presencia de mezclas de limos con residuos en condiciones húmedas.
- **13,00 m a 22,00 m:** Se determinó la presencia de un estrato de muy baja resistividad (2,5 Ohm.m) que se puede asociar a materiales muy saturados con fluidos muy salinos de muy elevada conductividad. Esto se condice con el alto contenido de humedad determinado para los residuos en el sector inferior de la celda y posiblemente la acumulación de lixiviado por sobre la barrera inferior de la celda.
- **22 m a 29 m:** Corresponde a un material de resistividad próxima a 15 Ohm.m que se correlaciona con materiales finos sedimentarios, húmedos.
- **Mayor a 29 m:** Corresponde a un material de resistividad próxima a 300 Ohm.m el cual se puede asociar a una limo cementado o limo con nódulos calcáreos de bajo contenido de humedad.

4.6 Caracterización de los residuos dispuestos en el relleno sanitario.

4.6.1 Clasificación realizada por la empresa operadora CReSE

En el caso del vertedero de Piedras Blancas, la empresa operadora realizó análisis de composición de residuos mensuales desde abril del año 2010 hasta febrero del año 2013. La ejecución de estos ensayos estuvieron a cargo de Córdoba Recicla Sociedad del Estado (CReSE). En la Tabla N° 4.15 a Tabla N° 4.18 se muestran la composición de los residuos determinada para cada uno de los distintos meses. En la Tabla N° 4.19 se indica la composición promedio de los residuos durante todo el período considerado.

Tabla N° 4.15: Ensayos de composición de abril de 2010 a marzo de 2011

Componente	Abr-10	May-10	Jun-10	Jul-10	Ago-10	Sep-10	Oct-10	Nov-10	Dic-10	Ene-11	Feb-11	Mar-11
Papel	14,93	14,36	11,78	9,39	10,75	13,51	No hay datos disponibles			11,85	10,69	8,51
Plásticos	16,51	12,80	12,12	10,54	10,77	16,92				17,38	14,88	11,24
Residuos de comida	40,87	36,58	39,69	33,51	30,74	25,13				21,64	31,23	28,33
Madera	0,00	0,18	0,36	0,53	0,78	1,17				1,18	2,36	0,00
Otros orgánicos	18,72	15,64	14,82	14,66	19,57	21,13				34,07	29,15	35,96
Metales	1,79	1,81	1,64	0,08	1,03	1,76				1,48	1,43	1,39
Vidrio	2,92	6,31	4,76	3,90	0,85	1,78				5,03	3,50	2,50
Otros inorgánicos	4,25	12,10	14,58	27,39	25,50	17,41				5,13	3,67	8,68
Residuos especiales	0,00	0,22	0,24	0,00	0,00	1,18				2,24	3,10	3,39
Σ	99,99	100,00	99,99	100,00	99,99	99,99				100,00	100,01	100,00

Tabla N° 4.16: Ensayos de composición de junio de 2011 a mayo de 2012

Componente	Jun-11	Jul-11	Ago-11	Sep-11	Oct-11	Nov-11	Dic-11	Ene-12	Feb-12	Mar-12	Abr-12	May-12
Papel	7,17	9,22	9,78	10,36	10,47	9,63	11,40	8,59	10,55	10,81	10,64	10,01
Plásticos	20,23	12,30	16,49	14,50	13,64	12,62	10,07	11,95	11,42	10,06	6,57	12,94
Residuos de comida	35,64	36,25	30,77	33,91	31,94	29,40	28,89	32,80	32,20	34,49	43,26	30,39
Madera	0,00	0,00	0,15	1,67	0,00	0,00	0,00	0,43	1,31	1,37	0,64	0,93
Otros orgánicos	25,89	25,17	22,77	19,74	21,03	23,47	24,02	22,90	27,28	28,44	23,65	21,36
Metales	3,78	2,15	2,80	2,49	2,82	3,48	3,30	1,94	2,81	2,42	1,43	1,93
Vidrio	4,60	4,91	5,17	5,50	6,13	10,99	8,01	7,63	3,99	2,26	5,33	6,91
Otros inorgánicos	2,14	5,84	10,79	8,51	7,55	3,52	5,38	7,65	6,38	2,74	5,30	6,79
Residuos especiales	0,55	4,15	1,28	3,33	6,42	6,89	8,93	6,12	4,06	7,40	3,17	8,74
Σ	100,00	99,99	100,00	100,01	100,00	100,00	100,00	100,01	100,00	99,99	99,99	100,00

Tabla N° 4.17: Ensayos de composición de junio de 2012 a agosto de 2013

Componente	Jun-12	Jul-12	Ago-12	Sep-12	Oct-12	Nov-12	Dic-12	Ene-13	Feb-13	Mar-13 a Ago-13
Papel	6,63	9,17	8,94	9,43	11,52	9,74	2,98	7,58	7,61	No hay datos disponibles
Plásticos	11,24	10,83	7,12	12,43	6,61	12,95	13,87	10,13	11,86	
Residuos de comida	30,44	30,47	31,40	36,22	32,56	26,36	25,95	29,43	37,80	
Madera	0,92	0,20	0,00	0,00	0,00	3,34	0,00	0,00	0,55	
Otros orgánicos	21,85	24,72	33,56	33,73	33,17	27,87	39,82	35,34	32,51	
Metales	3,74	1,80	0,89	1,07	1,39	3,94	2,55	0,99	1,09	
Vidrio	5,66	7,74	4,34	3,97	2,83	5,08	3,65	2,22	4,19	
Otros inorgánicos	7,33	5,00	9,07	0,57	10,36	10,42	7,28	12,00	4,33	
Residuos especiales	12,18	10,06	4,68	2,59	1,57	0,30	3,91	2,29	0,05	
Σ	99,99	99,99	100,00	100,01	100,01	100,00	100,01	99,98	99,99	

Tabla N° 4.18: Ensayos de composición de septiembre de 2013 a noviembre de 2013.

Componente	Sep-13	Oct-13	Nov-13
Papel	9,54	7,42	6,33
Plásticos	8,22	16,27	10,09
Residuos de comida	32,39	44,81	39,38
Madera	1,41	0,56	0,00
Otros orgánicos	36,65	24,03	38,36
Metales	0,41	1,16	1,02
Vidrio	5,89	2,16	2,02
Otros inorgánicos	2,56	3,32	2,80
Residuos especiales	2,93	0,26	0,00
Σ	100,00	99,99	100,00

Tabla N° 4.19: Ensayos de composición, valores promedio y de desvío estándar

Componente	Promedio	Desvío Estándar
Papel	9,86	2,39
Plásticos	12,42	3,08
Residuos de comida	32,83	5,15
Madera	0,64	0,84
Otros orgánicos	26,54	7,21
Metales	1,92	0,96
Vidrio	4,52	2,13
Otros inorgánicos	7,95	5,90
Residuos especiales	3,30	3,24
Σ	100,00	

4.6.2 Comparación con los ensayos realizados por CReSE.

En base a los ensayos de composición efectuados en las muestras extraídas se observa que desde la superficie de la celda hasta una profundidad de entre 5 y 6 metros los residuos presentan un alto contenido de suelo, el cual fue usado posiblemente como cobertura diaria en las actividades de operación del vertedero. Por debajo de esta profundidad los ensayos de composición de las muestras extraídas presentan una mayor coincidencia con los ensayos de composición realizados por los operadores del predio, los cuáles fueron ejecutados previo al vertido de los residuos sobre las celdas, por lo que en sus datos no se observa la incidencia del suelo usado como cobertura.

4.7 Caracterización del biogás en el relleno sanitario de Piedras Blancas

4.7.1 Descripción de los procedimientos aplicados por CIQA

El aviso de proyecto contempla una caracterización inicial de las corrientes gaseosas venteadas. Estas determinaciones fueron realizadas por el Centro de Investigación y Transferencia en Ingeniería Química y Ambiental (CIQA) perteneciente a la UTN-FRC desde setiembre de 2010 y con una frecuencia de tres mediciones anuales. Debido al bajo número de determinaciones y la extrema variabilidad en algunos parámetros, el análisis temporal de los gases generados en el relleno sanitario resulta complejo. Sin embargo, para algunos parámetros específicos como el CH₄, SO₂, NO_x, CO y H₂S, es posible observar ciertas tendencias.

4.7.2 Resultados de las mediciones efectuadas por CIQA

La Figura 4.15 muestra un incremento en la concentración de metano a medida que transcurre el tiempo, consistente con el aumento en la disposición de residuos y producto de la degradación de los mismos. Debe notarse, sin embargo, que la composición habitual de los gases de rellenos sanitarios llega hasta un 65% de CH₄, mientras que en el caso de Piedras Blancas sólo alcanzó un 36%. Esto puede deberse a factores como la corta edad del Relleno Sanitario, la incorrecta cobertura de los residuos, o factores ambientales como las precipitaciones o la temperatura.

En la Figura N° 4.15 y Figura N° 4.16 se observa también un incremento en las concentraciones de SO₂ y H₂S, mientras que la Figura N° 4.17 presenta las concentraciones de CO en el venteo. Estos tres parámetros registran valores elevados. La Figura N° 4.18 presenta la variación de NO_x, la cual muestra una notoria disminución a partir de diciembre de 2011. En todas las figuras se muestra el límite de concentración recomendado por las normas alemanas como concentración límite permitido de los diferentes compuestos para su emisión a la atmósfera.

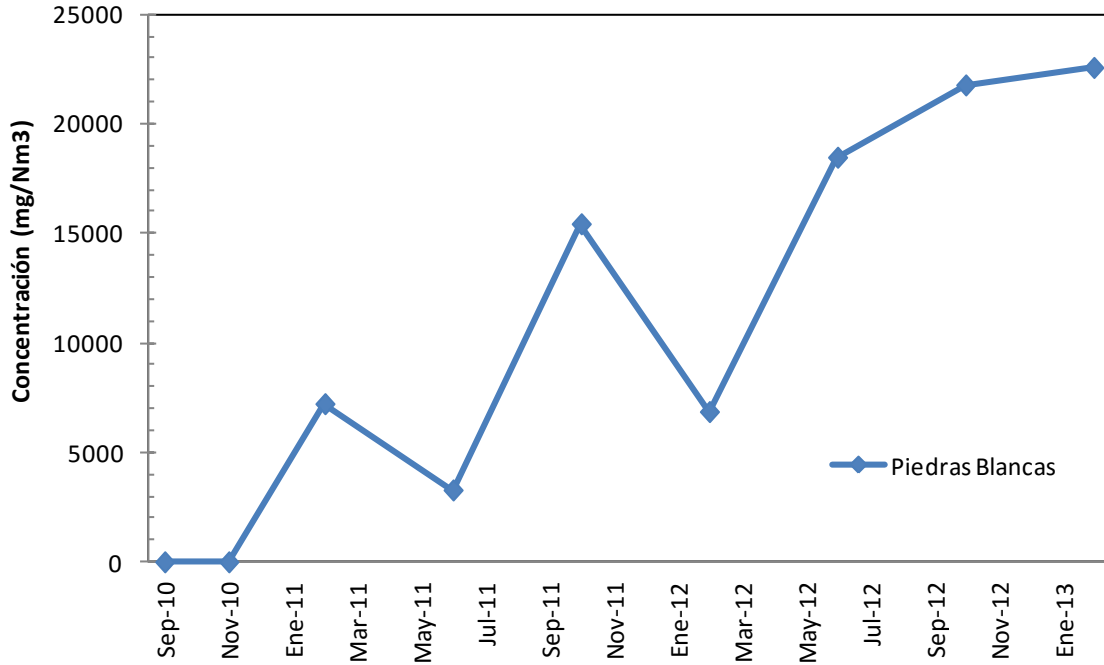


Figura N° 4.15: Variación temporal de metano en los gases generados en el Relleno Sanitario de Piedras Blancas.

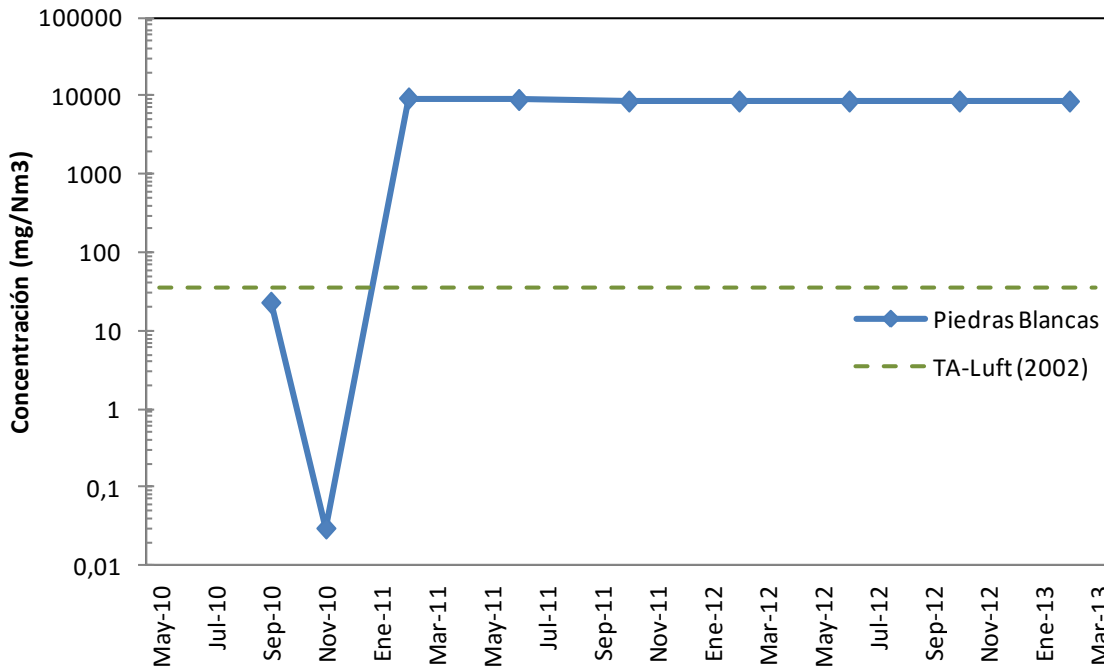


Figura N° 4.16: Variación temporal de dióxido de azufre en los gases generados en el Relleno Sanitario de Piedras Blancas.

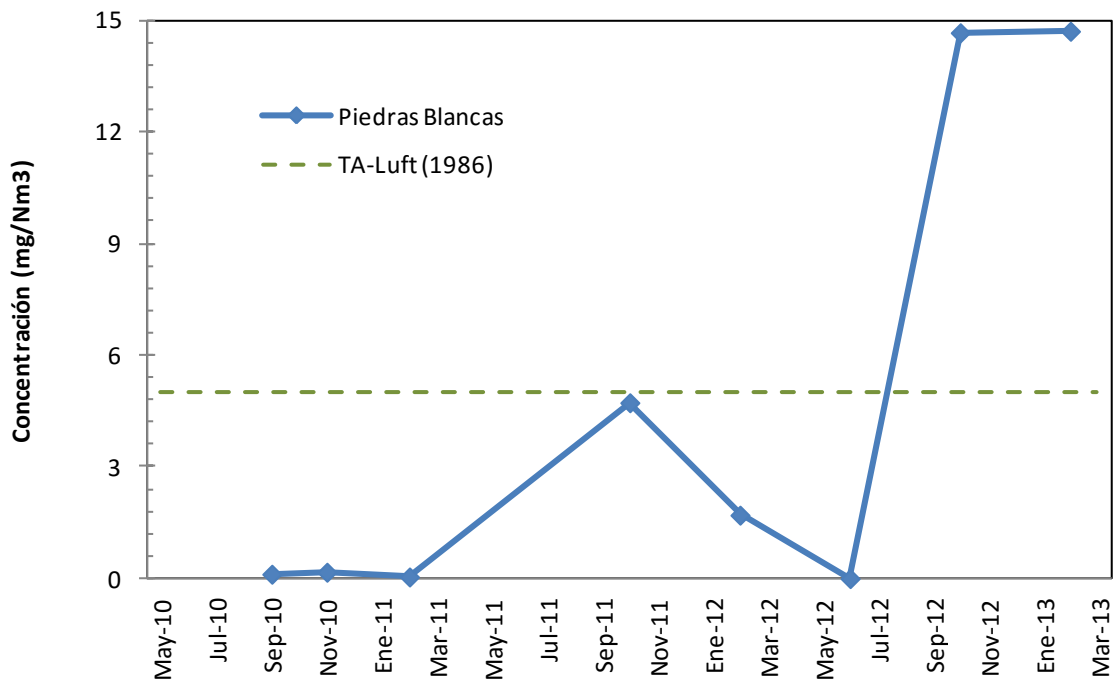


Figura N° 4.17: Variación temporal de sulfuro de hidrógeno en los gases generados en el Relleno Sanitario de Piedras Blancas.

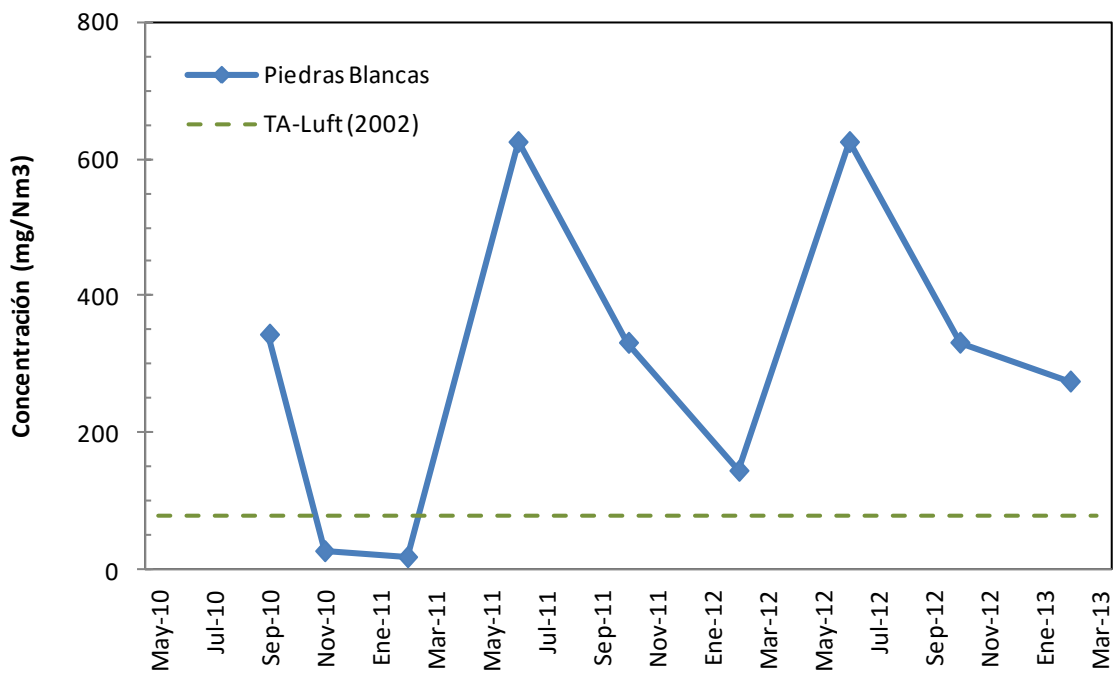


Figura N° 4.18: Variación temporal de monóxido de carbono en los gases generados en el Relleno Sanitario de Piedras Blancas.

Evaluación de generación de biogás en el vertedero de Piedras Blancas, Córdoba.

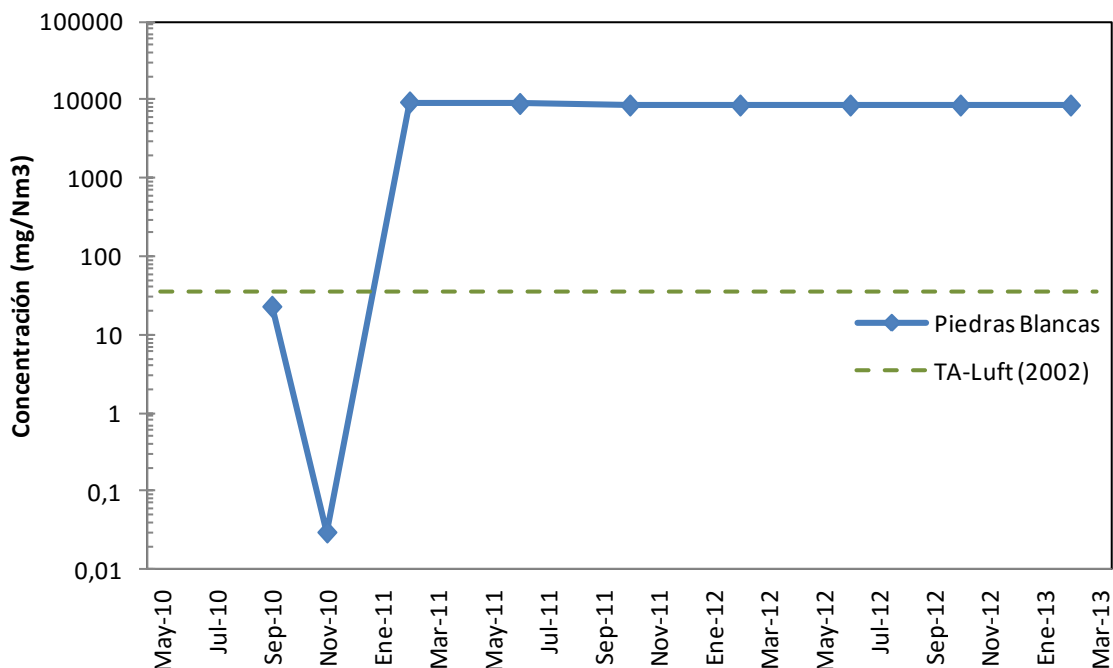


Figura N° 4.19: Variación temporal de óxidos de nitrógeno en los gases generados en el Relleno Sanitario de Piedras Blancas.

En ningún caso se supera el Valor Umbral de Información Pública considerado en el Reglamento 166/2006 (Parlamento Europeo, 2006) y Real Decreto 508/2007 (Ministerio de Medio Ambiente, España, 2007), como se muestra en la Tabla N° 4.20.

Tabla N° 4.20: Valor Umbral de Información Pública (Reglamento 166/2006 (Parlamento Europeo, 2006) y Real Decreto 508/2007 (Ministerio de Medio Ambiente, España, 2007)) y valores analizados en el Relleno Sanitario de Piedras Blancas

Parámetro	Valor Umbral de Información Pública (kg/año)	Piedras Blancas		
		Valor Mínimo (kg/año)	Valor Promedio (kg/año)	Valor Máximo (kg/año)
CH ₄	100.000	0,00	9.341	25.565
SO _x /SO ₂	150.000	0,044	4237	9713
CO	500.000	6,960	193,9	456,8
NO _x	100.000	0,009	1,143	6,345

Según la Directiva TA-Luft de Alemania, los gases de salida de un incinerador de gases de un relleno sanitario no deben superar los límites presentados en la Tabla N° 4.21. Si el gas de venteo no superara estos límites, en primera instancia podría continuar sin tratamiento, siempre que se cumplan el resto de las condiciones a terreno.

Como puede observarse en la Tabla N° 4.21 los límites se encuentran ampliamente excedidos en todos los parámetros (con excepción de los óxidos de nitrógeno), por lo que el tratamiento de los mismos resulta indispensable.

Tabla N° 4.21: Límites de la Directiva TA-Luft (1996) y análisis del gas de venteo del Relleno Sanitario de Piedras Blancas,

Parámetro	Límites de la Directiva Técnica para la Reducción de la Contaminación del Aire - TA Luft (mg/Nm ³ , gas seco a 3% O ₂ [promedio de 24 h])	Piedras Blancas		
		Valor Mínimo (mg/Nm ³)	Valor Promedio (mg/Nm ³)	Valor Máximo (mg/Nm ³)
CO	80 (TA-Luft 2002)	18,75	302,7	625
NOx	200 (TA-Luft 2002)	0,02	1,242	4,84
SO ₂	35 (TA-Luft 2002)	0,03	6.811	9.399
C(org)	10 (TA-Luft 1996)	0,00 ^(a)	10.620 ^(a)	22.565 ^(a)
H ₂ S	5 (TA-Luft 1986)	0,0001	5,817	14,71

Nota: (a) El valor presentado para los gases del Relleno Sanitario de Piedras Blancas corresponden únicamente a metano (CH₄).

4.8 Análisis de resultados

Se puede considerar como una aproximación razonable que la generación de residuos para la ciudad de Córdoba se encuentra en el orden en 60.000 toneladas por mes. De igual manera, admitiendo un criterio conservador en cuanto a su capacidad de recibir residuos, el vertedero poseerá una masa total de 4.380.000 toneladas al final de su vida útil.

En base al análisis de las diferentes propiedades de los residuos depositados se puede concluir que las condiciones en la celda son propicias para la formación de gas, observándose una aparente estratificación entre dos zonas claramente diferenciadas, cuyo límite de separación se ubica aproximadamente a los 5 metros de profundidad.

En cuanto a las mediciones del nivel de pH se observa que estas se encuentran dentro del rango en el cual es posible la generación anaerobia de biogás (de 5 a 9) en todos los niveles medidos.

Si se observa el contenido de humedad de los residuos, este sólo presenta un valor cercano al óptimo a partir de los 5 metros de profundidad. Por encima del mismo la humedad oscila entre 10% y 40%, factor que condiciona la actividad de microorganismos metanogénicos y por ende la generación anaeróbica de gas en ese sector.

Con respecto al contenido de materia orgánica, teniendo en cuenta los datos relevados de los ensayos de composición y el sondeo geoelectrico, se observa un escenario similar al de la humedad: los 5 metros de profundidad marcan un límite entre un sector superficial con bajos valores y uno de mayor profundidad con mayor contenido de materia orgánica. Esto puede deberse a un mayor proporción de suelo en la masa de residuos, perteneciente a la cobertura diaria aplicada que constituyen uno de los aspectos de operación del vertedero.

Más allá de la aparente estratificación de los residuos, observando las concentraciones de componentes constituyentes del biogás, se observa una creciente concentración de metano,

Evaluación de generación de biogás en el vertedero de Piedras Blancas, Córdoba.

evidencia de que se desarrolla un proceso anaerobio de generación de biogás en la celda. La baja permeabilidad de la cobertura temporaria favorece el desarrollo de dicho proceso.

Por otra parte, las concentraciones de los demás componentes medidos superan en su mayoría los valores límites establecidos por la Directiva TA-Luft (1996), evidenciando la necesidad de recolectar y tratar el biogás generado en el vertedero.

Capítulo 5: Modelos matemáticos para determinación de la generación de Biogás

5.1 Introducción

Los modelos de generación de biogás describen en términos simples los cambios complejos que ocurren durante el proceso de descomposición en un enterramiento sanitario para determinar la cantidad de metano generada a lo largo del tiempo.

La producción de biogás se puede determinar utilizando modelos de orden cero, de primer orden y de segundo orden. Investigaciones recientes indican que los modelos de orden cero generan resultados poco confiables debido a importantes errores en las simplificaciones. Los modelos de orden superior presentan resultados más ajustados a la realidad cuando se los compara con mediciones realizadas en campo. El uso de un modelo de segundo orden en lugar de un modelo de primer orden genera mayor complicación en el modelado y en la determinación de los parámetros necesarios para introducir a los modelos, debido a esto la mejora en la precisión de las predicciones normalmente no justifican el esfuerzo. En consecuencia la mayoría de los modelos más utilizados se basan en un modelo de primer orden y alternativas de este tipo de modelos (Amini et al, 2012; Lamborn, 2012).

En esta evaluación se consideró la utilización del modelo de generación de orden cero (Swana, 1998 en Kamalan et al, 2011), el modelo triangular (Tchobanoglous, 1993) y los modelos LandGEM (US EPA, 2005) y British Columbia (Ministry of Environment of British Columbia, 2009) basados en el modelo SchollCanyon (Thompson et al, 2009)

5.2 Modelo de orden cero

Este modelo genera una aproximación tosca a la producción de biogás en enterramientos en operación. El modelo determina la tasa de generación de metano independientemente de la cantidad de materia orgánica remanente en el sustrato e independientemente de la cantidad de gas generada con antelación. Swana ha desarrollado un modelo de orden cero dado por la siguiente ecuación (Kamalan et al, 2011)

$$Q = \frac{ML_0}{(t_f - t_0)}$$

Donde, Q es el caudal de generación de metano en $m^3/año$, M la masa de residuos dispuesta en toneladas, L_0 (m^3/Tn) es el potencial de generación de metano, t_0 es el tiempo en años de retraso antes del comienzo de la generación y t_f es el tiempo en que finaliza la misma.

5.3 Modelo triangular

El modelo triangular asume un aumento lineal de incremento en la generación de metano en la primera fase seguido por un decaimiento lineal en una segunda fase (Tchobanoglous et al. 1993 en Reihart y Faour 2005). Tchobanoglous et al. (1993) además asumió 1 año de retraso previo al comienzo de la generación de metano y separó la curvas para residuos de decaimiento rápido y lento. El flujo total resulta de sumar las cantidades calculadas en un determinado tiempo. El volumen de metano generado por la función triangular toma la siguiente forma:

$$L_0 = \frac{1}{2} t_f Q_{sp}$$

Donde:

Q_{sp} [$m^3/años/Tn$] = flujo de generación pico de metano dado en volumen por masa de residuo

t_f [años] = Tiempo necesario para una completa degradación de la masa de residuo.

L_0 [m^3/Tn] = Potencial de generación de metano.

5.4 Modelo de SchollCanyon:

Es una ecuación exponencial de decaimiento de primer orden que está aceptada en la industria de generación de biogás. Se basa en que la tasa de generación de gas en un instante determinado es función de la masa disponible de residuos (M), el potencial de generación de gas (L_0), la tasa de generación de gas (k) y la edad de los residuos. Este modelo ignora las tres primeras etapas de la actividad bacteriana y se basa simplemente en las características observadas del crecimiento de las bacterias en los sustratos. Los parámetros del modelo son determinados empíricamente por medio de la correlación de datos de campo con mediciones en la variación de la humedad y otras condiciones dentro del vertedero. Se asume que la producción de gas encuentra su máximo justo después de su emplazamiento, considerando un determinado tiempo de retraso en el cual se considera que se establecen las condiciones anaeróbicas, y luego la producción decrece exponencialmente, dado que el contenido de materia orgánica en el residuo es consumido. Para evaluar la velocidad de generación de metano y de biogás total, las cantidades promedio anuales de disposición de residuos son utilizadas, junto con otros parámetros tales como la constante de velocidad de generación de metano k y el potencial de generación de metano L_0 . Se asume que la composición del gas en volumen es de 50% metano y 50% dióxido de carbono (US EPA 2,005; Sharma y Reddy, 2004). La ecuación considerada es:

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n kL_0M_i e^{-kt_i}$$

Donde:

Q_{CH_4} [m^3/Tn] = Generación anual de metano en el año de cálculo n .

i = incremento de un año

n = año de cálculo

k [$años^{-1}$] = coeficiente de velocidad de generación de metano.

L_0 [m^3/Tn] = Potencial de generación de metano.

M_i [Tn] = Masas de residuos aceptada en el año i -ésimo.

t_i [años] = Edad de la masa de residuos aceptada en el i -ésimo año.

Para el caso de la generación total de biogás, la ecuación sufre una ligera modificación teniendo en cuenta que la cantidad de biogás total se asume que es el doble de la cantidad de metano generado:

$$Q = 2 \sum_{i=1}^n kL_0M_i e^{-kt_i}$$

Donde

Q [$m^3/año$] = Cantidad total de biogás generado.

Existen dos variantes de este modelo a aplicar, las cuales son el modelo LandGEM (Landfill Gas Emission Model) y el modelo de British Columbia.

5.4.1 Modelo LandGEM (Landfill Gas Emission Model)

El modelo LandGEM es un programa desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. Está basado en la ecuación de Scholl-Canyon, con la particularidad de que la masa de residuos aceptada en el año i -ésimo es dividida en submasas con el objetivo de lograr un mayor refinamiento del modelo, diferenciándose del modelo de Scholl-Canyon en que este integra la producción de gas anualmente, en tanto que la última versión del modelo LandGEM v3.02 integra la generación de metano en incrementos de un décimo de año produciendo menores valores de emisiones respecto de las versiones precedentes para un mismo valor de k . La ecuación se transforma entonces en:

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 kL_0 \left(\frac{M_i}{10} \right) e^{-kt_{ij}}$$

Donde:

Q_{CH_4} [$m^3/año$] = Generación anual de metano en el año de cálculo n .

i = incremento de un año

n = año de cálculo

j = incremento de 0,1 años

k [$años^{-1}$] = coeficiente de velocidad de generación de metano

L_0 [m^3/Tn] = Potencial de generación de metano

M_i [Tn] = Masas de residuos aceptada en el año i -ésimo

t_{ij} [años] = Edad de la j -ésima sección de la masa de residuos aceptada en el i -ésimo año (expresado en decimales. Ej: 3,2 años)

Este modelo también asume que la composición del gas en volumen por 50% metano y 50% dióxido de carbono. Teniendo en cuenta esto, el volumen de biogás total será el doble del calculado mediante la ecuación anterior.

Según Amini et al. (2011) el modelo es relativamente insensible a la variación de los parámetros k y L_0 . Para mejorar la sensibilidad del modelo, es necesario incluir la adición otros parámetros o utilizar un modelo de mayor orden. Sin embargo, estos cambios podrían comprometer una de las principales ventajas de este modelo, su simplicidad (Amini et al, 2011).

La mayoría de los modelos tienden a sobreestimar la generación de biogás, sin embargo, se ha registrado que el modelo LandGEM tiende a subestimar dichas emisiones (Thompson et al, 2009 en Amini et al, 2011; Ogor y Guerbois, 2005 en Amini et al, 2011)

Esto puede considerarse como comportamiento conservador del modelo desde el punto de vista del aprovechamiento del biogás frente a las incertidumbres asociadas a los procesos físicos, químicos y biológicos de la generación de biogás.

5.4.2 Modelo British Columbia

Este modelo es un programa componente de la metodología desarrollada por la firma Conestoga-Rovers & Associates (2009) con el objetivo de brindarles a los administradores de los vertederos de la provincia de British Columbia una herramienta para poder cumplir con las regulaciones impuestas por dicha provincia. El modelo se basa en la ecuación de Scholl Canyon. Cabe destacar nuevamente que la composición del biogás en volumen se asume como 50% metano y 50% dióxido de carbono.

La particularidad que tiene el programa mencionado es que entre los datos que se debe ingresar, aparte de los parámetros k y L_0 , también debe proveerse la deposición anual de residuos discriminada por cada clase de los mismos (biodegradable, moderadamente biodegradable y relativamente inerte). El flujo de gas y de metano generado se calcula como la suma de las cantidades generadas por las distintas clases de residuos.

Capítulo 6: Estimación de la generación de Biogás

6.1 Introducción

Los modelos de generación de biogás describen en términos simples los cambios complejos que ocurren durante el proceso de descomposición en un enterramiento sanitario para determinar la cantidad de metano generada a lo largo del tiempo.

Los modelos utilizados en este trabajo son el modelo de primer orden Landfill Gas Emission Model (LandGEM), desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, el Modelo de primer orden del Ministerio de Ambiente de la Provincia de British Columbia, Canadá, el modelo triangular y el modelo de Orden Cero. Los parámetros involucrados en la mayoría de estos modelos son la tasa anual de generación de residuos (M), el potencial de generación de metano (L_0) y la tasa de generación de metano (k).

6.2 Tasa de generación de metano de los residuos (k)

La tasa de generación de metano, k , representa la velocidad de degradación de los residuos en la ecuación de primer orden, a la cual el metano es generado luego que los residuos son depositados. La constante se encuentra influenciada por el contenido de humedad, la disponibilidad de nutrientes, pH y la temperatura. (Ministry of Environment British Columbia, 2009; US EPA, 2005)

6.3 Potencial de generación de metano de los residuos (L_0)

El potencial de generación de metano L_0 es el volumen total de metano que puede generar los residuos. El valor de dicha variable depende de la composición de los residuos, particularmente de la fracción de materia orgánica presente en ellos. (Ministry of Environment British Columbia, 2009)

6.4 Valores típicos de k y L_0

Según Amini et al, (2012) la mejor forma de determinar los parámetros k y L_0 es mediante la utilización de los datos disponibles sobre composición de residuos y valores del potencial de generación de metano de dichos componentes determinados en laboratorio. El valor de k puede ser ajustado utilizando modelos de regresión si existe información disponible sobre sistemas de colección de gas. Cuando esta información no está disponible, k puede extraerse de la bibliografía técnica existente sobre el tema, teniendo en cuenta las condiciones del vertedero.

En la Tabla N° 6.1, se muestra una recopilación de los valores de k y L_0 presentados en la literatura internacional. Se observa que los valores de L_0 y k poseen una gran variabilidad que va desde 8 m³/Mg hasta 170m³/Mg mientras que los valores de k varía entre 0,02 y 1,7 año⁻¹. Esto corresponde a la gran variabilidad de condiciones de los diferentes vertederos que van desde aquellos que poseen un sistema de operación del estilo “drytomb”, manteniendo una baja humedad en los residuos mediante la colección de lixiviados y el diseño de una cobertura que impida la infiltración del agua de lluvia; hasta aquellos que funcionan como un biorreactor, asegurando un determinado contenido de humedad en la masa de residuos mediante la colección y recirculación de lixiviados y en algunos casos la inyección de agua de lluvia y de este modo aumentando la tasa de producción de biogás (Ministry of Environment of British Columbia, 2009)

Tabla N° 6.1: recopilación de valores de generación de gas

Condiciones	k [años ⁻¹]	L_0 [m ³ /Mg]	Referencia
-------------	------------------------------	----------------------------	------------

Recomendación Clean Air Act para EEUU	0.05	170	Clean Air Act
Recomendación Clean Air Act para EEUU áreas secas	0.02	170	Clean Air Act
Valor recomendado para zonas con más de 25 pulgadas de precipitación media anual	0.04	100	US EPA AP 42
Brogborough	0.39	73	Faour et al. (2007)
Yolo NE	0.2	83	Faour et al. (2007)
Yolo westside	2.2	9	Faour et al. (2007)
Yolo pilot	0.23	88	Faour et al. (2007)
Georgia Tech	1.7	85	Faour et al. (2007)
Tucumán	0.51	167	Mc Bean et al. (2007)
Ajuste a partir de datos de laboratorio.	0.2	70 (sólo para CH ₄)	Machado et al. (2009)
Celda Experimental en Recife Brasil	0.8	123.9	Maciel y Jucá (2011)
Cinco vertederos en Florida	0.04 – 0.25	56 - 80	Amini et al. (2012)

6.5 Parámetros utilizados para los diferentes modelos

6.5.1 Modelo de British Columbia

6.5.1.1 Descripción general

Para la determinación de los parámetros k y L_0 se utilizó el procedimiento estipulado en el manual “Landfill Generation Assesment, Procedure Guidelines” (2009), Provincia de British Columbia, Canadá.

Este manual clasifica los residuos en 3 clases de acuerdo a su composición en: relativamente inerte (RI), moderadamente biodegradable (MB) y biodegradable (B).

Los clasificados como relativamente inertes incluyen a los materiales con poca o ninguna posibilidad de biodegradación, tales como metales, vidrios, plásticos, suelo, suelos contaminados, etc.

Los considerados como moderadamente biodegradables incluyen materiales con una proporción de carbono biodegradable que se descompondrá a un ritmo lento. En esta clase se incluyen materiales como papel, madera, muebles de madera, productos textiles, materiales de construcción y demolición, etc.

Por último los considerados como biodegradables incluyen a todos aquellos que poseen una gran proporción de carbono biodegradable, con una velocidad de descomposición relativamente elevada, tales como residuos de comida, residuos de jardín, desechos de frigoríficos, etc.

A cada clase de residuos se le asigna un valor particular del Potencial de generación de metano (L_0) y del coeficiente de velocidad de generación de metano (k), determinándose el volumen de biogás generado para cada tipo de residuo de forma individual mediante la ecuación de Scholl Canyon. La generación total de gas resulta ser la suma de los volúmenes generados por cada uno de ellos.

6.5.1.2 Potencial de generación de Metano L_0

El manual asigna un valor diferente de L_0 para cada clase de residuos sólido. En la tabla 6.2 se muestra los valores de L_0 adoptados por el manual para cada tipo de residuo:

Tabla N° 6.2: Potencial de generación de metano de acuerdo al tipo de residuo

Caracterización de los residuos	Potencial de generación de metano L_0 (m^3/Tn)
Relativamente Inerte	20
Moderadamente Biodegradable	120
Biodegradable	160

6.5.1.3 Tasa de generación de metano k

El manual Landfill Generation Assesment, Procedure Guidelines (2009) considera la determinación de un valor de k para cada tipo de residuo en función de la precipitación anual promedio del lugar de emplazamiento del vertedero. En la tabla 6.3 se muestran los valores de k adpotados por el manual en función del nivel de precipitación anual.

Tabla N° 6.3: Tasa de generación de metano k para diferentes niveles de precipitación anual.

Precipitación Anual	Índice de velocidad de generación de metano k [$años^{-1}$]		
	Relativamente Inerte	Moderadamente Biodegradable	Biodegradable
<250 mm	0,01	0,01	0,03
De 250 mm a 500 mm	0,01	0,02	0,05
De 500 mm a 1000 mm	0,02	0,04	0,09
De 1000 mm a 2000 mm	0,02	0,06	0,11
De 2000 mm a 3000 mm	0,03	0,07	0,12
Mayor a 3000 mm	0,03	0,08	0,13

En el caso de la provincia de Córdoba, la precipitación media anual se encuentra entre 500mm y 1000mm (De la Casa y Nasello, 2010; Tedesca et al. 2012), por lo que los valores considerados son los siguientes:

Precipitación Anual	Índice de velocidad de generación de metano k [$años^{-1}$]		
	Relativamente Inerte	Moderadamente Biodegradable	Biodegradable
De 500 mm a 1000 mm	0,02	0,04	0,09

6.5.1.4 Factor por adición de agua

El valor de k elegido debe ser corregido por un factor en base a la gestión y tratamiento del agua infiltrada por precipitaciones, implementación de la recirculación de lixiviados, las propiedades de la cobertura y otras características de la gestión del vertedero. La Tabla N° 6.4 muestra los valores del factor por adición de agua en función de las condiciones de operación del vertedero.

Para asignarle el valor correspondiente a las condiciones de operación del vertedero de Piedras Blancas, los factores más relevantes a considerar son la presencia de una cobertura, la gestión de los lixiviados y el perfil de humedades de los residuos determinados mediante ensayos.

En el caso de la cobertura se prevé la instalación de un sistema que minimice la infiltración de agua de lluvia una vez concluido las operaciones, lo que conducirá a disminuir el contenido de agua de los residuos. Por otra parte el sistema de gestión de lixiviados actualmente consiste en la recolección y reinyección de lixiviados dentro de la masa de residuos. Esto se realiza ante la falta de un sistema de tratamiento de los lixiviados extraídos y no con la intención de hacer funcionar a la celda como un biorreactor, lo que no garantiza una distribución uniforme de los lixiviados reinyectados en toda la masa de residuos. Esto se observa claramente en el perfil de humedades el cual presenta bajos contenidos en las capas de residuos cercanas a la superficie (10%), tomando valores cada vez mayores a medida que aumenta la profundidad hasta alcanzar un 100%.

Tabla N° 6.4: Valores del factor por adición de agua en base a las condiciones de operación del vertedero.

Condiciones del vertedero	Factor por adición de agua
Baja a despreciable adición de agua	0,9
Infiltración parcial o incorporación de agua a la masa de residuos.	1,0
Adición intencional de agua al vertedero. "vertedero tipo biorreactor"	1,1

En base a esto se puede concluir que el factor por adición de agua más apropiado corresponde a 1,0 para el caso que estamos tratando, con lo que los valores de k y L_0 señalados anteriormente no se modifican.

6.5.1.5 Clasificación de residuos

Para la asignación de las categorías correspondientes a cada fracción del residuo se utiliza la Tabla N° 6.5 de acuerdo a lo recomendado en el manual el ministerio de ambiente de British Columbia.

Tabla N° 6.5: Categorización de residuos sólidos. (Ministry of Enviroment, British Columbia).

Tipo de residuo	Relativamente Inerte	Moderadamente Biodegradable	Biodegradable
<u>Papel</u>			
Papel de oficina		X	
OCC		X	
Cartón para cajas		X	
Papel de seda/toalla		X	
Contenedores de bebidas – Cajas de bebidas / Contenedores asépticos		X	
Tasas de bebida (café, té, surtidor, etc.)		X	
<u>Orgánicos</u>			
Residuos de comida			X
Textiles naturales		X	
Cuero		X	
Madera–No pintada		X	
Madera– Pintada		X	
Hojas vegetales			X
Recortes de plantas			X
Césped			X
Árboles			X
Residuos de matadero/frigorífico			X

Tabla N° 6.6 (continuación): Categorización de residuos sólidos. (Ministry of Environment, British Columbia).

Tipo de residuo	Relativamente Inerte	Moderadamente Biodegradable	Biodegradable
<u>Plásticos</u>			
Plásticos rígidos	X		
Films (bolsas de plástico)	X		
Textiles sintéticos (ej: nylon, polyester, etc.)	X		
Alfombra	X		
Caucho	X		
Neumáticos	X		
Metales	X		
Electrónicos	X		
Vidrio	X		
<u>Material de Construcción</u>			
Yeso	X		
Materiales de Albañilería (ladrillos, bloques, hormigón, etc.)	X		
Rocas/arena/polvo/ceramica	X		
Productos con asfalto Rígido	X		
Residuos de moquetas (y arpillera)	X		
Otros inorgánicos (linóleo, etc.)	X		
Residuos con asbesto	X		
<u>Objetos voluminosos</u>			
Electrodomésticos	X		
Muebles de madera		X	
Otros muebles	X		
Colchones	X		

Tabla N° 6.5 (continuación): Categorización de residuos sólidos. (Ministry of Environment, British Columbia).

Tipo de residuo	Relativamente Inerte	Moderadamente Biodegradable	Biodegradable
<u>Suelo y Lodo</u>			
Suelo contaminado	X		
Residuos de plantas de tratamiento de aguas residuales	X		
Suelo	X		
Asfalto	X		
<u>Residuos sin clasificar</u>			
Residuos mezclados		X	
Residuos de construcción y demolición	X		
Residuos de jardín		X	
Residuos de instalaciones médicas	X		
<u>Residuos diversos</u>			
Pañales		X	
Lechos de animales		X	

Es posible asignar una categoría para tipo de residuo que se muestra en los ensayos de composición de Piedras Blancas, tomando como referencia la tabla anterior. En la Tabla N° 6. se muestra a qué categoría se asigna cada una de las fracciones de los residuos dispuestos en el enterramiento de Piedras Blancas.

Teniendo en cuenta los informes de los ensayos de composición realizados por CReSE, los residuos denominados como Otros Inorgánicos incluyen ladrillos, piedras, concreto, asfalto, suelos, finos y otros inorgánicos. En el caso de residuos especiales incluyen medicamentos, pilas, insecticidas, pinturas, y residuos varios. Todos estos son considerados y tratados como relativamente inertes.

Considerando lo expuesto anteriormente, se procede a cuantificar el tonelaje de residuos para cada categoría tomando en cuenta la tasa de generación asumida y los ensayos de composición. Se considera el porcentaje promedio de todos los ensayos para cada tipo de residuos, sumando dichos porcentajes de acuerdo a la categoría adoptada. En la Tabla N° 6.7 se muestra el tonelaje de residuos para cada categoría año por año.

Tabla N° 6.7: Categorización de residuos sólidos del Vertedero de Piedras Blancas en biodegradable, moderadamente biodegradable y relativamente inerte.

Componente	Clasificación
Papel	Moderadamente Biodegradable
Plásticos	Relativamente Inerte
Residuos de comida	Biodegradable
Madera	Moderadamente Biodegradable
Otros orgánicos	Biodegradable
Metales	Relativamente Inerte
Vidrio	Relativamente Inerte
Otros inorgánicos	Relativamente Inerte
Residuos especiales	Relativamente Inerte

Tabla N° 6.7: Tonelaje de residuos dispuestos de acuerdo a las 3 categorías de residuos

Año	Deposición de Residuos Total [Ton]	% Biodegradable	% Mod. Biodegradable	% Relat. Inerte	Residuos relat. Inertes [Ton]	Residuos Mod. Biodegradables [Ton]	Residuos Biodegradables [Ton]
2010	540000	58,2	10,7	31,1	167940	57780	314280
2011	720000	58,2	10,7	31,1	223920	77040	419040
2012	720000	58,2	10,7	31,1	223920	77040	419040
2013	720000	58,2	10,7	31,1	223920	77040	419040
2014	720000	58,2	10,7	31,1	223920	77040	419040
2015	720000	58,2	10,7	31,1	223920	77040	419040
2016	240000	58,2	10,7	31,1	74640	25680	139680

6.5.2 Modelo LandGEM

6.5.2.1 Determinación de k y L_0

La determinación parámetros k y L_0 se realiza tomando como referencia los parámetros determinados para el modelo de British Columbia para cada categoría de residuos. Se realiza un promedio ponderado en base a los porcentajes estimados para cada clase de residuos (biodegradable, moderadamente biodegradable y relativamente inerte) y determinando los valores para cada mes. Es decir, para un mes i :

$$k_i = \frac{\%B \times k_B + \%MB \times k_{MB} + \%RI \times k_{RI}}{100}$$

$$L_{0i} = \frac{\%B \times L_{0B} + \%MB \times L_{0MB} + \%RI \times L_{0RI}}{100}$$

Evaluación de generación de biogás en el vertedero de Piedras Blancas, Córdoba.

Donde:

k_i [años⁻¹] = Coeficiente de generación de metano para el mes i.

k_B [años⁻¹] = coeficiente de generación de metano para residuos biodegradables.

k_{MB} [años⁻¹] = coeficiente de generación de metano para residuos moderadamente biodegradables.

k_{RI} [años⁻¹] = coeficiente de generación de metano para residuos relativamente inertes.

L_{0i} [m³/Tn] = Potencial de generación de metano para el mes i.

L_{0B} [m³/Tn] = potencial de generación de metano para residuos biodegradable.

L_{0MB} = potencial de generación de metano para residuos moderadamente biodegradables.

L_{0RI} [m³/Tn] = potencial de generación de metano para residuos relativamente inertes.

%B= Porcentaje de residuos biodegradables para el mes i.

%MB= Porcentaje de residuos moderadamente biodegradables para el mes i.

%RI= Porcentaje de residuos relativamente inertes para el mes i.

En la Tabla N° 6.8 se resumen los valores de k y L_0 obtenidos para cada uno de los meses para los cuáles se dispone de ensayos de clasificación de los residuos dispuestos en Piedras Blancas.

Tabla N° 6.8: Determinación de k y L_0 para cada mes

Clasificación	Componente	Abr-10	May-10	Jun-10	Jul-10	Ago-10
MB	Papel	14,93	14,36	11,78	9,39	10,75
RI	Plásticos	16,51	12,80	12,12	10,54	10,77
B	Residuos de comida	40,87	36,58	39,69	33,51	30,74
MB	Madera	0,00	0,18	0,36	0,53	0,78
B	Otros orgánicos	18,72	15,64	14,82	14,66	19,57
RI	Metales	1,79	1,81	1,64	0,08	1,03
RI	Vidrio	2,92	6,31	4,76	3,90	0,85
RI	Otros inorgánicos	4,25	12,10	14,58	27,39	25,50
RI	Residuos especiales	0,00	0,22	0,24	0,00	0,00
	Σ	99,99	100,00	99,99	100,00	99,99
	% Biodegradable	59,59	52,22	54,51	48,17	50,31
	% Mod. Biodegradable	14,93	14,54	12,14	9,92	11,53
	% Relativamente Inerte	25,47	33,24	33,34	41,91	38,15
	K	0,065	0,059	0,061	0,056	0,058
	L_0	118,4	107,6	108,5	97,4	102,0

Evaluación de generación de biogás en el vertedero de Piedras Blancas, Córdoba.

Tabla N° 6.8 (continuación): Determinación de k y L_0 para cada mes

Clasificación	Componente	Abr-10	May-10	Jun-10	Jul-10	Ago-10	Sept-10	Ene-11	Feb-11	Mar-11	Abr-11	May-11	Jun-11	Jul-11	Ago-11
MB	Papel	14,93	14,36	11,78	9,39	10,75	13,51	11,85	10,69	8,51	9,57	14,24	7,17	9,22	9,78
RI	Plásticos	16,51	12,80	12,12	10,54	10,77	16,92	17,38	14,88	11,24	12,70	14,54	20,23	12,30	16,49
B	Residuos de comida	40,87	36,58	39,69	33,51	30,74	25,13	21,64	31,23	28,33	26,86	37,27	35,64	36,25	30,77
MB	Madera	0,00	0,18	0,36	0,53	0,78	1,17	1,18	2,36	0,00	0,00	2,53	0,00	0,00	0,15
B	Otros orgánicos	18,72	15,64	14,82	14,66	19,57	21,13	34,07	29,15	35,96	38,92	19,03	25,89	25,17	22,77
RI	Metales	1,79	1,81	1,64	0,08	1,03	1,76	1,48	1,43	1,39	1,72	1,76	3,78	2,15	2,80
RI	Vidrio	2,92	6,31	4,76	3,90	0,85	1,78	5,03	3,50	2,50	2,99	2,50	4,60	4,91	5,17
RI	Otros inorgánicos	4,25	12,10	14,58	27,39	25,50	17,41	5,13	3,67	8,68	4,79	7,14	2,14	5,84	10,79
RI	Residuos especiales	0,00	0,22	0,24	0,00	0,00	1,18	2,24	3,10	3,39	2,44	1,00	0,55	4,15	1,28
Σ	99,99	100,00	99,99	100,00	99,99	99,99	100,00	100,01	100,00	99,99	100,01	100,00	99,99	100,00	100,00
% Biodegradable	59,59	52,22	54,51	48,17	50,31	46,26	55,71	60,38	64,29	65,78	56,30	61,53	61,42	53,54	53,54
% Mod. Biodegradable	14,93	14,54	12,14	9,92	11,53	14,68	13,03	13,05	8,51	9,57	16,77	7,17	9,22	9,93	9,93
% Relativamente Inerte	25,47	33,24	33,34	41,91	38,15	39,05	31,26	26,58	27,20	24,64	26,94	31,30	29,35	36,53	36,53
k	0,065	0,059	0,061	0,056	0,058	0,055	0,062	0,065	0,067	0,068	0,063	0,065	0,065	0,059	0,059
L_0	118,4	107,6	108,5	97,4	102,0	99,4	111,0	117,6	118,5	121,7	115,6	113,3	115,2	104,9	104,9

Evaluación de generación de biogás en el vertedero de Piedras Blancas, Córdoba.

Tabla N° 6.8 (continuación): Determinación de k y L_0 para cada mes

Clasificación	Componente	Sept-11	Oct-11	Nov-11	Dic-11	Ene-12	Feb-12	Mar-12	Abr-12	May-12	Jun-12	Jul-12	Ago-12	Sept-12	Oct-12
MB	Papel	10,36	10,47	9,63	11,40	8,59	10,55	10,81	10,64	10,01	6,63	9,17	8,94	9,43	11,52
RI	Plásticos	14,50	13,64	12,62	10,07	11,95	11,42	10,06	6,57	12,94	11,24	10,83	7,12	12,43	6,61
B	Residuos de comida	33,91	31,94	29,40	28,89	32,80	32,20	34,49	43,26	30,39	30,44	30,47	31,40	36,22	32,56
MB	Madera	1,67	0,00	0,00	0,00	0,43	1,31	1,37	0,64	0,93	0,92	0,20	0,00	0,00	0,00
B	Otros orgánicos	19,74	21,03	23,47	24,02	22,90	27,28	28,44	23,65	21,36	21,85	24,72	33,56	33,73	33,17
RI	Metales	2,49	2,82	3,48	3,30	1,94	2,81	2,42	1,43	1,93	3,74	1,80	0,89	1,07	1,39
RI	Vidrio	5,50	6,13	10,99	8,01	7,63	3,99	2,26	5,33	6,91	5,66	7,74	4,34	3,97	2,83
RI	Otros inorgánicos	8,51	7,55	3,52	5,38	7,65	6,38	2,74	5,30	6,79	7,33	5,00	9,07	0,57	10,36
RI	Residuos especiales	3,33	6,42	6,89	8,93	6,12	4,06	7,40	3,17	8,74	12,18	10,06	4,68	2,59	1,57
Σ	100,01	100,00	100,00	100,00	100,01	100,00	99,99	99,99	100,00	99,99	99,99	100,00	100,01	100,01	100,00
% Biodegradable	53,65	52,97	52,87	52,91	55,70	59,48	62,93	66,91	51,75	52,29	55,19	64,96	69,95	65,73	54,23
% Mod. Biodegradable	12,03	10,47	9,63	11,40	9,02	11,86	12,18	11,28	10,94	7,55	9,37	8,94	9,43	11,52	13,08
% Relativamente Inerte	34,33	36,56	37,50	35,69	35,29	28,66	24,88	21,80	37,31	40,15	35,43	26,10	20,63	22,76	32,69
k	0,060	0,059	0,059	0,059	0,061	0,064	0,066	0,069	0,058	0,058	0,061	0,067	0,071	0,068	0,061
L_0	107,1	104,6	103,6	105,5	107,0	115,1	120,3	125,0	103,4	100,8	106,6	119,9	127,4	123,5	109,0

Evaluación de generación de biogás en el vertedero de Piedras Blancas, Córdoba.

Tabla N° 6.8 (continuación): Determinación de k y L_0 para cada mes

Clasificación	Componente	Nov-12	Dic-12	Ene-13	Feb-13	Sept-13	Oct-13	Nov-13
MB	Papel	9,74	2,98	7,58	7,61	9,54	7,42	6,33
RI	Plásticos	12,95	13,87	10,13	11,86	8,22	16,27	10,09
B	Residuos de comida	26,36	25,95	29,43	37,80	32,39	44,81	39,38
MB	Madera	3,34	0,00	0,00	0,55	1,41	0,56	0,00
B	Otros orgánicos	27,87	39,82	35,34	32,51	36,65	24,03	38,36
RI	Metales	3,94	2,55	0,99	1,09	0,41	1,16	1,02
RI	Vidrio	5,08	3,65	2,22	4,19	5,89	2,16	2,02
RI	Otros inorgánicos	10,42	7,28	12,00	4,33	2,56	3,32	2,80
RI	Residuos especiales	0,30	3,91	2,29	0,05	2,93	0,26	0,00
Σ		100,00	100,01	99,98	99,99	100,00	99,99	100,00
% Biodegradable		54,23	65,77	64,77	70,31	69,04	68,84	77,74
% Mod. Biodegradable		13,08	2,98	7,58	8,16	10,95	7,98	6,33
% Relativamente Inerte		32,69	31,26	27,63	21,52	20,01	23,17	15,93
k		0,061	0,067	0,067	0,071	0,071	0,070	0,076
L_0		109,0	115,1	118,3	126,6	127,6	124,4	135,2

Tabla N° 6.8 (continuación): Determinación de k y L_0 para cada mes

Clasificación	Componente	Promedio	Desvío Estándar
MB	Papel	9,86	2,394
RI	Plásticos	12,42	3,077
B	Residuos de comida	32,83	5,148
MB	Madera	0,64	0,836
B	Otros orgánicos	26,54	7,214
RI	Metales	1,92	0,958
RI	Vidrio	4,52	2,126
RI	Otros inorgánicos	7,95	5,897
RI	Residuos especiales	3,30	3,236
Σ			
% Biodegradable		59,37	7,422
% Mod. Biodegradable		10,50	2,738
% Relativamente Inerte		30,12	6,601
k		0,064	0,005
L_0		113,62	9,427

En base a los parámetros calculados mes por mes es posible adoptar valores teniendo en cuenta que la distribución estadística de los resultados de los ensayos de composición presenta una distribución normal. Se asume un nivel de significancia de 5% para calcular los límites del intervalo de confianza. En la Tabla N° 6.9 se presentan los valores del promedio, desvíos estándar calculados junto con los límites inferior y superior del intervalo de confianza.

Tabla N° 6.9: Valores representativos de k y L_0 para Piedras Blancas

	k [años ⁻¹]	L_0 [m ³ /Tn]
Promedio	0,064	113,6
Desvío Estándar	0,005	9,427
Límite Superior	0,073	132,101
Límite Inferior	0,054	95,148

6.5.2.2 Determinación de tonelaje de residuos sólidos

La tasa de disposición de residuos utilizada para este modelo es la tasa anual, la cual fue determinada anteriormente en el punto 4.1.

6.5.3 Determinación alternativa mediante el modelo LandGEM

6.5.3.1 Descripción del modelo

En este caso se estimaron las cantidades de generación de gas para cada clase de residuo utilizando los parámetros propios y la cantidad de masa de cada uno de ellos, para luego sumar las cantidades de gas estimadas para cada año. Esto se encuentra en consistencia con otros modelos como el modelo desarrollado por la EPA para México, Colombia y Ucrania, todos ellos basados en la ecuación del modelo LandGEM y que utilizan esta misma metodología para calcular la cantidad de generación de gas.

6.5.3.2 Determinación de k y L_0

Los valores utilizados de k y L_0 son los mismos que se determinaron para el modelo de British Columbia. En la tabla 6.10 se reiteran los valores de k y L_0 .

Tabla N° 6.10: Valores de k y L_0 adoptados

Caracterización de los residuos	Potencial de generación de metano L_0 (m^3/Tn)	Índice de velocidad de generación de metano k [$años^{-1}$]
Relativamente Inerte	20	0,02
Moderadamente Biodegradable	120	0,04
Biodegradable	160	0,09

6.5.3.3 Determinación de tonelaje de residuos sólidos

En este caso se utiliza la misma clasificación y que la utilizada para el modelo de British Columbia. En la tabla 6.11 se muestra el tonelaje de residuos:

Tabla N° 6.11: Tonelaje de residuos sólidos

Año	Deposición de Residuos Total [Ton]	% Biodegradable	% Mod. Biodegradable	% Relat. Inerte	Residuos relat. Inertes [Ton]	Residuos Mod. Biodegradables [Ton]	Residuos Biodegradables [Ton]
2010	540000	58,2	10,7	31,1	167940	57780	314280
2011	720000	58,2	10,7	31,1	223920	77040	419040
2012	720000	58,2	10,7	31,1	223920	77040	419040
2013	720000	58,2	10,7	31,1	223920	77040	419040
2014	720000	58,2	10,7	31,1	223920	77040	419040
2015	720000	58,2	10,7	31,1	223920	77040	419040
2016	240000	58,2	10,7	31,1	74640	25680	139680

6.5.4 Modelo de Orden Cero

Los parámetros característicos de este modelo son la tasa de disposición de residuos y el potencial de generación de metano. Para L_0 se adopta un valor de $113,6 m^3/ton$, el cual es el promedio calculado para el modelo LandGEM. También se considera que la producción de biogás se inicia un año después de la disposición de los residuos (Tchobanoglous 1993). La tasa de disposición de residuos utilizada para este modelo es la tasa anual, la cual fue determinada anteriormente en el punto 4.1.

6.5.5 Modelo Triangular

6.5.5.1 Determinación de tonelaje de residuos sólidos

Aquí se considera la masa depositada de residuos biodegradables y moderadamente biodegradables para el cálculo de generación de biogás. Utilizando los porcentajes promedio de composición de residuos, estas cantidades serán iguales a las estimadas para el caso del modelo de British Columbia. En el caso del modelo triangular los residuos inertes no se consideran en la generación de biogás (Tchobanoglous et al, 1993).

Tabla N° 6.12: Tonelaje de residuos depositados.

Año	Deposición de Residuos Total [Tn]	% Biodegradable	% Moderadamente Biodegradable	% Relativamente Inerte	Residuos relativamente Inertes [Tn]	Residuos Moderadamente Biodegradables [Tn]	Residuos Biodegradables [Tn]
2010	540000	58,2	10,7	31,1	167940	57780	314280
2011	720000	58,2	10,7	31,1	223920	77040	419040
2012	720000	58,2	10,7	31,1	223920	77040	419040
2013	720000	58,2	10,7	31,1	223920	77040	419040
2014	720000	58,2	10,7	31,1	223920	77040	419040
2015	720000	58,2	10,7	31,1	223920	77040	419040
2016	240000	58,2	10,7	31,1	74640	25680	139680

6.5.5.2 Potencial de generación de metano L_0

Los valores del potencial de generación de metano L_0 utilizados corresponden a los mismos asignados por manual de British Columbia para cada tipo de residuo. Estos son 160 m³/ton para los residuos biodegradables y 120 m³/ton para los moderadamente biodegradables.

6.5.5.3 Tiempo de generación de biogás

Los residuos biodegradables requieren de un tiempo de 5 años para su completa degradación con la tasa pico de generación al final del primer año luego de su deposición mientras que los residuos moderadamente biodegradables requieren de un tiempo de descomposición de 15 años con la tasa pico de generación al final del quinto año (Tchobanoglous et al 1993). Utilizando estos valores y tomando en cuenta la relación entre altura y base de un triángulo, se puede calcular la tasa de generación para el final de cada año y la producción anual como promedio de dos tazas consecutivas.

En las tablas 6.13 y 6.14 se presentan la producción anual de metano por unidad de residuo para residuos biodegradables y moderadamente biodegradables. La Figura N° 6.1 muestra esto de forma gráfica.

Tabla N° 6.13: Producción Anual de Metano por unidad de residuo para residuos biodegradables.

Año	Tasa de producción de Metano [m ³ /año/Tn]	Producción promedio de Metano [m ³ /año/Tn]
0	0	---
1	64	32
2	48	56
3	32	40
4	16	24
5	0	8
	TOTAL	160

Tabla N° 6.14: Producción Anual de Metano por unidad de residuo para residuos moderadamente biodegradables.

Año	Tasa de producción de Metano [m ³ /año/Tn]	Producción promedio de Metano [m ³ /año/Tn]
0	0	---
1	3,2	1,6
2	6,4	4,8
3	9,6	8
4	12,8	11,2
5	16	14,4
6	14,4	15,2
7	12,8	13,6
8	11,2	12
9	9,6	10,4
10	8	8,8
11	6,4	7,2
12	4,8	5,6
13	3,2	4
14	1,6	2,4
15	0	0,8
	TOTAL	120

Evaluación de generación de biogás en el vertedero de Piedras Blancas, Córdoba.

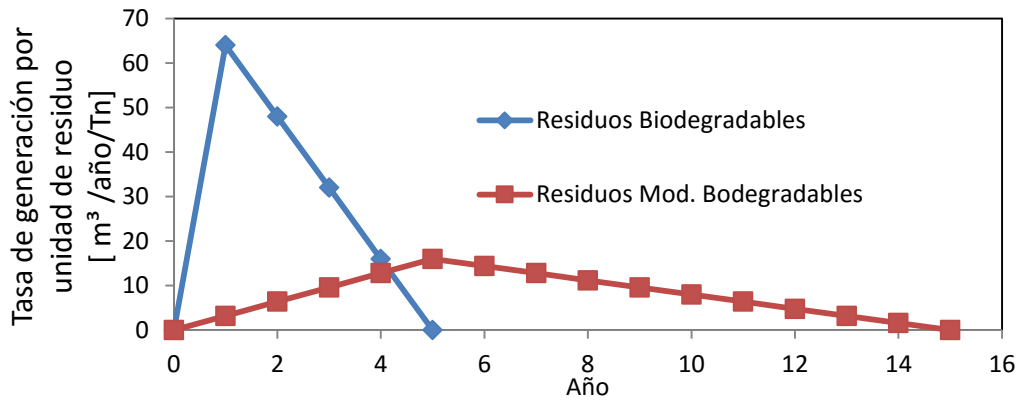


Figura N° 6.1: tasa de generación de residuos biodegradables y moderadamente biodegradables.

Utilizando los resultados anteriores se puede calcular la tasa de generación por unidad de residuo total como un promedio ponderado de las tasas de generación de cada clase de residuo en base a la composición promedio. La tabla 6.15 y la Figura N° 6.2 muestran la tasa de generación por tonelada de residuo, calculado en base a la ponderación de las curvas de generación de las dos clases de residuos consideradas.

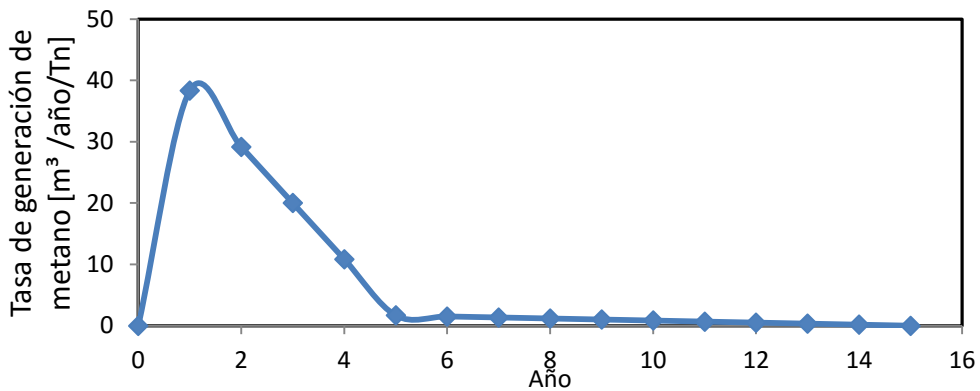


Figura N° 6.2: Tasa de generación por unidad de residuo.

Evaluación de generación de biogás en el vertedero de Piedras Blancas, Córdoba.

Tabla N° 6.15: Cálculo de curva de generación de gas por tonelada de residuo

Año	Tasa de generación para residuos biodegradables [m ³ /Tn/año]	Porcentaje de residuos biodegradables [%]	Generación de gas de residuos biodegradables [m ³ /Tn/año]	Generación de residuos moderadamente biodegradable [m ³ /Tn/año]	Porcentaje de residuos moderadamente biodegradables [m ³ /Tn/año]	Generación de biogás para residuos moderadamente Biodegradables [m ³ /Tn/año]	Tasa de generación de biogás [m ³ /Tn/año]	Tasa de generación de metano [m ³ /Tn]
0	0	59,37	0	0	10,5	0	0	
1	64	59,37	37,9968	3,2	10,5	0,336	38,3328	19,1664
2	48	59,37	28,4976	6,4	10,5	0,672	29,1696	33,7512
3	32	59,37	18,9984	9,6	10,5	1,008	20,0064	24,588
4	16	59,37	9,4992	12,8	10,5	1,344	10,8432	15,4248
5	0	59,37	0	16	10,5	1,68	1,68	6,2616
6	0	0		14,4	10,5	1,512	1,512	1,596
7	0	0		12,8	10,5	1,344	1,344	1,428
8	0	0		11,2	10,5	1,176	1,176	1,26
9	0	0		9,6	10,5	1,008	1,008	1,092
10	0	0		8	10,5	0,84	0,84	0,924
11	0	0		6,4	10,5	0,672	0,672	0,756
12	0	0		4,8	10,5	0,504	0,504	0,588
13	0	0		3,2	10,5	0,336	0,336	0,42
14	0	0		1,6	10,5	0,168	0,168	0,252
15	0	0		0	10,5	0	0	0,084

6.6 Resultados de los Modelos

6.6.1 Resultado Modelo British Columbia

6.6.1.1 Generación de biogás

Utilizando el programa desarrollado para el modelo de Estado de British Columbia e introduciendo los parámetros desarrollados para el modelo, así como los datos de disposición de residuos y el contenido de metano, se obtuvieron los siguientes resultados de generación de biogás, para una proyección de 50 años a partir del año de inicio de vertido de residuos sólidos. La figura 6.3 muestra la curva de generación de biogás dada por el modelo.

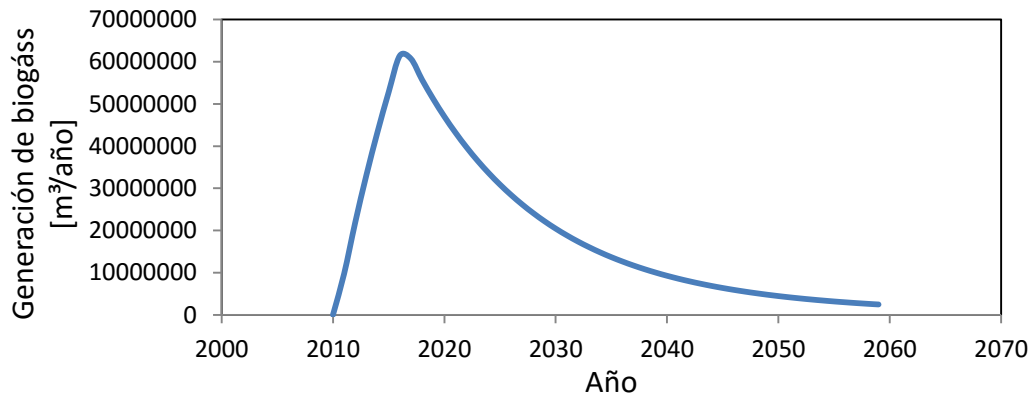


Figura N° 6.3: Generación de biogás según el modelo de British Columbia

La producción total de biogás para la proyección de 50 años es de 969.282.858 m³, siendo el valor de caudal pico 61.437.894 m³/año.

6.6.1.2 Generación de Metano

Utilizando el programa desarrollado para el modelo de Estado de British Columbia e introduciendo los parámetros desarrollados para el modelo, así como los datos de disposición de residuos, se obtuvieron los siguientes resultados de generación de metano, para una proyección de 50 años a partir del año de inicio de vertido de residuos sólidos. El contenido de metano considerado es de 50% en volumen de la composición total del biogás. La figura 6.4 muestra la curva de generación de metano dada por el modelo.

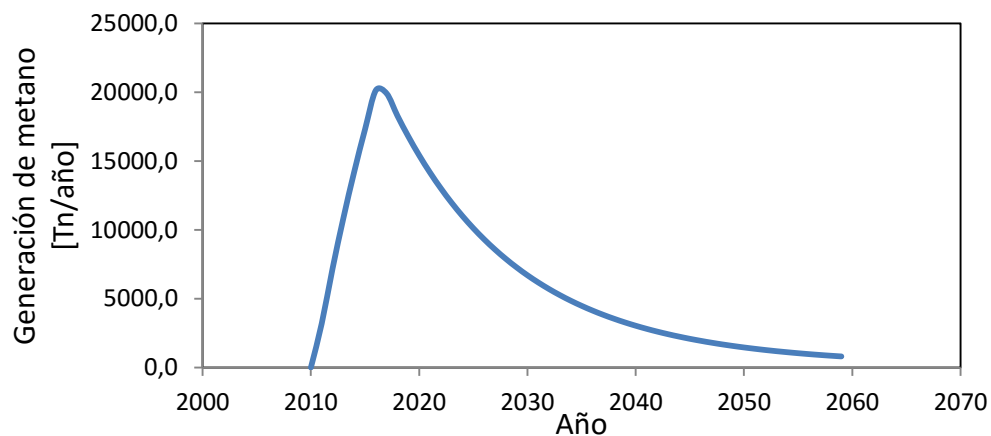


Figura N° 6.4: Generación de metano según el modelo de British Columbia

La producción total de metano para la proyección de 50 años es de 317.780 toneladas, siendo el valor de caudal pico 20.143 ton/año.

6.6.2 Modelo LandGEM

6.6.2.1 Generación de biogás

Utilizando el programa desarrollado para el modelo LandGEM introduciendo los parámetros desarrollados para el modelo, así como los datos de disposición de residuos y el contenido de metano, se obtuvieron los siguientes resultados de generación de biogás, para una proyección de 50 años a partir del año de inicio de vertido de residuos sólidos. La figura 6.5 muestra las curvas de generación de biogás correspondiente a los valores del límite inferior, límite superior y el promedio de los parámetros.

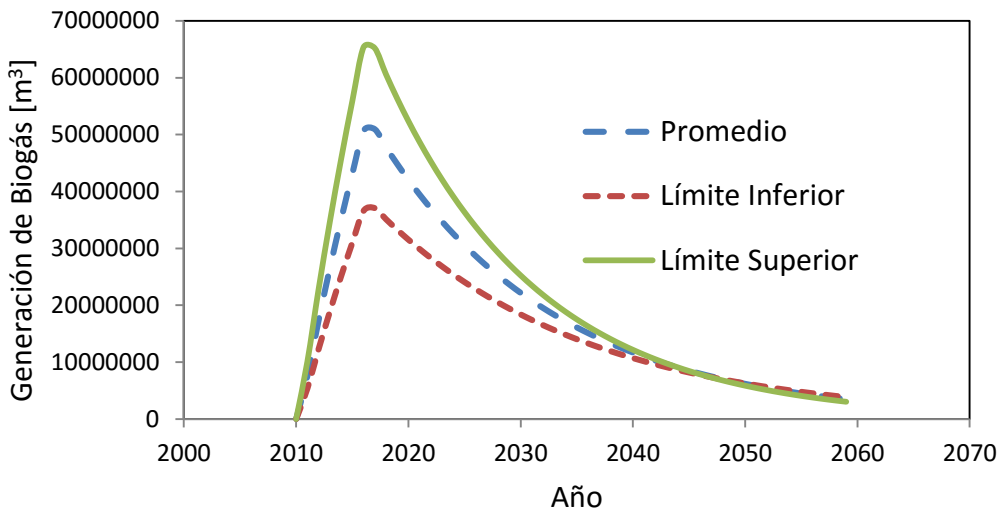


Figura N° 6.5 : Generación de biogás según el modelo LandGEM

En la Tabla N° 6.16 se muestra un análisis comparativo de las cantidades totales generadas de biogás tomando como referencia el valor calculado en base a los parámetros promedio.

Tabla N° 6.16: Comparación de los resultados obtenidos mediante el modelo LandGEM

	Valor del caudal pico [m³/año]	TOTAL [m³]	Diferencia en la generación total [%]
Promedio	50.922.293	949.434.039	0
Límite Inferior	37.065.898	765.294.188	-19,39
Límite Superior	65.332.014	1.120.413.513	18,01

6.6.2.2 Generación de metano

Con la utilización del modelo LandGEM se obtuvieron la curva de generación de metano utilizando los parámetros antes descriptos. Se realizó una proyección de 50 años a partir del año de inicio de vertido de residuos sólidos. Los resultados se muestran en la Figura N° 6.6.

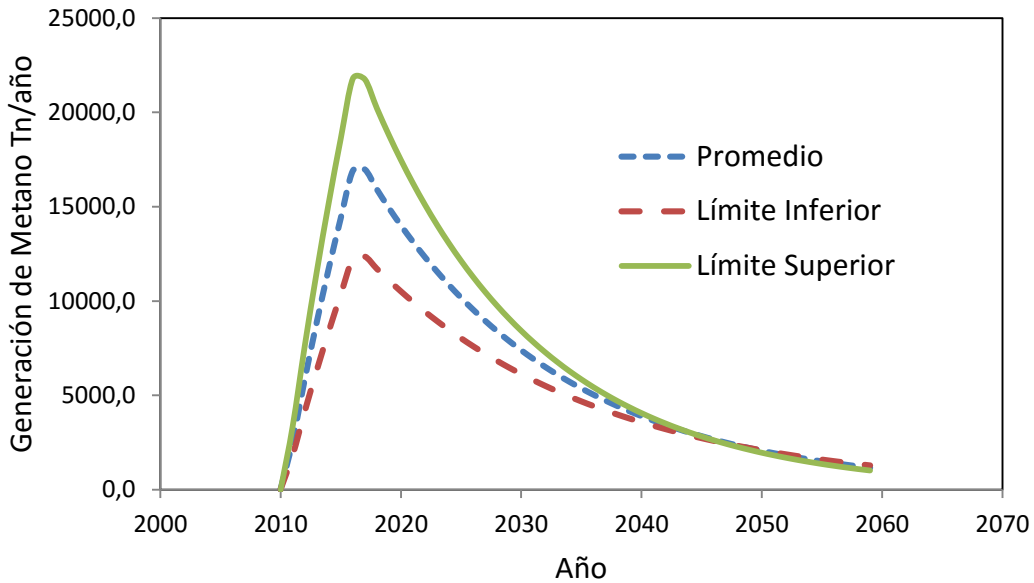


Figura N° 6.6 : Estimación de la generación de metano mediante el modelo LandGEM.

La producción total de metano para la proyección de 50 años es de 316.707 toneladas para el valor promedio de los parámetros, 373.741 toneladas para el límite superior y 255.282 toneladas para el límite inferior. El valor de caudal pico es 16.986 ton/año para el promedio, 21.752 ton/año para el límite superior y 12.364 ton/año para el límite inferior.

6.6.3 Estimación alternativa mediante el modelo LandGEM

6.6.3.1 Generación de biogás

Se una estimación de generación de biogás con el modelo LandGEM calculando el biogás generado para cada tipo de residuo y luego sumando dichas contribuciones. Similarmente a lo que realiza el modelo de British Columbia. La figura 6.7 muestra la curva de generación de biogás dada por el modelo.

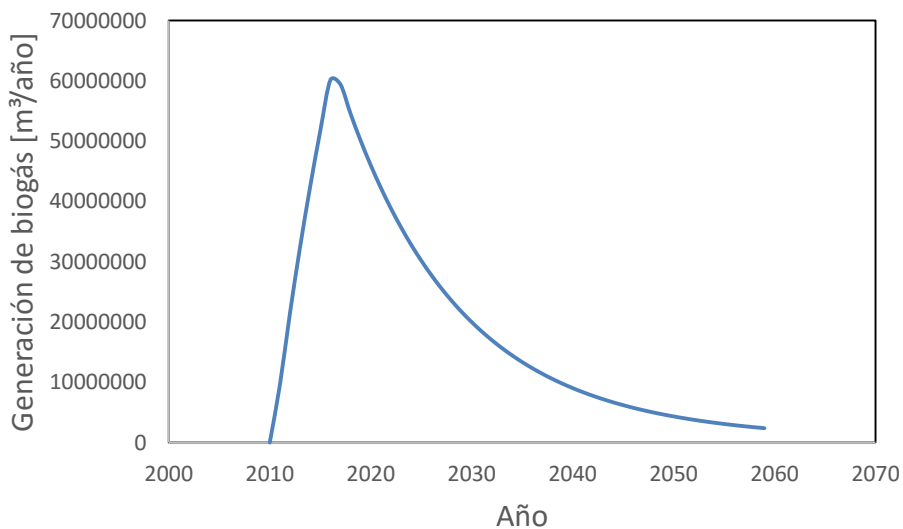


Figura N° 6.7: Generación de biogás según la estimación alternativa utilizando el modelo LandGEM

La producción total de biogás para la proyección de 50 años fue de 947.684.797 m³, siendo el valor de caudal pico 60.126.643 m³/año.

6.6.3.2 Generación de metano

En este caso la estimación se realizó de forma análoga a la de generación de biogás. La figura 6.8 muestra la curva de generación de metano dada por el modelo.

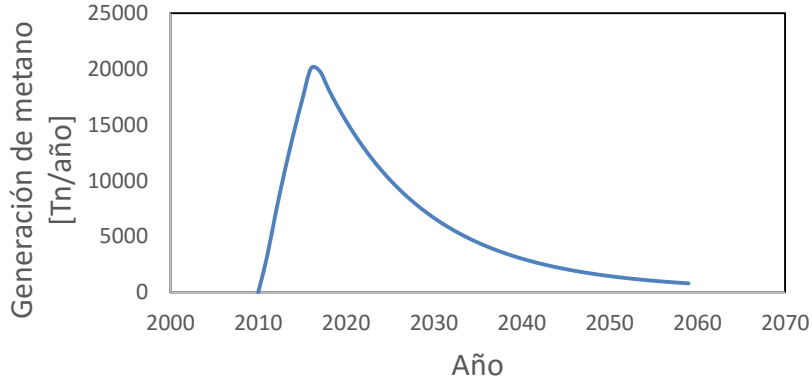


Figura N° 6.8: Generación de biogás según la estimación alternativa utilizando el modelo LandGEM

La producción total de metano para la proyección de 50 años fue de 316.123 toneladas, siendo el valor de caudal pico 20.057 ton/año.

6.6.4 Modelo de Orden Cero

6.6.4.1 Generación de biogás

Se considera un período de generación de 50 años para calcular la cantidad de biogás generado. Para aplicar la ecuación del modelo se considera los residuos depositados para cada año, calculando la generación de gas para dichos residuos y realizando la sumatoria al final. Se considera que la composición de metano es de 50% en volumen. La figura 6.9 muestra la curva de generación de biogás dada por el modelo.

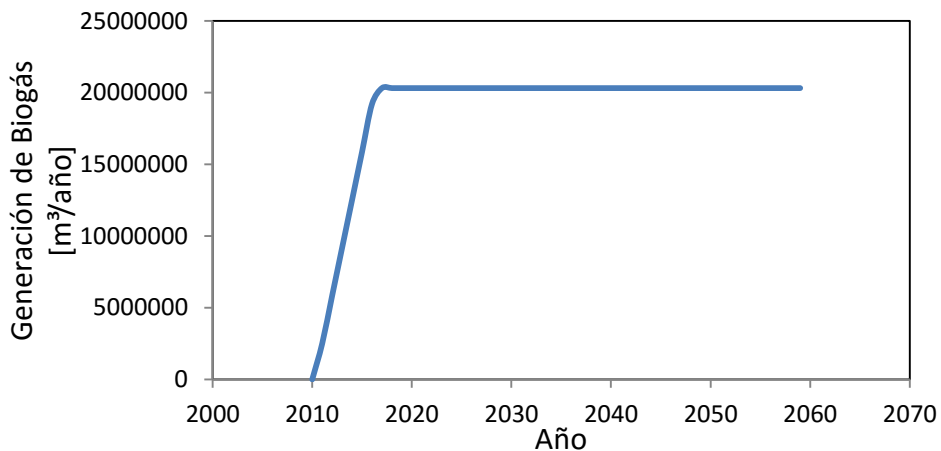


Figura N° 6.9 : Generación de biogás según el modelo de orden cero.

La producción total de biogás para la proyección de 50 años fue de 938.382.367 m³, siendo el valor de caudal pico 20.308.898 m³/año.

6.6.4.2 Generación de metano

El cálculo de la tasa de generación de metano según el modelo de orden cero ya fue realizado para la estimación de biogás. Aquí simplemente se reitera el resultado. Para el cálculo de la masa de metano se utilizó la ecuación de gases ideales asumiendo una temperatura de 15°C y 101kPa, dando como resultado una densidad de 0,679 kg/m³. La figura 6.3 muestra la curva de generación de metano dada por el modelo.

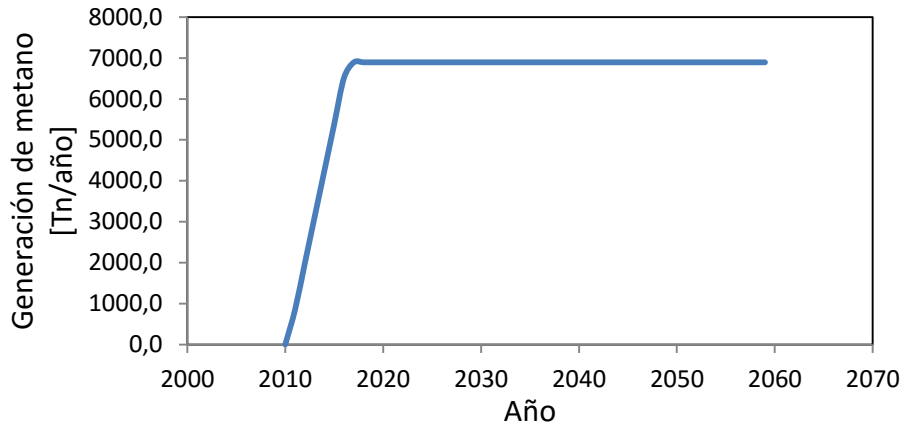


Figura N° 6.10 : Generación de metano según el modelo de orden cero.

La producción total de metano para la proyección de 50 años fue de 318.581 toneladas, siendo el valor de caudal pico 6.895 ton/año.

6.6.5 Modelo triangular

6.6.5.1 Generación de biogás

Para calcular la cantidad de biogás generado se procede a sumar las contribuciones individuales multiplicando la cantidad anual de generación de metano por la deposición de residuos en el correspondiente año. También se tiene en cuenta el tiempo de retraso de un año asumido por Tchobanoglous et al. (1993) antes del comienzo de la generación de biogás. Se asume una concentración de metano de 50% en volumen lo cual da como resultado que cantidad de biogás generado sea el doble de la cantidad de metano. La Figura N° 6.11 muestra la curva de generación de biogás dada por el modelo.

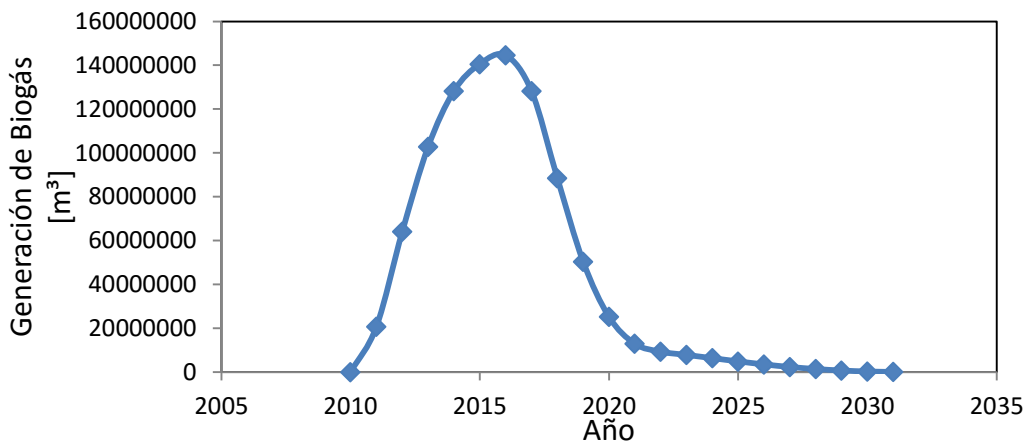


Figura N° 6.11: Generación de biogás según el modelo triangular.

La producción total de biogás para la proyección de 50 años fue de 942.505.920 m³, siendo el valor de caudal pico 144.560.160 m³/año.

6.6.5.2 Generación de metano

Como en el caso del modelo de orden cero, aquí se reiteran los cálculos realizados para biogás. Para el cálculo de la masa de metano se utilizó la ecuación de gases ideales asumiendo una temperatura de 15°C y 101kPa, dando como resultado una densidad de 0,679 kg/m³. La figura 6.12 muestra la curva de generación de biogás dada por el modelo.

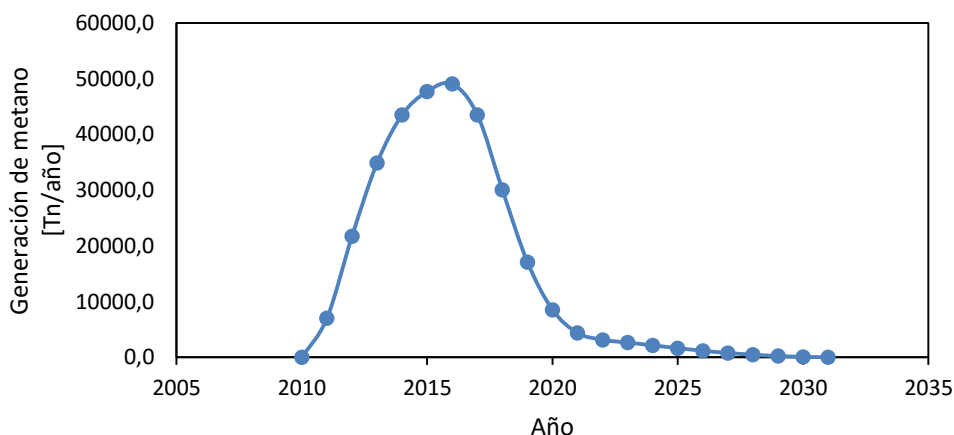


Figura N° 6.12: Generación de metano según el modelo triangular.

La producción total de metano para la proyección de 50 años fue de 319.981 toneladas, siendo el valor de caudal pico 49.078 ton/año.

6.7 Análisis de variabilidad

Dado el hecho que existen incertidumbres en la determinación de los diferentes parámetros considerados tales como el potencial de generación de metano L_0 , el coeficiente de velocidad de generación de metano k y la cantidad de residuos dispuestos, se procede a realizar un análisis de sensibilidad estimando la variabilidad en el biogás generado considerando una variación en dichos parámetros. También se evalúa la influencia de otros factores que afectan indirectamente la producción de biogás como la disminución del factor por adición de agua, que interviene en la determinación de k y L_0 . El cálculo de la generación de biogás se realiza mediante el modelo LandGEM.

6.7.1 Efecto de la cantidad de residuos dispuestos

Para efectuar este análisis se consideró una variación en peso de +/- 10% de los residuos depositados. Los valores se presentan en la Tabla N° 6.17.

Para el cálculo de biogás se utilizó el modelo LandGEM utilizando los parámetros k y L_0 promedio (0,064 años⁻¹ y 113,6 m³/ton respectivamente) y variando solamente la cantidad de residuos dispuestos en el vertedero. En la Figura N° 6.13 se muestran las curvas de generación de biogás para los diferentes casos.

Tabla N° 6.17: Disposición de residuos con una variación de +/- 10%.

Año	Cantidad de residuos depositados [ton]	Variación +10%	Variación -10%
2010	540000	594000	486000
2011	720000	792000	648000
2012	720000	792000	648000
2013	720000	792000	648000
2014	720000	792000	648000
2015	720000	792000	648000
2016	240000	264000	216000

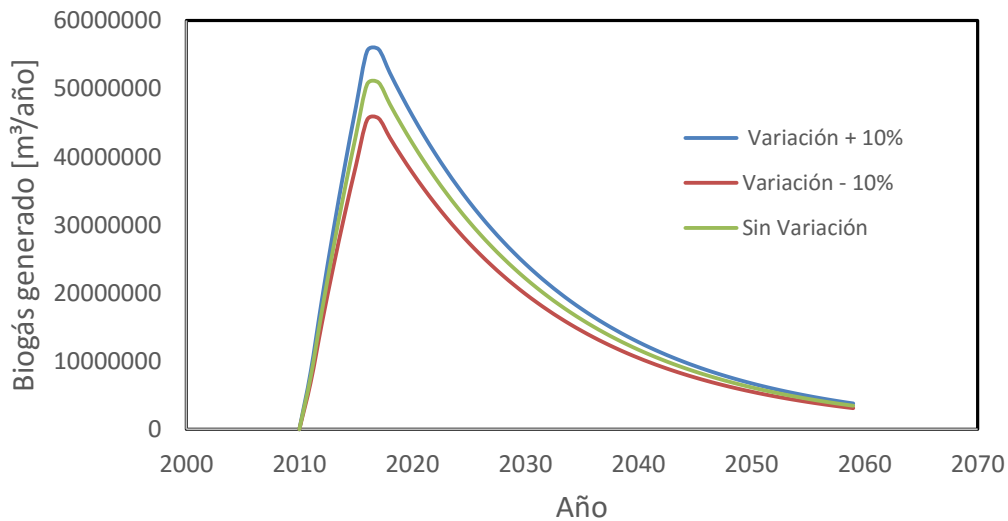


Figura N° 6.13 : Biogás generado calculado en base a una variación de los residuos de +/- 10%.

Comparando los resultados de generación total con los calculados originalmente para los mismos parámetros k y L_0 (0,064 años y 113,6 m³/Ton respectivamente) y disposición de residuos supuesta originalmente se puede evaluar la incidencia de la disposición de residuos en el modelo de la generación de biogás. Los valores de generación total de biogás son presentados en la Tabla N° 6.18.

Tabla N° 6.18: Biogás total generado en base la variación en +/- 10% en la disposición de residuos sólidos.

Disposición de residuos	Biogás generado [m³]	Diferencia [%]	Valor del caudal pico [m³/año]	Diferencia [%]
Sin Variación	949.434.039	0	50.922.293	0
Variación +10%	1.040.712.961	9,6	55.817.980	9,6
Variación -10%	851.492.423	-10,3	45.669.256	-10,3

6.7.2 Coeficiente de velocidad de generación de metano k

Para efectuar este análisis se consideró una variación k de +/- 10% de su valor promedio presentados en la Tabla N° 6.19.

Tabla N° 6.19: Variación del coeficiente de velocidad de generación de metano k en +/- 10%.

Parámetro	Sin Variación	Variación + 10%	Variación - 10%
k [año ⁻¹]	0,064	0,0576	0,0704

La generación de biogás se calcula utilizando el modelo LandGEM para cada valor diferente de k . La Figura N° 6.14 muestra los resultados del modelos para cada variación de k , mientras que la Tabla N° 6.20 expone la variación en la cantidad total de biogás generado.

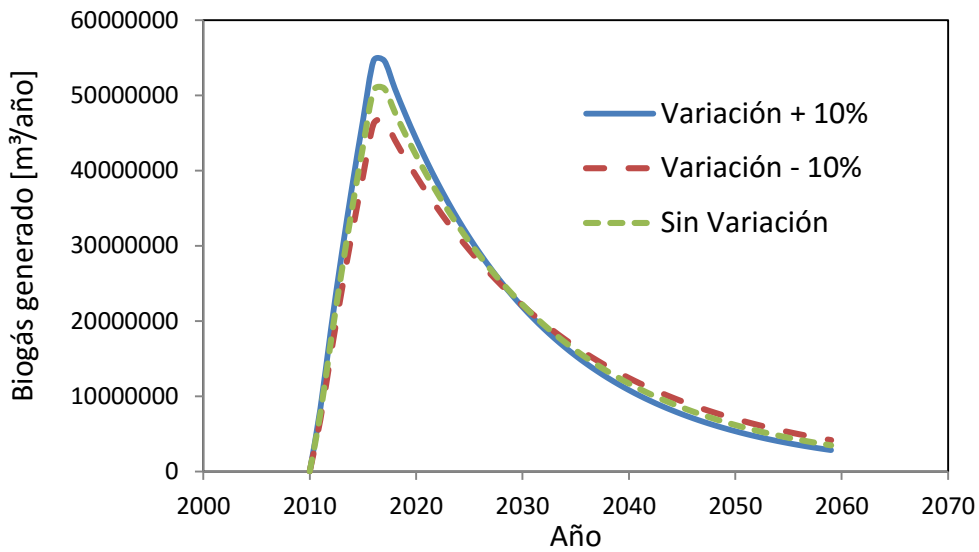


Figura N° 6.14 : Biogás generado calculado en base a una variación de k en +/- 10% de su valor promedio.

Tabla N° 6.20: Biogás total generado y valor pico en base la variación k en +/- 10% de su valor promedio.

Variación	Biogás Generado [m³]	Diferencia [%]	Valor de caudal pico [m³/año]	Diferencia [%]
Sin variación	949.434.039	0	50.922.293	0
Variación + 10%	959.724.543	1,08	54.604.309	7,23
Variación - 10%	927.924.769	-2,27	46.690.588	-8,31

6.7.3 Potencial de generación de metano L_0

Para efectuar este análisis se consideró una variación L_0 de +/- 10% de su valor promedio presentados en la Tabla N° 6.21:

Tabla N° 6.21: Variación del potencial de generación de metano L_0 en +/- 10%.

Parámetros	Sin Variación	Variación - 10%	Variación + 10%
L_0 [m ³ /Ton]	113,6	102,24	124,96

La Figura N° 6.15 muestra la curva de generación de biogás para cada valor de L_0 y Tabla N° 6.22 expone la variación en la cantidad total de biogás generado.

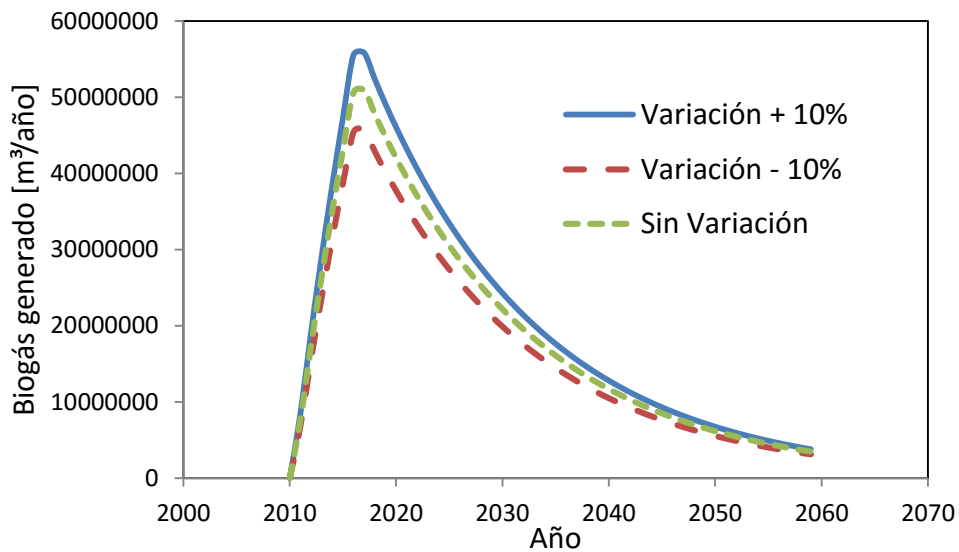


Figura N° 6.15 : Biogás generado calculado en base a una variación de L_0 en +/- 10% de su valor promedio.

Tabla N° 6.22: Biogás total generado en base la variación L_0 en +/- 10% de su valor promedio.

Variación	Biogás Generado [m ³]	Comparación [%]	Valor de caudal pico [m ³ /año]	Comparación [%]
Sin variación	949.434.039	0	50.922.293	0,00
Variación + 10%	1.040.712.961	9,61	55.817.980	9,61
Variación - 10%	851.492.423	-10,32	45.669.256	-10,32

6.7.4 Factor por adición de agua

Entre las hipótesis iniciales consideradas en la determinación del factor por adición de agua, se consideró que el vertedero no poseía un sistema de cobertura totalmente efectiva que impida de forma eficiente la infiltración de agua y un sistema eficiente de extracción de lixiviados. Planteando una hipótesis alternativa de que esto si ocurriera, lo que conduciría a menor contenido de humedad en los residuos, puede calcularse la producción de biogás tomando un factor por adición de agua de 0,9. Con este nuevo factor se determinan nuevamente los

parámetros k y L_0 promedio en base a la misma metodología utilizada para el modelo LandGEM. La Tabla N° 6.23 presenta la variación de k y L_0 .

Tabla N° 6.23: Variación del Factor por adición de agua en -10%

Parámetros	k	L_0
Residuos Biodegradables	0,018	20
Residuos Mod. Biodegradables	0,036	120
Residuos Relativamente Inertes	0,081	160
Promedio	0,057	113,6

Cabe destacar que el factor por adición de agua solo afecta al coeficiente de velocidad de generación de metano k .

A continuación en la Tabla N° 6.24 se muestra la comparación de la cantidad total de biogás generado en base a los cambios de los parámetros promedio por la variación del Factor por Adición de Agua (FAA).

Tabla N° 6.24: Generación total de biogás para diferentes valores del Factor por Adición de Agua

Variación relativa	Parámetros	Biogás generado [m ³]	Diferencia [%]	Valor de caudal pico [m ³ /año]	Diferencia [%]
0	FAA= 1,0	949.434.039	0	50.922.293	0,0
-10%	FAA= 0,9	925.934.919	-2,5	46.300.449	-9,1

6.7.5 Comparación de resultados

Los resultados muestran que los factores que más incidencia tienen en la generación de biogás son el potencial de generación de metano L_0 y cantidad de residuos dispuestos. Vemos una variación idéntica de la cantidad de biogás producido para ambos factores. Esto es razonable si consideramos que en la ecuación de Scholl-Canyon considerada en este análisis los dos parámetros tienen una influencia que directamente es proporcional en la generación de biogás.

El coeficiente de velocidad de generación de metano k parece tener una gran influencia en la generación total de biogás. Sin embargo, analizando el apartado 6.7.2, se puede observar que k si bien no influye en el volumen total de biogás, si tiene una influencia marcada en la variación del caudal máximo y en el ritmo de decaimiento.

La variación de los diferentes parámetros parece tener una influencia directamente proporcional en la variación del caudal pico, ya que las diferencias encontradas en todos los casos oscilan el 10%.

Para el caso de la variación del factor por adición de agua, al estar directamente relacionado con k , acusa prácticamente la misma influencia que este último. De hecho es fácil inducir que aplicando un factor por adición de agua de 0,9 se obtiene una variación de k de -10% con respecto al valor obtenido para el factor unitario. La Tabla N° 6.25 muestra un resumen de los resultados obtenidos. En la Figura N° 6.16 se puede observar la variación de la generación total de biogás y en la Figura N° 6.17 se puede observar la variación de los caudales pico.

Tabla N° 6.25: Comparación de biogás total generado en base la variación de la disposición de residuos, factor por adición de agua, k y L₀.

Variable	Variación %	Biogás [m ³]	Diferencia [%]	Valor del caudal pico [m ³ /año]	Diferencia [%]
Residuos	10	1.040.712.961	9,6	55.817.980	9,61
	0	949.434.039	0	50.922.293	0,00
	-10	851.492.423	-10,3	45.669.256	-10,32
FAA	0	949.434.039	0	50.922.293	0,00
	-10	925.934.919	-2,48	46.300.449	-9,08
k	10	959.724.543	1,08	54.604.309	7,23
	0	949.434.039	0	50.922.293	0,00
	-10	927.924.769	-2,27	46.690.588	-8,31
L ₀	10	1.040.712.961	9,61	55.817.980	9,61
	0	949.434.039	0	50.922.293	0,00
	-10	851.492.423	-10,32	45.669.256	-10,32

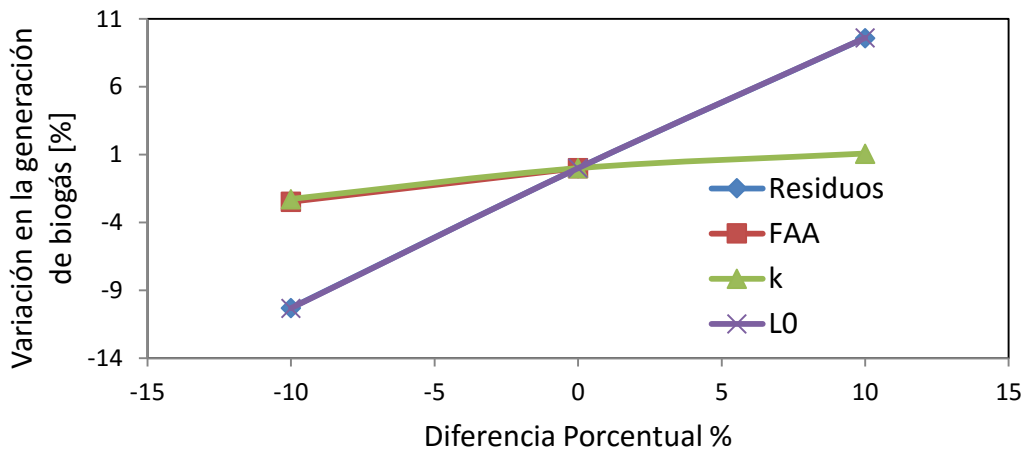


Figura N° 6.16 : Comparación de biogás total generado en base a la variación de la disposición de residuos, factor por adición de agua, k y L₀.

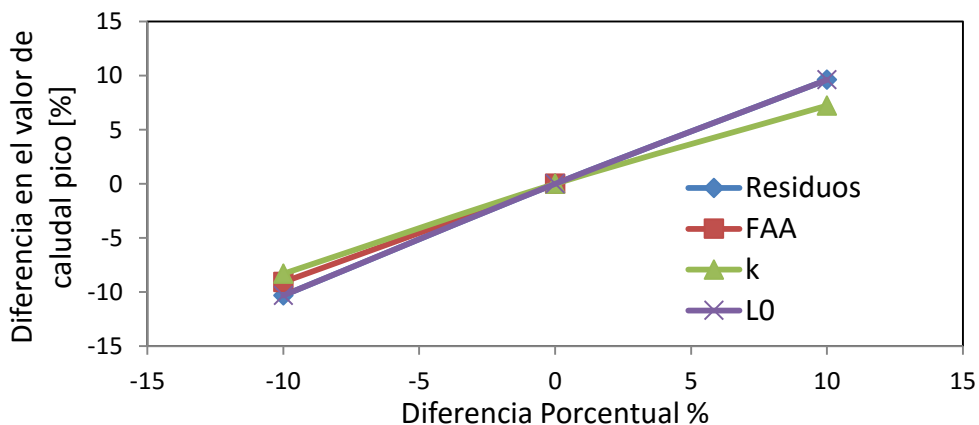


Figura N° 6.17 : Comparación de los valores de caudal pico en base a la variación de la disposición de residuos, factor por adición de agua, k y L₀.

6.8 Análisis de resultados

A continuación, en la Tabla N° 6.26 se presentan los resultados de generación total de biogás para los diferentes modelos y su correspondiente generación unitaria:

Tabla N° 6.26: Generación total de biogás según cada modelo y generación unitaria de los mismos.

Modelo		Generación Total [m ³]	Generación por unidad de residuo [m ³ /Ton]	Generación de Metano por unidad de residuo [m ³ /Ton]
Orden Cero		938.382.367	214	107
Triangular		942.505.920	215	108
LandGEM	Límite Inferior	765.294.188	175	87
	Promedio	949.434.039	217	108
	Límite Superior	1.120.413.513	256	128
British Columbia		969.282.858	221	111
LandGEM Met. Alternativo		947.684.797	216	108

Teniendo en cuenta que el contenido de metano asumido para cada una de las estimaciones fue de 50% en volumen, podemos deducir que el valor de generación de metano por unidad de residuo corresponde físicamente al potencial de generación de metano L_0 . Recordando que este valor es de 120 m³/ton para residuos moderadamente biodegradables, 180 m³/ton para residuos biodegradables y 113,6 m³/ton según el modelo LandGEM para los valores promedio, podemos inferir que los resultados sobre generación unitaria se encuentran muy próximos entre sí.

Por otra parte, en los modelos en que se tuvo en cuenta la ecuación de Scholl-Canyon la tasa de generación de biogás nunca llega a cero sino que decrece indefinidamente. Teniendo en cuenta esto, es razonable que los modelos presenten valores de la cantidad de metano generado por unidad de residuos ligeramente inferiores al valor de L_0 para el modelo LandGEM.

6.9 Biogás aprovechable

6.9.1 Eficiencia de colección de biogás

No toda la cantidad de biogás generado resulta aprovechable. La cantidad de biogás aprovechable depende de factores tales como el sistema de cobertura, el diseño y manejo del sistema de colección de biogás, el sistema de colección de lixiviados, grado de compactación de los residuos, manejo de incendios y la profundidad del vertedero (US EPA, 2009)

La eficiencia de captura de biogás se determina como la relación entre la cantidad de biogás modelada y la medida en el sistema de recuperación. Los valores normales se encuentran entre un 50% a un 75% (Spokas et al. 2006).

Spokas et al. (2006), US EPA (2008) determinaron que en los casos estudiados en Francia, las coberturas compuestas por suelo arcilloso compactados y geomembranas todas presentaban una eficiencia de colección de gases superior al 84%. Los resultados de los estudios publicados por estos investigadores indican las siguientes eficiencias de los sistemas de cobertura presentados en la tabla Tabla N° 6.27.

Tabla N° 6.27: Eficiencia de colección de biogás

Características Cobertura	Eficiencia de colección de gases
Celda en operación con sistema de colección de gases activo	35%
Celda con cobertura temporal y sistema de colección activo	65%
Celdas cerradas con barrera de suelo arcilloso compactado y sistema de colección de gas activo	85%
Celda cerrada con sistema de cierre con geomembrana y sistema de colección de gas activo	90%
US EPA recomienda por defecto	75%

En el caso del vertedero de Piedras Blancas la cantidad de biogás recolectado para cada uno de los casos planteados serían las presentadas en la Tabla N° 6.28:

Tabla N° 6.28: Potencial de colección de biogás del vertedero de Piedras Blancas

Características Cobertura	Eficiencia de colección de gases	Generación de biogás [m ³]	Colección de biogás [m ³]
Celda en operación con sistema de colección de gases activo	35%	949.434.039	332.301.914
Celda con cobertura temporal y sistema de colección activo	65%	949.434.039	617.132.126
Celdas cerradas con barrera de suelo arcilloso compactado y sistema de colección de gas activo	85%	949.434.039	807.018.933
Celda cerrada con sistema de cierre con geomembrana y sistema de colección de gas activo	90%	949.434.039	854.490.635
US EPA recomienda por defecto	75%	949.434.039	712.075.530

6.10 Comparación de potencial de generación de gas con medidas en el terreno.

Se compararon las estimaciones realizadas con el modelo LandGEM con las mediciones de campo realizadas por el CIQA – UTN. Debido a que sólo se cuenta con mediciones puntuales en una de las chimeneas de venteo de gas, se determinó la emisión de gases por unidad de superficie del enterramiento considerando que el radio de la zona de influencia de la chimenea de venteo es de 45 metros (USACE, 2013). A partir de este valor se estimó la emisión de toda la superficie del enterramiento año a año.

En la Tabla N° 6.29 se presenta la comparación entre las estimaciones de emisiones realizadas a partir de los valores medidos en campo y las estimaciones realizadas con el modelo LandGEM. Se puede indicar que las aproximaciones obtenidas son aceptables y que la diferencia entre los valores obtenidos de modelaciones y los determinados por mediciones se encuentran dentro los rangos aceptables considerando las limitaciones importantes en la estimación de emisiones a partir de la medición en campo en un solo punto, la escasa representatividad del punto de medición respecto del total de las celdas de enterramiento y algunos valores dudosos reportados en las mediciones. En tal sentido se debe destacar que las mediciones reportan concentraciones de metano inferiores a las esperadas y concentraciones de oligogases considerablemente mayores a lo esperable.

Tabla N° 6.29: Eficiencia de los sistemas de colección de gases

Año	Tasa emis. promedio [dscm/s]	Tasa emis. Promedio corregida [m ³ /s]	Tasa emis. promedio [m ³ /año]	Radio de influencia [m]	Área de influencia [m ²]	Caudal específico [m ³ /año/m ²]	Área total del vertedero [m ²]	Caudal total [m ³ /año]	Caudal calculado mediante LandGEM [m ³ /año]	Dif %
2010	0,0173	0,018198	573885,9	45	6361,74	90,20895	250000	22552238	7657276	195
2011	0,0155	0,016387	516774,5			81,23163		20307909	17392263	17
2012	0,0188	0,019868	626561,4			98,48900		24622250	26523731	-7
2013	0,0359	0,037873	1194348,0			187,73921		46934802	26523732	77

6.11 Síntesis y Conclusiones

Es posible afirmar que la generación de biogás para el relleno sanitario de Piedras Blancas se encuentra entre 765 millones de m³ y 1120 millones de m³ considerando un periodo de 50 años. La mayoría de los modelos utilizados han reportado valores similares, los cuales se encuentran en torno a los 950 millones de m³.

El análisis de sensibilidad demuestra que los parámetros que más influyen en la generación de biogás son la cantidad de residuos dispuestos y el valor del potencial de generación de metano L_0 , el que a su vez depende principalmente de la composición de los residuos. Ambas variables evidenciaron una influencia lineal en la generación de biogás.

El potencial de colección de biogás se encuentra entre 352 millones de m³ y 854 millones de m³ dependiendo del sistema de colección empleado y de la configuración de la cobertura final del vertedero.

Se puede concluir que las estimaciones de generación de biogás constituyen una aproximación aceptable en comparación con las mediciones de caracterización de gases realizadas en el terreno, considerando las limitaciones importantes en la estimación de emisiones a partir de la medición en campo en un solo punto.

Capítulo 7: Comparación generación de biogás estimada con otros predios.

7.1 Justificación del análisis comparativo

En el presente capítulo se analizan diferentes proyectos de implementación de un sistema de recolección de biogás formulados en la región. En particular se describen los proyectos de Olavarría y Salta en Argentina y Montevideo en Uruguay. Todos ellos se llevaron a cabo como resultado de la implementación de diferentes mecanismos de incentivos pertenecientes a la Organización de las Naciones Unidas para la reducción de gases de efecto invernadero.

Se realiza una comparación entre los volúmenes de biogás generado por cada uno de los predios respectivos y Piedras Blancas, considerando diferentes variables tales como clima, composición de residuos y condiciones de operación de cada sitio. El objetivo principal de este análisis es establecer si los valores dados para el vertedero de Piedras Blancas son razonables en contraste con los de otros casos de la región.

7.2 Descripción del predio de Olavarría

7.2.1 Descripción general

El partido de Olavarría se encuentra localizado en el centro de la provincia de Buenos Aires. El acceso al partido y a la ciudad cabecera (Olavarría) puede realizarse a través de la Ruta Nacional N° 226 y la Provincial N° 51, que la comunica con la Ruta Nacional N° 3. La distancia que separa a la cabecera del partido de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires es de 350 km, estando también próxima a otras ciudades importantes, como Mar del Plata (295 km) y Bahía Blanca (320 km). La ubicación del partido de Olavarría se muestra en la Figura N° 7.1. El partido cuenta con una superficie de 7.715 km² y una población de 103.718 habitantes.

En cuanto las características climáticas, el valor promedio de precipitación histórico es de 998,8 mm. El año con el valor promedio máximo fue 1990 con 1157,7 mm y el mínimo fue el año 1989 con 924 mm.



Figura N° 7.1: Ubicación del partido de Olavarría

7.2.2 Proyecto de recolección de biogás

El proyecto de recuperación de gas del vertedero de Olavarría consiste en la recolección de gas del mismo para su combustión y venta de las reducciones de emisiones de gases de efecto invernadero a través del Fondo del Carbono para el Desarrollo Comunitario, siendo esto posible debido a la ratificación del Protocolo de Kyoto por parte de la República Argentina, lo que la hace elegible para la aplicación del Mecanismo de Desarrollo Limpio (CDM por sus siglas en inglés). El proyecto fue financiado mediante el Fondo de Financiamiento de Carbono del Banco Mundial.

Dicho proyecto también tiene un componente social considerando la inversión de las ganancias producidas por la quema del gas en la instalación de una red de agua potable en la localidad rural de Espigas, situada a 80 kilómetros de la Ciudad de Olavarría, y con una población de 550 habitantes, y sistemas de calefacción mediante energía solar en establecimientos educativos locales.

El proyecto es el primero de este tipo implementado en la Argentina. Este fue llevado a cabo mediante una asociación pública-privada compuesta por la Municipalidad de Olavarría, el operador del vertedero y la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.

7.2.3 Descripción del predio de enterramiento

La zona de emplazamiento del vertedero corresponde a 33 hectáreas de terrenos de propiedad municipal adquiridos expresamente para la construcción del relleno sanitario, con una capacidad de aproximadamente 30 años si la tasa de generación de RSU se mantiene en sus promedios históricos (entre 80 y 100 toneladas diarias). El lugar cuenta con dos parcelas de 16 y 17 hectáreas.

La apertura de los módulos se realiza cada cuatro años aproximadamente y es una tarea que está a cargo de la Secretaría de Obras y Servicios Públicos de la Municipalidad de Olavarría. La excavación de los módulos se realiza hasta 1,8 m de profundidad por cuestiones de seguridad respecto del acuífero subterráneo más cercano, el cual se encuentra aproximadamente a 3 m de profundidad.

Para la disposición de los RSU se coloca una primera capa de aislante de arcilla y luego la membrana de PVC de 800 micrones de espesor, sobre la cual se coloca otra capa de arcilla de 30 cm de espesor. Se colocan los caños verticales para el venteo del gas y un caño central (con pendiente longitudinal) para la colección de lixiviados, el cual se conecta por medio de un sistema de bombeo a la laguna principal para la estabilización y reinyección de los mismos al relleno.

Desde el año 1999 se comenzó con el ingreso y disposición de los residuos de la ciudad en este predio. El primer módulo tiene una superficie de 120 por 220 m. Su altura media es de 10 m sobre el nivel de la membrana impermeable. El talud tiene una pendiente de 3:1 y la base de 5 %. Dicho módulo fue clausurado en el año 2004.

7.2.4 Disposición de Residuos

Teniendo en cuenta que la cantidad de residuos dispuestos a la fecha del estudio (2005) fueron de 140.000 toneladas y con un promedio de generación para el periodo de acreditación de 40.800 toneladas al año, se puede estimar la cantidad de residuos dispuesta dicho período. Según el estudio de impacto ambiental llevado a cabo por la Universidad Nacional del Centro, la composición de los RSU de Olavarría contiene un 79 % de materia orgánica: 63% son residuos de comida y 16% papel y cartón. En base a estos datos se puede calcular cual es la cantidad de

esta clase de residuo que es la principal responsable de la generación de biogás y de metano. En la Tabla N° 7.1 se muestra el tonelaje de residuos del vertedero de Olavarría.

Tabla N° 7.1: Estimación de disposición de residuos para el vertedero de la ciudad de Olavarría.

Año	Residuos Depositados [Ton/año]	Residuos Biodegradables Depositados [Ton/año]
2006	180800	142832
2007	221600	175064
2008	262400	207296
2009	303200	239528
2010	344000	271760
2011	384800	303992
2012	425600	336224
2013	466400	368456
2014	507200	400688
2015	548000	432920
2016	588800	465152
2017	629600	497384
2018	670400	529616
2019	711200	561848
2020	752000	594080
2021	792800	626312
2022	833600	658544
2023	874400	690776
2024	915200	723008
2025	956000	755240
2026	996800	787472

7.2.5 Generación de biogás

Según un estudio de campo realizado (Blanco y Santalla, 2002) la composición del gas producido es de 53 % de metano en volumen.

Para calcular las emisiones generadas, una ecuación de decaimiento de primer orden fue utilizada siguiendo la metodología dada por Guía de Buenas Prácticas y Gestión de la Incertidumbre en los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático de las Organización de Naciones Unidas. A continuación se detallan los parámetros considerados y sus valores:

Los resultados extraídos del informe del Banco Mundial sobre la reducción de emisiones equivalentes de dióxido de carbono calculados para un escenario base para un período de 21 años se muestran en la Tabla N° 7.2:

Tabla N° 7.2: Emisiones base calculadas en Ton CO₂e.

Año	Emisiones base [Ton CO ₂ e/año]	Emisiones base acumuladas [Ton CO ₂ e]
2006	9,315	9,315
2007	10,54	19,855
2008	11,692	31,547
2009	12,778	44,325
2010	13,805	58,13
2011	14,78	72,91
2012	15,709	88,619
2013	16,597	105,215
2014	17,448	122,663
2015	18,267	140,93
2016	19,059	159,989
2017	19,826	179,815
2018	20,572	200,386
2019	21,3	221,686
2020	22,012	243,699
2021	22,712	266,411
2022	23,402	289,813
2023	24,083	313,896
2024	24,757	338,653
2025	25,427	364,081
2026	26,094	390,175

Teniendo en cuenta la influencia de diferentes parámetros utilizados en el cálculo de las emisiones tales como la eficiencia de recolección, el contenido de metano en el biogás, la densidad del metano bajo las condiciones dadas y el potencial de efecto invernadero para el mismo se puede realizar los cálculos inversos para determinar la generación de metano y de biogás estimada. En la Tabla N° 7.3 se presentan los parámetros considerados.

Tabla N° 7.3: Parámetros utilizados. Fuente: informe del Banco Mundial

Parámetros	Valores
Eficiencia de recolección:	0,5
Fracción de contenido de metano:	0,53
Temperatura [°C]:	15
Presión [kPa]:	101
Densidad [kg/m ³):	0,658
Potencial de Efecto Invernadero del Metano:	21
k [año ⁻¹]	0,099
L_0 [m ³ CH ₄ /Mg]:	102

La metodología para calcular la cantidad de biogás generado es la siguiente:

- Emisiones Base: se obtiene como dato del informe del Banco Mundial
- Recolección de Metano [Ton/año]: se obtiene dividiendo las emisiones base por el potencial de efecto invernadero del metano.
- Generación de metano [Ton/año]: se calcula dividiendo la tasa de recolección de metano por la eficiencia de recolección supuesta.
- Generación de metano [m³/año]: para realizar una equivalencia del metano en volumen se procede a dividirlos por la densidad. Esta última fue calculada en base a la ecuación de los gases ideales, tomando una temperatura de 15 °C y una presión de 101 kPa.
- Generación de Biogás [m³/año]: Teniendo en cuenta la fracción de metano en el biogás generado se deduce este último dividiendo el metano calculado en unidades de volumen por el dicha fracción.

En la Tabla N° 7.4 se presenta el cálculo de la generación de biogás para el vertedero de Olavarría

Tabla N° 7.4: Generación de biogás para el vertedero de Olavarría

	Emisiones Base	Recolección de Metano	Generación de metano	Generación de metano	Generación de Biogás
	Ton CO ₂ e/año	[Ton/año]	[Ton/año]	[m ³ /año]	[m ³ /año]
2006	9,315	0,444	0,887	1348	2544
2007	10,54	0,502	1,004	1526	2878
2008	11,692	0,557	1,114	1692	3193
2009	12,778	0,608	1,217	1849	3490
2010	13,805	0,657	1,315	1998	3770
2011	14,78	0,704	1,408	2139	4036
2012	15,709	0,748	1,496	2274	4290
2013	16,597	0,790	1,581	2402	4533
2014	17,448	0,831	1,662	2525	4765
2015	18,267	0,870	1,740	2644	4989
2016	19,059	0,908	1,815	2759	5205
2017	19,826	0,944	1,888	2870	5414
2018	20,572	0,980	1,959	2978	5618
2019	21,3	1,014	2,029	3083	5817
2020	22,012	1,048	2,096	3186	6011
2021	22,712	1,082	2,163	3287	6202
2022	23,402	1,114	2,229	3387	6391
2023	24,083	1,147	2,294	3486	6577
2024	24,757	1,179	2,358	3583	6761
2025	25,427	1,211	2,422	3680	6944
2026	26,094	1,243	2,485	3777	7126

7.2.6 Generación Unitaria

En base a los resultados anteriores es posible estimar la cantidad de biogás generado por unidad de residuo biodegradable. Entre otros factores a tener en cuenta y que influyen en la generación de biogás se encuentra la antigüedad de los residuos dispuestos. Esto se tiene en cuenta referenciando la tasa de generación de metano a partir del año en que el vertedero empezó a funcionar. El cálculo de generación unitaria de biogás se presenta en la Tabla N° 7.5.

Tabla N° 7.5: Generación unitaria de biogás para el vertedero de Olavarría.

Año	Generación de biogás [m ³ /año]	Residuos Biodegradables Depositados Acumulados [Ton/año]	Generación Unitaria [m ³ /Ton]
1999	No existen datos disponibles	No existen datos disponibles	No existen datos disponibles
2000			
2001			
2002			
2003			
2004			
2005			
2006	2543852	142832	17,81
2007	2878389	175064	16,44
2008	3192991	207296	15,40
2009	3489569	239528	14,57
2010	3770035	271760	13,87
2011	4036299	303992	13,28
2012	4290002	336224	12,76
2013	4532508	368456	12,30
2014	4764909	400688	11,89
2015	4988571	432920	11,52
2016	5204860	465152	11,19
2017	5414321	497384	10,89
2018	5618048	529616	10,61
2019	5816859	561848	10,35
2020	6011301	594080	10,12
2021	6202465	626312	9,90
2022	6390898	658544	9,70
2023	6576874	690776	9,52
2024	6760938	723008	9,35
2025	6943910	755240	9,19
2026	7126062	787472	9,05

7.3 Descripción del predio de salta

7.3.1 Descripción general

La ciudad de Salta es la capital de la Provincia de Salta, situada en el noroeste Argentino. La ciudad de Salta posee una población de aproximadamente 540.000 habitantes, incluyendo los suburbios. Esto resulta ser aproximadamente el 50% de la población de la provincia.

La ciudad está situada 1.164 m por encima del nivel del mar, tiene una temperatura promedio de 16,9 °C, una humedad relativa promedio de 71% y una precipitación anual promedio de 634,9 mm. En la Figura 7.2 se muestra la ubicación geográfica de la ciudad de Salta.



Figura N° 7.2: Ubicación de la Ciudad de Salta

7.3.2 Descripción del vertedero

El vertedero perteneciente a la ciudad se encuentra localizado 14 kilómetros al sudeste del centro de la ciudad, en el predio conocido como Finca San Javier. El sitio de emplazamiento del vertedero se encuentra rodeado por los ríos Arenales y Ancho al este y sur respectivamente. El mismo se encuentra dividido en tres sectores:

1. San Javier I, con un área útil de aproximadamente 10 Ha, comenzó sus operaciones en 1986, finalizándolas en 1998. Dado las severas ineficiencias en su operación, no fue implementado un sistema de biogás en este sector.
2. San Javier II, con un área útil de aproximadamente 10 Ha y una altura total promedio de 12 m, fue construido en 1998 y comenzó sus operaciones en 1999 y fue clausurado en el año 2007.
3. San Javier III, con una superficie útil de 9 Ha y una altura total promedio de 12m, comenzó sus operaciones en el año febrero de 2007, y se le estima una vida útil de 7 años.

El diseño e implementación del sistema de recolección y quemado de biogás incluyen los sectores de San Javier II y III.

Ninguno de los dos sectores poseen geomembranas sintéticas y barreras hidráulicas, debido, en parte, a la baja permeabilidad del suelo situado en el área (en su mayoría posee una permeabilidad $k < 10^{-7}$ cm/seg) que impide naturalmente la migración de lixiviados hacia los acuíferos. San Javier II posee un sistema de colección de lixiviados con varias celdas de extracción distribuidas a través de todo el vertedero, sin embargo los lixiviados extraídos son reinyectados nuevamente en el vertedero dado que no existen instalaciones para su tratamiento.

De acuerdo con la información proporcionada por el operador privado del vertedero, Agrotécnica Fuegoña S.A.C.I.F., un promedio de 390 toneladas diarias de residuos son depositadas en el vertedero de Salta. Según el informe del Banco Mundial, hacia el año 2006,

aproximadamente 1.000.000 de toneladas de residuos se encontraban depositados en el sector de San Javier II.

7.3.3 Proyecto de recolección de biogás

El propósito del proyecto de la implementación de un sistema de recolección de biogás es el de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de dicho vertedero para contribuir al objetivo último del Convenio Marco del Cambio Climático de Las Naciones Unidas y ayudar a los países incluidos en el anexo 1 a cumplir sus obligaciones acordadas en el Protocolo de Kyoto, al cual la República Argentina ha adherido.

El proyecto consiste en la captura de los gases producidos dentro del vertedero y su destrucción mediante su combustión. Las reducciones esperadas se encuentran en aproximadamente 194.198 toneladas de carbono equivalente (ton CO_{2e}) para un período de acreditación de 21 años iniciado a partir de 2008.

La recolección y combustión del gas permite generar Certificados de Reducción de Emisiones (CER por sus siglas en inglés) y consecuentemente ganancias a través de la venta de dichos certificados en el Mecanismo de Desarrollo Limpio.

El sistema de recolección está constituido principalmente por pozos de extracción, tuberías para el transporte del gas, tratamiento de lixiviados, equipo generadores de vacío tales como bombas, válvulas y un quemador para destruir el metano contenido en el biogás, trampas para separar el condensado e instrumental para monitorear y controlar el flujo de gas, composición, temperatura y presión entre otras variables.

7.3.4 Disposición de residuos en el vertedero

La disposición de residuos fue calculada en el informe del Banco Mundial en base a datos brindados por el operador para el período 2001 a 2006. Las estimaciones para los años de acreditación posteriores a 2006 se realizaron en base a la proyección de la población de la ciudad de Salta considerando datos del Instituto de Estadísticas y Censos (INDEC). Las cifras estimadas se presentan en la Tabla N° 7.6.

Tabla N° 7.6: Disposición de residuos en el vertedero de la Ciudad de Salta

Sector	Año	Disposición de residuos [Tn/año]	Disposición de residuos acumulada [Tn]
San Javier II	1999	136946	136946
	2000	140017	276963
	2001	143088	420051
	2002	117466	537517
	2003	115908	653425
	2004	139225	792650
	2005	122938	915588
	2006	141017	1056605
San Javier III	2007	143673	1200278
	2008	146310	1346588
	2009	148926	1495514

Tabla N° 7.6 (continuación): Disposición de residuos en el vertedero de la Ciudad de Salta

Sector	Año	Disposición de residuos [Tn/año]	Disposición de residuos acumulada [Tn]
San Javier III	2010	151520	1647034
	2011	154091	1801125
	2012	156639	1957764
	2013	159162	2116926
	2014 a 2028(a)	0	2116926

Nota: (a) indica que entre los años 2014 y 2028 se considera que no se depositan nuevos residuos, por lo tanto, la disposición acumulada permanece constante.

7.3.5 Composición de residuos

Dado que no están disponibles los datos sobre composición de residuos del vertedero, el Banco Mundial tomó como composición los datos de composición de varias ciudades del país. En la Tabla N° 7.7 se presentan la composición de los residuos considerada por el Banco Mundial.

Tabla N° 7.7: Composición de residuos de varias ciudades de la República Argentina.

Componentes	Composición Final (% en base húmeda)
Papel y Cartón	17,61
Tetrapack	1,15
Vidrio	12,87
Residuos de comida	45,00
Textiles	0,94
Plásticos	8,53
Latas	1,68
Aluminio	0,08
Baterías	1,55
Otros	10,00
Total	99,41

Tomando como referencia el Apéndice A de la metodología establecida por la Provincia de British Columbia, Canadá, utilizada ya para la clasificación de los residuos de Córdoba, se pueden discriminar los residuos en orgánicos e inorgánicos, tomando como orgánicos a los clasificados como biodegradables y moderadamente biodegradables en dicho apéndice. Los porcentajes se exponen en la Tabla N° 7.8.

Tabla N° 7.8: Clasificación de residuos.

Clasificación	% de Residuos
Orgánicos	77,57
Inorgánicos	21,84

7.3.6 Generación de biogás

La estimación de generación de biogás se realizó mediante un modelo de decaimiento de primer orden dado por la metodología AMS III versión 5, que tiene como fin principal determinar la reducción de emisiones. Entre los resultados parciales calculados se encuentra la generación de biogás determinada durante el período de acreditación. Los parámetros tenidos en cuenta para la determinación del contenido de metano en base a las estimaciones de generación de biogás se presentan en la Tabla N° 7.9.

Tabla N° 7.9: Parámetros utilizados en la determinación en la cantidad de metano

Parámetros	
Fracción de Metano	0,4
Densidad de metano [kg/m ³]	0,716
Temperatura [°C]	0 °C
Presión [kPa]	101,3

La masa de metano se obtiene de calcular primero su volumen teniendo en cuenta la composición de este en el biogás, para luego dividir este resultado por la densidad. Los resultados se presentan en la Tabla N° 7.10.

Tabla N° 7.10: Generación de biogás y metano en el vertedero de la Ciudad de Salta.

Año	Biogas [m ³ /año] (0°C)	Biogas [m ³ /año] (15°C)	Metano [m ³ /año] (15°C)	Metano [Tn/año]
2008	2665552	2812011	1124804	763
2009	2927796	3088664	1235466	839
2010	3184146	3359099	1343640	912
2011	3434850	3623578	1449431	984
2012	3680144	3882350	1552940	1054
2013	3920247	4135645	1654258	1123
2014	4155363	4383680	1753472	1190
2015	3949239	4166230	1666492	1131
2016	3753713	3959961	1583984	1075
2017	3568221	3764277	1505711	1022
2018	3392234	3578620	1431448	972
2019	3225248	3402459	1360984	924
2020	3066789	3235294	1294118	878
2021	2916405	3076647	1230659	835
2022	2773674	2926074	1170429	794
2023	2638191	2783147	1113259	756
2024	2509577	2647466	1058986	719
2025	2387472	2518652	1007461	684
2026	2271535	2396345	958538	651
2027	2161444	2280205	912082	619
2028	2056894	2169910	867964	589

7.3.7 Generación Unitaria

En base a los resultados anteriores es posible estimar la cantidad de biogás generado por unidad de residuo. Entre otros factores a tener en cuenta y que influyen en la generación de biogás se encuentra la antigüedad de los residuos dispuestos. Esto se tiene en cuenta referenciando la tasa de generación de biogás a partir del año en que el vertedero empezó a funcionar. Los resultados se muestran en la Tabla N° 7.11.

Tabla N° 7.11: Generación unitaria de metano para el vertedero de Salta.

Año	Disposición de residuos biodegradables Acumulada[Ton/año]	Biogás [m ³ /año]	Generación unitaria [m ³ /Ton]
1999	106229	No hay datos disponibles	
2000	214840		
2001	325834		
2002	416952		
2003	506862		
2004	614859		
2005	710222		
2006	819608		
2007	931056		
2008	1044548	2812011	2,6921
2009	1160070	3088664	2,6625
2010	1277604	3359099	2,6292
2011	1397133	3623578	2,5936
2012	1518638	3882350	2,5565
2013	1642099	4135645	2,5185
2014	1642099	4383680	2,6696
2015	1642099	4166230	2,5371
2016	1642099	3959961	2,4115
2017	1642099	3764277	2,2924
2018	1642099	3578620	2,1793
2019	1642099	3402459	2,0720
2020	1642099	3235294	1,9702
2021	1642099	3076647	1,8736
2022	1642099	2926074	1,7819
2023	1642099	2783147	1,6949
2024	1642099	2647466	1,6122
2025	1642099	2518652	1,5338
2026	1642099	2396345	1,4593
2027	1642099	2280205	1,3886
2028	1642099	2169910	1,3214

7.4 Descripción del predio de Montevideo

7.4.1 Descripción general

La Ciudad de Montevideo es la capital de Uruguay. El Departamento de Montevideo concentra aproximadamente 1.350.000 habitantes, 40% de la población uruguaya. La región posee un clima templado y una precipitación anual de 900 mm por año. En la Figura N° 7.3 se muestra la ubicación del vertedero.

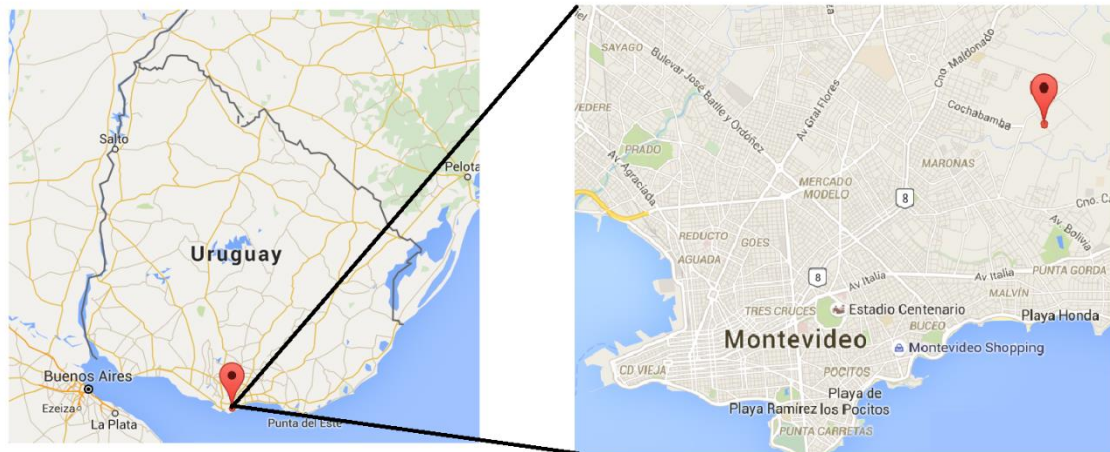


Figura N° 7.3: Ubicación del vertedero de Montevideo

7.4.2 Descripción del vertedero

El vertedero, denominado Unidad de Disposición de Residuos, se encuentra localizado en Carasco Norte, en los suburbios de Montevideo. El sitio posee una subestación eléctrica localizada aproximadamente a 500 a 1000 metros de distancia, y un tubo central de gas a aproximadamente 1000 metros.

El sitio para el emplazamiento del vertedero fue seleccionado en 1990 dado las buenas condiciones del suelo para este tipo de actividad. La disposición de residuos comenzó ese mismo año con una previsión de su funcionamiento hasta el año 2011, según se estimó en el informe del Banco Mundial (2004).

El vertedero posee una capacidad de 10,5 millones de toneladas. Hacia el año 2004, aproximadamente 1300 toneladas diarias ingresaban al vertedero (475.000 toneladas anuales).

La mayoría de los residuos provienen del área metropolitana de Montevideo y una pequeña fracción proveniente de la cercana Ciudad de Canelones.

El vertedero consiste en dos sectores principales: uno formado por las celdas 6 y 7 y el otro por la celda 8. Las celdas 6 y 7 han estado en operación desde 1990 y han sido clausuradas en 2005, con un tonelaje de aproximadamente 6,7 millones de toneladas. Dichas celdas poseen una altura de 20 a 25 metros aproximadamente y ninguna posee ni revestimiento de geomembrana ni un sistema de colección de lixiviados. La celda 8 comenzó sus operaciones en el año 2002, finalizándolas en el año 2011. Dicha celda un área de 40 Ha, con una capacidad total de 4 millones de toneladas y una altura que oscila entre 30 y 35 metros.

7.4.3 Disposición de residuos

De acuerdo al estudio de pre factibilidad llevado a cabo por la consultora SCS Engineers, citado en el informe del Banco Mundial, la disposición de residuos se encuentra aproximadamente en 1300 toneladas diarias agotando su capacidad en el año 2011. También en base a dichos datos,

y teniendo en cuenta que el porcentaje de materia orgánica es de aproximadamente el 73%, es posible calcular la cantidad de residuos biodegradable depositados. Los datos recopilados del informe del Banco Mundial se presentan en la Tabla N° 7.12.

Tabla N° 7.12: Disposición de residuos en el vertedero de la Ciudad de Montevideo.

Año	Disp. residuos [Tn/año]	Disp. residuos Acumulado [Tn]	Disp. Residuos biodegradables Acumulado [Tn/año]
1990	306150	306150	235736
1991	346850	653000	502810
1992	290215	943215	726276
1993	321340	1264555	973707
1994	417520	1682075	1295198
1995	404684	2086759	1606804
1996	495189	2581948	1988100
1997	586684	3168632	2439847
1998	676199	3844831	2960520
1999	659275	4504106	3468162
2000	593627	5097733	3925254
2001	637166	5734899	4415872
2002	509206	6244105	4807961
2003	466530	6710635	5167189
2004	465000	7175635	5525239
2005	468000	7643635	5885599
2006	475000	8118635	6251349
2007	475000	8593635	6617099
2008	475000	9068635	6982849
2009	475000	9543635	7348599
2010	475000	10018635	7714349
2011	475000	10493635	8080099
2012	0	10493635	8080099
2013	0	10493635	8080099
2014	0	10493635	8080099
2015	0	10493635	8080099
2016	0	10493635	8080099
2017	0	10493635	8080099
2018	0	10493635	8080099
2019	0	10493635	8080099
2020	0	10493635	8080099
2021	0	10493635	8080099
2022	0	10493635	8080099
2023	0	10493635	8080099
2024	0	10493635	8080099

Tabla N°7.12 (continuación): Disposición de residuos en el vertedero de la Ciudad de Montevideo.

Año	Disp. residuos [Tn/año]	Disp. residuos Acumulado [Tn]	Disp. Residuos biodegradables Acumulado [Tn/año]
2024	0	10493635	8080099
2025	0	10493635	8080099
2026	0	10493635	8080099
2027	0	10493635	8080099

7.4.4 Proyecto de colección de biogás

El proyecto tiene como objetivo reducir las emisiones de gases de efecto invernadero mediante la captura del metano contenido en el biogás y su combustión, y también de esta forma, mejorar las condiciones de medio ambiente en los alrededores del vertedero. El financiamiento para llevar a cabo este proyecto se realiza mediante la venta de Certificados de Reducción de Emisiones (CER) emitidos por el Mecanismo de Desarrollo Limpio. Dada la inexistencia de incentivos económicos tales como reducción de impuestos por la quema del biogás, este es la única forma de financiamiento que permite llevar a cabo el proyecto.

7.4.5 Generación de biogás

La emisión de biogás fue estimada por la consultora SCS Engineers en 2005 en base a un modelo Decaimiento de Primer Orden idéntica a la ecuación del modelo LandGEM. Se realizaron varias corridas del modelo, cada una para los distintos tipos de residuos teniendo en cuenta los parámetros que muestra la Tabla N° 7.13.

También a partir de los resultados recopilados, fue posible estimar la generación de metano teniendo en cuenta que en el informe en la estimación de consideró un contenido de metano de 50% en volumen. Los resultados se presentan en la tabla Tabla N° 7.14.

Tabla N° 7.13: Parámetros k y L_0 tenidos en cuenta en la determinación de la generación de Biogás.

Tipo de Residuo	k [año ⁻¹]	L_0 [m ³ /Tn]
Decaimiento Rápido	0,28	68,0
Decaimiento Moderado	0,056	68,0
Decaimiento Lento	0,014	68,0

Tabla N° 7.14: Generación de biogás y metano en el vertedero de la Ciudad de Montevideo.

Año	Biogás [m ³ /hora]	Biogás [m ³ /año]	Metano [m ³ /año]
2007	6114	53558640	26779320
2008	6069	53164440	26582220
2009	6040	52910400	26455200
2010	6022	52752720	26376360
2011	6013	52673880	26336940
2012	6010	52647600	26323800
2013	4703	41198280	20599140
2014	3708	32482080	16241040
2015	2948	25824480	12912240
2016	2367	20734920	10367460
2017	1920	16819200	8409600
2018	1577	13814520	6907260
2019	1311	11484360	5742180
2020	1114	9758640	4879320
2021	895	7840200	3920100
2022	720	6307200	3153600
2023	579	5072040	2536020
2024	466	4082160	2041080
2025	374	3276240	1638120
2026	301	2636760	1318380
2027	242	2119920	1059960

7.4.6 Generación Unitaria

En base a los resultados anteriores es posible estimar la cantidad de biogás generado por unidad de residuo. Entre otros factores a tener en cuenta y que influyen en la generación de biogás se encuentra la antigüedad de los residuos dispuestos. De la misma forma que en el vertedero de Olavarría y Salta, esto se tiene en cuenta referenciando la tasa de generación de biogás a partir del año en que el vertedero empezó a funcionar. La Tabla N° 7.15 presenta los valores de generación unitaria para el vertedero de Montevideo.

Tabla N° 7.15: Generación unitaria de metano para el vertedero de Montevideo.

Año	Biogás [m ³ /año]	Disp. Residuos biodegradables Acumulado [Tn/año]	Generación Unitaria [m ³ /Tn]
1990	No hay datos disponibles	235736	No hay datos disponibles
1991		502810	
1992		726276	
1993		973707	
1994		1295198	
1995		1606804	

Tabla N° 7.15 (continuación): Generación unitaria de metano para el vertedero de Montevideo.

Año	Biogás [m ³ /año]	Disp. Residuos biodegradables Acumulado [Tn/año]	Generación Unitaria [m ³ /Tn]
1996		1988100	
1997		2439847	
1998		2960520	
1999		3468162	
2000		3925254	
2001		4415872	
2002		4807961	
2003		5167189	
2004		5525239	
2005		5885599	
2006		6251349	
2007	53558640	6617099	8,09
2008	53164440	6982849	7,61
2009	52910400	7348599	7,20
2010	52752720	7714349	6,84
2011	52673880	8080099	6,52
2012	52647600	8080099	6,52
2013	41198280	8080099	5,10
2014	32482080	8080099	4,02
2015	25824480	8080099	3,20
2016	20734920	8080099	2,57
2017	16819200	8080099	2,08
2018	13814520	8080099	1,71
2019	11484360	8080099	1,42
2020	9758640	8080099	1,21
2021	7840200	8080099	0,97
2022	6307200	8080099	0,78
2023	5072040	8080099	0,63
2024	4082160	8080099	0,51
2025	3276240	8080099	0,41
2026	2636760	8080099	0,33
2027	2119920	8080099	0,26

7.5 Comparación resultados

7.5.1 Descripción del análisis

Para realizar un análisis comparativo de la generación de biogás de los diferentes proyectos ejecutados en la región con el vertedero de Piedras Blancas se procede a calcular la generación unitaria de biogás por unidad de residuo orgánico para un período de generación de 21 años del vertedero de Piedras Blancas, teniendo en cuenta que los datos disponibles de los diferentes casos analizados brindan datos para ese intervalo de tiempo. Para la comparación de estos

datos se procede a realizar la comparación en función de la edad del vertedero. Dado el hecho de que los datos extraídos de los diferentes casos corresponden a períodos diferentes en la vida de los vertederos, los valores de generación unitaria calculados solo podrán ser comparados con el vertedero de Piedras Blancas tomando en cuenta diferentes intervalos de tiempo que correspondan a los mismos períodos de funcionamiento de este último pero no entre sí.

7.5.2 Córdoba

7.5.2.1 Disposición de residuos

Para calcular cuánto biogás se genera por unidad de residuo se consideran la suma de los residuos biodegradables y moderadamente biodegradables, a los cuales aquí se los denominan orgánicos. El tonelaje de residuos orgánicos se presenta en la Tabla N° 7.16

Tabla N° 7.16: Residuos Orgánicos dispuestos para el vertedero de Piedras Blancas

Año	Disposición de Residuos [Tn]	Porcentaje de Orgánicos	Disposición de Residuos Orgánicos [Tn/año]	Disposición de Residuos Orgánicos Acum. [Tn]
2010	540000	68,9	372060	372060
2011	720000	68,9	496080	868140
2012	720000	68,9	496080	1364220
2013	720000	68,9	496080	1860300
2014	720000	68,9	496080	2356380
2015	720000	68,9	496080	2852460
2016	240000	68,9	165360	3017820

7.5.2.2 Generación Unitaria

El cálculo de generación unitaria se realiza tomando la generación de biogás dada por el modelo LandGEM utilizando los valores promedio de los parámetros. Las celdas coloreadas de amarillo corresponden a la edad a la cual el vertedero ya se encuentra fuera de operación. Los resultados son presentados en la Tabla N° 7.17

Tabla N° 7.17: Generación de biogás por tonelada de residuos para Córdoba

Año	Edad	Generación de biogás [m ³]	Disposición de Residuos Orgánicos Acum. [Tn]	Generación Unitaria [m ³ /Tn]
2010	1	0	0	0
2011	2	7657276	372060	20,58
2012	3	17392263	868140	20,03
2013	4	26523731	1364220	19,44
2014	5	35089093	1860300	18,86
2015	6	43123445	2356380	18,30
2016	7	50659708	2852460	17,76
2017	8	50922293	3017820	16,87
2018	9	47765365	3017820	15,83
2019	10	44804152	3017820	14,85
2020	11	42026518	3017820	13,93
2021	12	39421084	3017820	13,06
2022	13	36977174	3017820	12,25

Evaluación de generación de biogás en el vertedero de Piedras Blancas, Córdoba.

Tabla N°7.17 (continuación): Generación de biogás por tonelada de residuos para Córdoba

Año	Edad	Generación de biogás [m ³]	Disposición de Residuos Orgánicos Acum. [Tn]	Generación Unitaria [m ³ /Tn]
2023	14	34684774	3017820	11,49
2024	15	32534491	3017820	10,78
2025	16	30517516	3017820	10,11
2026	17	28625582	3017820	9,49
2027	18	26850939	3017820	8,90
2028	19	25186315	3017820	8,35
2029	20	23624890	3017820	7,83
2030	21	22160265	3017820	7,34
2031	22	20786439	3017820	6,89
2032	23	19497784	3017820	6,46
2033	24	18289019	3017820	6,06
2034	25	17155191	3017820	5,68
2035	26	16091655	3017820	5,33
2036	27	15094053	3017820	5,00
2037	28	14158297	3017820	4,69
2038	29	13280553	3017820	4,40
2039	30	12457225	3017820	4,13
2040	31	11684940	3017820	3,87
2041	32	10960532	3017820	3,63
2042	33	10281034	3017820	3,41
2043	34	9643661	3017820	3,20
2044	35	9045802	3017820	3,00
2045	36	8485008	3017820	2,81
2046	37	7958980	3017820	2,64
2047	38	7465563	3017820	2,47
2048	39	7002735	3017820	2,32
2049	40	6568601	3017820	2,18
2050	41	6161380	3017820	2,04
2051	42	5779405	3017820	1,92
2052	43	5421111	3017820	1,80
2053	44	5085029	3017820	1,69
2054	45	4769783	3017820	1,58
2055	46	4474080	3017820	1,48
2056	47	4196710	3017820	1,39
2057	48	3936535	3017820	1,30
2058	49	3692489	3017820	1,22
2059	50	3463573	3017820	1,15

7.5.3 Comparación con Olavarría

En este caso se observa que la producción del vertedero de Olavarría supera ampliamente a la del vertedero de Piedras Blancas. Esto puede deberse a la mayor precipitación promedio de la zona de emplazamiento del vertedero de Olavarría lo que produce un mayor contenido de humedad en los residuos y también al hecho de que en el periodo de análisis el vertedero continúa en operación. La Tabla N° 7.18 y la Figura N° 7.4 presentan la comparación en la generación unitaria entre Córdoba y Olavarría. Las celdas coloreadas corresponden a valores para los cuales el vertedero ya se encontraría fuera de operación.

Tabla N° 7.18: Generación unitaria de los vertederos de Córdoba y Olavarría

Edad	Generación Unitaria [m ³ /Tn]	
	Córdoba	Olavarría
8	16,87	17,81
9	15,83	16,44
10	14,85	15,40
11	13,93	14,57
12	13,06	13,87
13	12,25	13,28
14	11,49	12,76
15	10,78	12,30
16	10,11	11,89
17	9,49	11,52
18	8,90	11,19
19	8,35	10,89
20	7,83	10,61
21	7,34	10,35
22	6,89	10,12
23	6,46	9,90
24	6,06	9,70
25	5,68	9,52
26	5,33	9,35
27	5,00	9,19
28	4,69	9,05
TOTAL	201,20	249,73

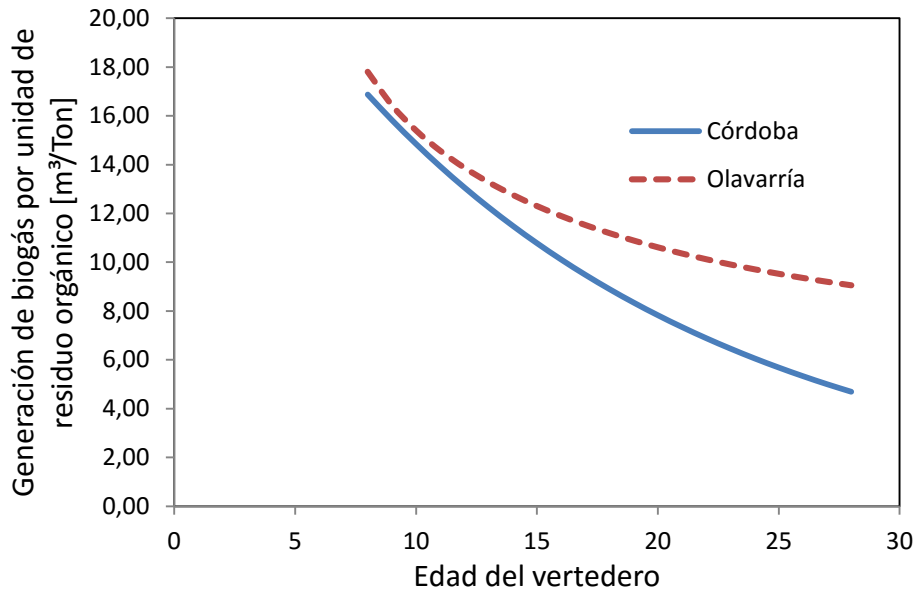


Figura N° 7.4 : Generación unitaria de los vertederos de Córdoba y Olavarría

7.5.4 Comparación con Salta

Para este caso la diferencia en la generación unitaria es amplia. Como en el caso de la comparación con el vertedero de Olavarría esto puede deberse a la diferencia en la precipitación promedio de los diferentes lugares de emplazamiento (750 mm para la ciudad de Córdoba y 648 mm para la ciudad de Salta). La Tabla N° 7.19 y la Figura N° 7.5 presentan la comparación en la generación unitaria entre Córdoba y Salta. Las celdas coloreadas corresponden a valores para los cuales el vertedero ya se encontraría fuera de operación. En este caso podemos observar también que las edades en que cada vertedero finaliza las operaciones de disposición de residuos son similares.

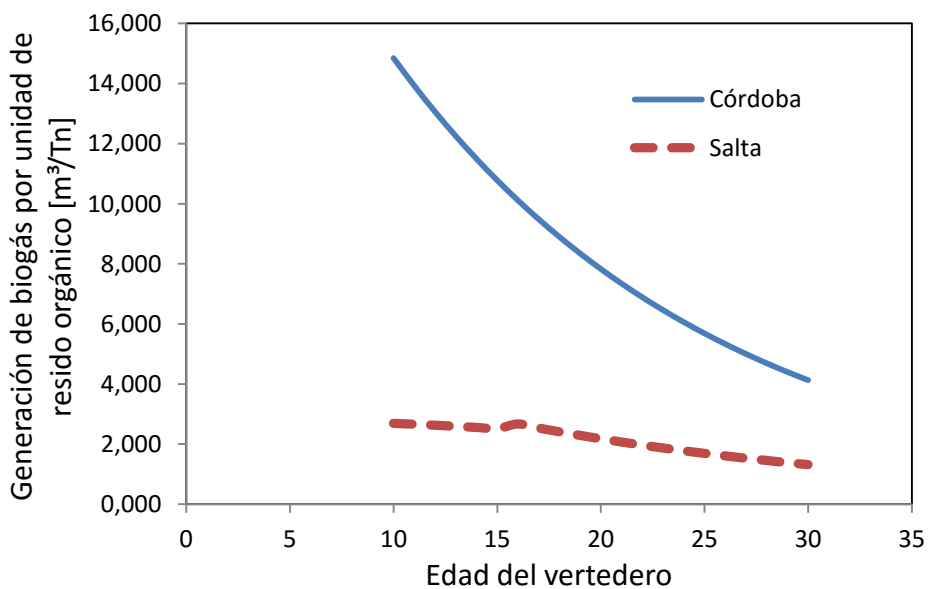


Figura N° 7.5 : Generación unitaria de los vertederos de Córdoba y Salta

Tabla N° 7.19: Generación unitaria de los vertederos de Córdoba y Salta

Edad	Generación Unitaria [m ³ /Tn]	
	Córdoba	Salta
10	14,847	2,692
11	13,926	2,662
12	13,063	2,629
13	12,253	2,594
14	11,493	2,556
15	10,781	2,519
16	10,112	2,670
17	9,486	2,537
18	8,897	2,412
19	8,346	2,292
20	7,828	2,179
21	7,343	2,072
22	6,888	1,970
23	6,461	1,874
24	6,060	1,782
25	5,685	1,695
26	5,332	1,612
27	5,002	1,534
28	4,692	1,459
29	4,401	1,389
30	4,128	1,321

7.5.5 Comparación con Montevideo

En el caso observamos una menor producción unitaria de biogás del vertedero de Montevideo. Siendo uno de los factores determinantes en la producción de biogás el contenido de humedad, y por ende la precipitación promedio del lugar de emplazamiento del vertedero, es en un principio llamativo que el vertedero de Piedras Blancas posea una mayor producción. Sin embargo esto resulta razonable si tenemos en cuenta el potencial de generación de metano L_0 tomado en los diferentes análisis de generación de biogás en los análisis considerados (113,6 m³/Ton para Córdoba y 68,0 m³/ Ton para Montevideo). La Tabla N° 7.20 y la Figura N° 7.6 presentan la comparación entre Córdoba y Montevideo.

Tabla N° 7.20: Generación unitaria de los vertederos de Córdoba y Montevideo

Edad	Generación Unitaria [m ³ /Ton]	
	Córdoba	Montevideo
17	9,49	8,09
18	8,90	7,61
19	8,35	7,20
20	7,83	6,84
21	7,34	6,52
22	6,89	6,52
23	6,46	5,10
24	6,06	4,02
25	5,68	3,20
26	5,33	2,57
27	5,00	2,08
28	4,69	1,71
29	4,40	1,42
30	4,13	1,21
31	3,87	0,97
32	3,63	0,78
33	3,41	0,63
34	3,20	0,51
35	3,00	0,41
36	2,81	0,33
37	2,64	0,26
TOTAL	113,10	67,96

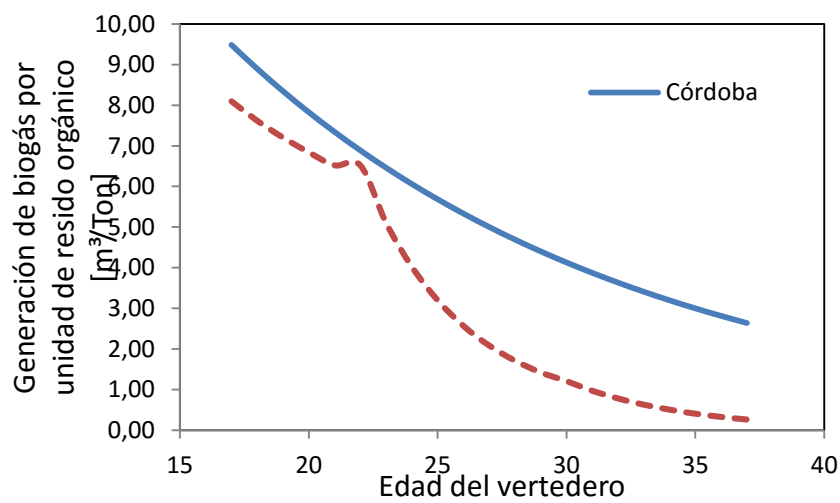


Figura N° 7.6 : Generación unitaria de los vertederos de Córdoba y Montevideo

7.6 Análisis de resultados

Los análisis comparativos realizados entre el vertedero de Piedras Blancas y otros vertederos de la región con proyectos en curso de instalación de un sistema de colección de biogás muestran que los valores de generación obtenidos para el caso de Córdoba se ubican dentro de valores razonables. Teniendo en cuenta que el porcentaje de residuos orgánicos y las condiciones de operación son similares en todos los casos, las diferencias en la producción de biogás observadas pueden atribuirse principalmente a la variación de las condiciones climáticas en los diferentes lugares de emplazamiento, en especial el nivel de precipitación, y a la diferencia en el periodo de operación y post clausura considerado en cada caso.

Capítulo 8: Bases para el diseño del sistema de recolección de biogás

8.1 Caudales de diseño

En base a los volúmenes y caudales de generación calculados se proyectó la captura y tratamiento de biogás del sitio.

Para recomendar los caudales de diseño para la red de captura y sistema de tratamiento, se analizaron los resultados obtenidos. A partir de los mismos se consideraron los valores obtenidos con el modelo LandGEM ya que es uno de los más aceptados en la industria de generación de Biogás a nivel internacional.

De acuerdo a las situaciones modeladas, los valores definidos para el proyecto del sistema de colección y tratamiento de gases recomendados son los siguientes:

- Caudal máximo: 0,69 m³/s
- Caudal promedio: 0,58 m³/s
- Caudal mínimo: 0,43 m³/s

Capítulo 9: Conclusiones finales

9.1 Condiciones de los residuos dispuestos

Se puede considerar como una aproximación razonable que la generación de residuos para la ciudad de Córdoba se encuentra en el orden en 60.000 toneladas por mes. De igual manera, admitiendo un criterio conservador en cuanto a su capacidad de recibir residuos, el vertedero poseerá una masa total de 4.380.000 toneladas al final de su vida útil.

Las condiciones de los residuos depositados en la celda son propicias para la formación de biogás, con niveles de pH y humedad que posibilitan la descomposición anaerobia de los residuos.

La creciente concentración de metano observada en los ensayos de composición realizados por CIQA indica que se está estableciendo paulatinamente las condiciones para generación de biogás de forma anaerobia, alcanzando valores usuales este componente.

Las concentraciones de los demás componentes medidos superan en su mayoría los valores límites establecidos por la Directiva TA-Luft (1996), evidenciando la necesidad de recolectar y tratar el biogás generado en el vertedero.

9.2 Potencial de generación de biogás

Es posible afirmar que la generación de biogás para el vertedero de Piedras Blancas se encuentra entre 765 millones de m³ y 1120 millones de m³ considerando un periodo de 50 años. La mayoría de los modelos utilizados han reportado valores similares, los cuales se encuentran en torno a los 950 millones de m³.

El análisis de sensibilidad demuestra que los parámetros que más influyen en la generación de biogás son la cantidad de residuos dispuestos y el valor del potencial de generación de metano L_0 , el que a su vez depende principalmente de la composición de los residuos. Ambas variables evidenciaron una influencia lineal en la generación de biogás.

Las instalaciones de captura y tratamiento de biogás para el sitio de Piedras Blancas deberán diseñarse para tratar un caudal de entre 0,43 m³/s y 0,69 m³/s de biogás.

9.3 Comparación con otros casos de la región

La comparación de la generación por unidad de residuo de biogás para el relleno sanitario de Piedras Blancas con otros casos de la región muestra que los resultados obtenidos constituyen valores razonables.

Por otra parte, las descripciones de los casos analizados evidencian que frente a condiciones similares de diseño y operación del vertedero para todos los casos, el nivel de precipitación del lugar de emplazamiento del vertedero que se traduce en un mayor nivel de humedad en los residuos, adquiere una influencia fundamental en la generación de biogás

9.4 Materia Práctica supervisada

Con respecto a la materia Práctica Supervisada puedo concluir que esta ha sido de gran utilidad como una introducción al ejercicio profesional, destacando principalmente el aprendizaje en diferentes aspectos tales como la toma de responsabilidades, el trabajo en equipo y la comunicación con otros colegas.

Capítulo 10: Bibliografía

Amini H., Reinhart D., Mackie K. (2012). "Determination of first-order landfill gas modeling parameters and uncertainties". *Waste Management* 32, 305-316.

Clean Development Mechanism Executive Board (2005), UNFCCC. "Montevideo Landfill Gas Capture and Flare Project, Version 02".

Clean Development Mechanism Executive Board (2008), UNFCCC. Salta Landfill Gas Capture Project, Version 03.

De la Casa, A., Nasello, O. (2010). Breakpoints in annual rainfall trends in Córdoba, Argentina. *Atmospheric Research* 95:419 – 427.

Faour A., Reinhart D., Huaxin Y. (2007). "First Order Kinetic Gas Generation Model Parameters for Wet Landfills". *Waste Management* 27, 946-953.

Ireland Environmental Protection Agency (2000). "Landfill Manuals, Landfill Site Design".

Jucá Maciel F. y Thomé Jucá J. F. (2011). "Evaluation of landfill gas production and emissions in a MSW large-scale Experimental Cell in Brazil". *Waste Management* 31, 966-977.

Kamalan H., Sabour M., Shariatmadari N. (2011). "A Review on Available Landfill Gas Models". *Journal of Environmental Science and Technology* 4, 81.

Landborn J. (2012). "Observations from using models to fit gas production of varying volume test cell and landfills". *Waste Management* 32, 2353- 2363.

Machado S., Carvalho M., Gourc J., Vilar O., Nascimento J. (2009). "Methane generation in tropical landfills: Simplified methods and field results". *Waste Management* 29, 153-161.

Mc Bean E.A., Syed-Ritchie S., Rovers F.A. (2007). "Performance Results from the Tucumán Solid Waste Bioreactor". *Waste Management* 27,1783-1791.

Ministry of Environment, Ontario, Canada (2008). "Landfill Gas Capture. A Guideline on the Regulatory and Approval Requirements for Landfill Gas Capture Facilities".

Ministry of Environment of British Columbia (2009). "Landfill Generation Assessment, Procedure Guidelines". Provincia de British Columbia, Canadá.

Ministry of Environment of British Columbia (2010). "Landfill Gas Management Facilities Design Guidelines". Provincia de British Columbia, Canadá.

Reinhart D., Faour A., (2005). "First Order Kinetic Gas Generation Model Parameters for Wet Landfills". United States Environmental Protection Agency Report EPA 600/R-05/072.

Sharma H., Ready K. (2004). "Geoenvironmental Engineering". Ed. John Wiley and Sons, New Jersey, United States.

Spokas K., Bogner J., Chanton J., Morcet M., Aran C., Graff C., Moreau-Le Golvan Y., Hebe I. (2006). "Methane mass balance at three landfill sites: What is the efficiency of capture by gas collection systems? *Waste Management* 26, 516-525.

Tedesca, L., Pierini, J.O., Scian, B. (2012). Investigating the temporal variation of the scaling behavior in rainfall data measured in central Argentina by means of detrended fluctuation analysis. *Physica A*. 1553 - 1562

Tchobanoglous G., Theisen H., Vigil, S. (1993). *Integrated Solid Waste Management*. Ed. McGraw Hill, Madrid, España.

Thompson S., Sawyer J., Bonam R., Valdivia J.E. (2009). "Building a better methane generation model: Validating models with methane recovery rates from 35 Canadian landfills". *Waste Management* 29, 2085-2091.

United States Army Corps of Engineers (2013). "Landfill gas collection and treatment system".

United States Environmental Protection Agency (2005). "Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide".

Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, Olavarría, Argentina (2004). Proyecto Recuperación de Gas del Relleno Sanitario de la Ciudad de Olavarría, Evaluación de Impacto Ambiental.

World Bank. Environmentally & Socially Sustainable Department. Argentina, Chile, Uruguay and Paraguay Management Unit. Latin America and Caribbean Region (2005). Project Appraisal Document on a Proposed Purchase of Emission Reductions by the Community Development Carbon Fund in the Amount of US\$589,500.00 for the Argentina: Olavarría Gas Recovery Project.

Anexo I: Tablas de cálculo de generación de biogás

A.1 Introducción

En el presente anexo se incorporan los resultados de los diferentes modelos de generación de biogás. También los resultados obtenidos de la modelación realida para el análisis de sensibilidad

Tabla A.1: Resultados de generación de biogás del modelo LandGEM

Año	Residuos aceptados	Residuos Depositados	Biogás Generado		
			Promedio	Límite Inferior	Límite Superior
	[Tn/año]	[Tn]	[m ³ /año]	[m ³ /año]	[m ³ /año]
2010	540000	0	0	0	0
2011	720000	540000	7657276	5408041	10072782
2012	720000	1260000	17392263	12334474	22794043
2013	720000	1980000	26523731	18896798	34619737
2014	720000	2700000	35089093	25114155	45612912
2015	720000	3420000	43123445	31004679	55832177
2016	240000	4140000	50659708	36585550	65332014
2017	0	4380000	50922293	37065898	65209487
2018	0	4380000	47765365	35117422	60618793
2019	0	4380000	44804152	33271373	56351280
2020	0	4380000	42026518	31522367	52384197
2021	0	4380000	39421084	29865303	48696393
2022	0	4380000	36977174	28295347	45268207
2023	0	4380000	34684774	26807920	42081363
2024	0	4380000	32534491	25398684	39118870
2025	0	4380000	30517516	24063529	36364934
2026	0	4380000	28625582	22798560	33804873
2027	0	4380000	26850939	21600088	31425038
2028	0	4380000	25186315	20464616	29212741
2029	0	4380000	23624890	19388835	27156189
2030	0	4380000	22160265	18369604	25244415
2031	0	4380000	20786439	17403953	23467230
2032	0	4380000	19497784	16489064	21815156
2033	0	4380000	18289019	15622269	20279387
2034	0	4380000	17155191	14801039	18851735
2035	0	4380000	16091655	14022979	17524589
2036	0	4380000	15094053	13285821	16290872
2037	0	4380000	14158297	12587413	15144008
2038	0	4380000	13280553	11925719	14077883
2039	0	4380000	12457225	11298810	13086811

Tabla A.1(continuación): Resultados de generación de biogás del modelo LandGEM

Año	Residuos aceptados	Residuos Depositados	Biogás Generado		
			Promedio	Límite Inferior	Límite Superior
	[Tn/año]	[Tn]	[m ³ /año]	[m ³ /año]	[m ³ /año]
2040	0	4380000	11684940	10704855	12165511
2041	0	4380000	10960532	10142123	11309069
2042	0	4380000	10281034	9608973	10512920
2043	0	4380000	9643661	9103850	9772819
2044	0	4380000	9045802	8625280	9084821
2045	0	4380000	8485008	8171867	8445257
2046	0	4380000	7958980	7742289	7850718
2047	0	4380000	7465563	7335293	7298034
2048	0	4380000	7002735	6949692	6784258
2049	0	4380000	6568601	6584362	6306652
2050	0	4380000	6161380	6238235	5862669
2051	0	4380000	5779405	5910305	5449942
2052	0	4380000	5421111	5599612	5066271
2053	0	4380000	5085029	5305253	4709609
2054	0	4380000	4769783	5026367	4378057
2055	0	4380000	4474080	4762141	4069845
2056	0	4380000	4196710	4511805	3783331
2057	0	4380000	3936535	4274629	3516988
2058	0	4380000	3692489	4049921	3269395
2059	0	4380000	3463573	3837025	3039232
TOTA [m³]L			949.434.039	765.294.188	1.120.413.513

Tabla A.2: Resultados de generación de metano del modelo LandGEM

Año	Residuos aceptados	Residuos Depositados	Metano Generado		
			Promedio	Límite Inferior	Límite Superior
	[Tn/año]	[Tn]	[Tn/año]	[Tn/año]	[Tn/año]
2010	540000	0	0,0	0,0	0,0
2011	720000	540000	2554,3	1804,0	3360,0
2012	720000	1260000	5801,6	4114,5	7603,5
2013	720000	1980000	8847,6	6303,5	11548,3
2014	720000	2700000	11704,8	8377,4	15215,3
2015	720000	3420000	14384,9	10342,4	18624,2
2016	240000	4140000	16898,8	12204,0	21793,1
2017	0	4380000	16986,4	12364,2	21752,2

Tabla A.2 (continuación): Resultados de generación de metano del modelo LandGEM

Año	Residuos aceptados	Residuos Depositados	Metano Generado		
			Promedio	Límite Inferior	Límite Superior
	[Tn/año]	[Tn]	[Tn/año]	[Tn/año]	[Tn/año]
2018	0	4380000	15933,3	11714,3	20220,9
2019	0	4380000	14945,5	11098,5	18797,3
2020	0	4380000	14019,0	10515,0	17474,0
2021	0	4380000	13149,9	9962,3	16243,9
2022	0	4380000	12334,6	9438,6	15100,3
2023	0	4380000	11569,9	8942,4	14037,3
2024	0	4380000	10852,7	8472,3	13049,0
2025	0	4380000	10179,9	8027,0	12130,4
2026	0	4380000	9548,8	7605,0	11276,4
2027	0	4380000	8956,8	7205,2	10482,6
2028	0	4380000	8401,5	6826,5	9744,6
2029	0	4380000	7880,7	6467,6	9058,6
2030	0	4380000	7392,1	6127,6	8420,9
2031	0	4380000	6933,8	5805,5	7828,1
2032	0	4380000	6504,0	5500,3	7277,0
2033	0	4380000	6100,7	5211,2	6764,7
2034	0	4380000	5722,5	4937,2	6288,5
2035	0	4380000	5367,8	4677,7	5845,8
2036	0	4380000	5035,0	4431,8	5434,2
2037	0	4380000	4722,8	4198,8	5051,7
2038	0	4380000	4430,0	3978,1	4696,0
2039	0	4380000	4155,4	3769,0	4365,4
2040	0	4380000	3897,8	3570,9	4058,1
2041	0	4380000	3656,2	3383,2	3772,4
2042	0	4380000	3429,5	3205,3	3506,8
2043	0	4380000	3216,9	3036,8	3260,0
2044	0	4380000	3017,4	2877,2	3030,5
2045	0	4380000	2830,4	2725,9	2817,1
2046	0	4380000	2654,9	2582,6	2618,8
2047	0	4380000	2490,3	2446,9	2434,4
2048	0	4380000	2335,9	2318,2	2263,1
2049	0	4380000	2191,1	2196,4	2103,7
2050	0	4380000	2055,3	2080,9	1955,6
2051	0	4380000	1927,9	1971,5	1818,0
2052	0	4380000	1808,3	1867,9	1690,0
2053	0	4380000	1696,2	1769,7	1571,0
2054	0	4380000	1591,1	1676,7	1460,4
2055	0	4380000	1492,4	1588,5	1357,6
2056	0	4380000	1399,9	1505,0	1262,0

Tabla A.2 (continuación): Resultados de generación de metano del modelo LandGEM

Año	Residuos aceptados	Residuos Depositados	Metano Generado		
			Promedio	Límite Inferior	Límite Superior
	[Tn/año]	[Tn]	[Tn/año]	[Tn/año]	[Tn/año]
2057	0	4380000	1313,1	1425,9	1173,2
2058	0	4380000	1231,7	1350,9	1090,6
2059	0	4380000	1155,4	1279,9	1013,8
TOTAL [ton]			316706,7	255282,4	373741,0

Tabla A.3: Resultados de generación de biogás del modelo British Columbia

Año	Disposición total de Residuos [Tn/año]	Disposición total de Residuos Acum. [Tn]	Disposición de residuos [Ton/año]			Generación de Biogás	Generación de Biogás
			Relativamente Inerte	Moderadamente Biodegradable	Biodegradable	(m ³ /hr)	(m ³ /año)
2010	540000	540000	167940	57780	314280	0,0	0
2011	720000	1260000	223920	77040	419040	1111,9	9740304
2012	720000	1980000	223920	77040	419040	2502,7	21923934
2013	720000	2700000	223920	77040	419040	3779,0	33104267
2014	720000	3420000	223920	77040	419040	4950,5	43366100
2015	720000	4140000	223920	77040	419040	6025,9	52786996
2016	240000	4380000	74640	25680	139680	7013,5	61437894
2017	0	4380000	0	0	0	6932,1	60725632
2018	0	4380000	0	0	0	6364,5	55752746
2019	0	4380000	0	0	0	5844,7	51199242
2020	0	4380000	0	0	0	5368,6	47029332
2021	0	4380000	0	0	0	4932,7	43210303
2022	0	4380000	0	0	0	4533,4	39712246
2023	0	4380000	0	0	0	4167,6	36507807
2024	0	4380000	0	0	0	3832,4	33571991
2025	0	4380000	0	0	0	3525,3	30881930
2026	0	4380000	0	0	0	3243,9	28416721
2027	0	4380000	0	0	0	2986,0	26157254
2028	0	4380000	0	0	0	2749,5	24086049
2029	0	4380000	0	0	0	2532,8	22187126
2030	0	4380000	0	0	0	2334,0	20445868
2031	0	4380000	0	0	0	2151,7	18848912
2032	0	4380000	0	0	0	1984,5	17384034
2033	0	4380000	0	0	0	1831,1	16040057

Evaluación de generación de biogás en el vertedero de Piedras Blancas, Córdoba.

Tabla A.3(continuación): Resultados de generación de biogás del modelo British Columbia

Año	Disposición total de Residuos [Tn/año]	Disposición total de Residuos Acum. [Tn]	Disposición de residuos [Tn/año]			Generación de Biogás	Generación de Biogás
			Relativamente Inerte	Moderadamente Biodegradable	Biodegradable		
						(m ³ /hr)	(m ³ /año)
2034	0	4380000	0	0	0	1690,3	14806760
2035	0	4380000	0	0	0	1561,0	13674793
2036	0	4380000	0	0	0	1442,4	12635604
2037	0	4380000	0	0	0	1333,5	11681373
2038	0	4380000	0	0	0	1233,4	10804944
2039	0	4380000	0	0	0	1141,5	9999772
2040	0	4380000	0	0	0	1057,1	9259871
2041	0	4380000	0	0	0	979,4	8579766
2042	0	4380000	0	0	0	908,0	7954443
2043	0	4380000	0	0	0	842,4	7379319
2044	0	4380000	0	0	0	782,0	6850200
2045	0	4380000	0	0	0	726,4	6363246
2046	0	4380000	0	0	0	675,2	5914947
2047	0	4380000	0	0	0	628,1	5502086
2048	0	4380000	0	0	0	584,7	5121723
2049	0	4380000	0	0	0	544,7	4771166
2050	0	4380000	0	0	0	507,8	4447948
2051	0	4380000	0	0	0	473,7	4149815
2052	0	4380000	0	0	0	442,3	3874701
2053	0	4380000	0	0	0	413,3	3620715
2054	0	4380000	0	0	0	386,5	3386125
2055	0	4380000	0	0	0	361,8	3169345
2056	0	4380000	0	0	0	338,9	2968923
2057	0	4380000	0	0	0	317,8	2783529
2058	0	4380000	0	0	0	298,2	2611945
2059	0	4380000	0	0	0	280,0	2453054
						TOTAL [m³]	969.282.858

Tabla A.4: Resultados de generación de metano del modelo British Columbia

Año	Disposición total de Residuos [Tn/año]	Disposición total de Residuos Acum. [Tn]	Disposición de residuos [Tn/año]			Generación de Metano [Tn/año]
			Relativamente Inerte	Moderadamente Biodegradable	Biodegradable	
2010	540000	540000	167940	57780	314280	0,0
2011	720000	1260000	223920	77040	419040	3193,4
2012	720000	1980000	223920	77040	419040	7187,8
2013	720000	2700000	223920	77040	419040	10853,2
2014	720000	3420000	223920	77040	419040	14217,6
2015	720000	4140000	223920	77040	419040	17306,2
2016	240000	4380000	74640	25680	139680	20142,4
2017	0	4380000	0	0	0	19908,9
2018	0	4380000	0	0	0	18278,5
2019	0	4380000	0	0	0	16785,7
2020	0	4380000	0	0	0	15418,6
2021	0	4380000	0	0	0	14166,5
2022	0	4380000	0	0	0	13019,7
2023	0	4380000	0	0	0	11969,1
2024	0	4380000	0	0	0	11006,6
2025	0	4380000	0	0	0	10124,6
2026	0	4380000	0	0	0	9316,4
2027	0	4380000	0	0	0	8575,7
2028	0	4380000	0	0	0	7896,6
2029	0	4380000	0	0	0	7274,0
2030	0	4380000	0	0	0	6703,2
2031	0	4380000	0	0	0	6179,6
2032	0	4380000	0	0	0	5699,4
2033	0	4380000	0	0	0	5258,7
2034	0	4380000	0	0	0	4854,4
2035	0	4380000	0	0	0	4483,3
2036	0	4380000	0	0	0	4142,6
2037	0	4380000	0	0	0	3829,7
2038	0	4380000	0	0	0	3542,4
2039	0	4380000	0	0	0	3278,4
2040	0	4380000	0	0	0	3035,8
2041	0	4380000	0	0	0	2812,9
2042	0	4380000	0	0	0	2607,9
2043	0	4380000	0	0	0	2419,3
2044	0	4380000	0	0	0	2245,8
2045	0	4380000	0	0	0	2086,2
2046	0	4380000	0	0	0	1939,2

Tabla A.4 (continuación): Resultados de generación de metano del modelo British Columbia

Año	Disposición total de Residuos [Tn/año]	Disposición total de Residuos Acum. [Tn]	Disposición de residuos [Tn/año]			Generación de Metano [Tn/año]
			Relativamente Inerte	Moderadamente Biodegradable	Biodegradable	
2047	0	4380000	0	[Tn/año]	0	1803,9
2048	0	4380000	0	0	0	1679,2
2049	0	4380000	0	0	0	1564,2
2050	0	4380000	0	0	0	1458,3
2051	0	4380000	0	0	0	1360,5
2052	0	4380000	0	0	0	1270,3
2053	0	4380000	0	0	0	1187,1
2054	0	4380000	0	0	0	1110,1
2055	0	4380000	0	0	0	1039,1
2056	0	4380000	0	0	0	973,4
2057	0	4380000	0	0	0	912,6
2058	0	4380000	0	0	0	856,3
2059	0	4380000	0	0	0	804,2
					TOTAL [ton]	317.779,4

Evaluación de generación de biogás en el vertedero de Piedras Blancas, Córdoba.

Tabla A.5: Resultados de generación de biogás del modelo Triangular

Año	Disposición total de Residuos [Tn/año]	Disposición total de Residuos Acum. [Tn]	Generación de metano para los residuos depositados en cada año [m ³]							Generación de metano Total Anual [m ³ /año]	Generación de biogás Total Anual [m ³ /año]
			2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016		
2010	540000	540000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2011	720000	1260000	1251918	0	0	0	0	0	0	1251918	2503836
2012	720000	1980000	1251918	1669224	0	0	0	0	0	2921143	5842285
2013	720000	2700000	1251918	1669224	1669224	0	0	0	0	4590367	9180734
2014	720000	3420000	1251918	1669224	1669224	1669224	0	0	0	6259592	12519183
2015	720000	4140000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	0	0	7928816	15857632
2016	240000	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	0	9598041	19196081
2017	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2018	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2019	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2020	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2021	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2022	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2023	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2024	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2025	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2026	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2027	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2028	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2029	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2030	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898

Evaluación de generación de biogás en el vertedero de Piedras Blancas, Córdoba.

Tabla A.5 (continuación): Resultados de generación de biogás del modelo Triangular

Año	Disposición total de Residuos [Tn/año]	Disposición total de Residuos Acum. [Tn]	Generación de metano para los residuos depositados en cada año [m ³]							Generación de metano Total Anual [m ³ /año]	Generación de biogás Total Anual [m ³ /año]
			2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016		
2032	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2033	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2034	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2035	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2036	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2037	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2038	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2039	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2040	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2041	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2042	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2043	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2044	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2045	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2046	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2047	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2048	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2049	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2050	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2051	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2052	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898

Evaluación de generación de biogás en el vertedero de Piedras Blancas, Córdoba.

Tabla A.5 (continuación): Resultados de generación de biogás del modelo Triangular

Año	Disposición total de Residuos [Tn/año]	Disposición total de Residuos Acum. [Tn]	Generación de metano para los residuos depositados en cada año [m ³]							Generación de metano Total Anual [m ³ /año]	Generación de biogás Total Anual [m ³ /año]
			2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016		
2053	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2054	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2055	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2056	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2057	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2058	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2059	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
									TOTAL [m³]	469.191.184	938.382.367

Tabla A.6: Resultados de generación de metano del modelo Triangular

Año	Disposición total de Residuos [Tn/año]	Disposición total de Residuos Acum. [Tn]	Generación de metano Total Anual [m ³ /año]	Generación de metano Total Anual [Tn/año]
2010	540000	540000	0	0,0
2011	720000	1260000	1251918	850,1
2012	720000	1980000	2921143	1983,5
2013	720000	2700000	4590367	3116,9
2014	720000	3420000	6259592	4250,3
2015	720000	4140000	7928816	5383,7
2016	240000	4380000	9598041	6517,1
2017	0	4380000	10154449	6894,9
2018	0	4380000	10154449	6894,9
2019	0	4380000	10154449	6894,9
2020	0	4380000	10154449	6894,9
2021	0	4380000	10154449	6894,9
2022	0	4380000	10154449	6894,9
2023	0	4380000	10154449	6894,9
2024	0	4380000	10154449	6894,9
2025	0	4380000	10154449	6894,9
2026	0	4380000	10154449	6894,9
2027	0	4380000	10154449	6894,9
2028	0	4380000	10154449	6894,9
2029	0	4380000	10154449	6894,9
2030	0	4380000	10154449	6894,9
2031	0	4380000	10154449	6894,9
2032	0	4380000	10154449	6894,9
2033	0	4380000	10154449	6894,9
2034	0	4380000	10154449	6894,9
2035	0	4380000	10154449	6894,9
2036	0	4380000	10154449	6894,9
2037	0	4380000	10154449	6894,9
2038	0	4380000	10154449	6894,9
2039	0	4380000	10154449	6894,9
2040	0	4380000	10154449	6894,9
2041	0	4380000	10154449	6894,9
2042	0	4380000	10154449	6894,9
2043	0	4380000	10154449	6894,9
2044	0	4380000	10154449	6894,9
2045	0	4380000	10154449	6894,9
2046	0	4380000	10154449	6894,9

Tabla A.6 (continuación): Resultados de generación de metano del modelo Triangular

Año	Disposición total de Residuos [Tn/año]	Disposición total de Residuos Acum. [Tn]	Generación de metano Total Anual [m ³ /año]	Generación de metano Total Anual [Tn/año]
2047	0	4380000	10154449	6894,9
2048	0	4380000	10154449	6894,9
2049	0	4380000	10154449	6894,9
2050	0	4380000	10154449	6894,9
2051	0	4380000	10154449	6894,9
2052	0	4380000	10154449	6894,9
2053	0	4380000	10154449	6894,9
2054	0	4380000	10154449	6894,9
2055	0	4380000	10154449	6894,9
2056	0	4380000	10154449	6894,9
2057	0	4380000	10154449	6894,9
2058	0	4380000	10154449	6894,9
2059	0	4380000	10154449	6894,9
		TOTAL	469191184	318.580

Evaluación de generación de biogás en el vertedero de Piedras Blancas, Córdoba.

Tabla A.7: Resultados de generación de biogás del modelo de Orden Cero

Año	Disposición total de Residuos [Tn/año]	Disposición total de Residuos Acum. [Tn]	Año							Generación de metano Total Anual [m ³ /año]	Generación de biogás Total Anual [m ³ /año]
			2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016		
2010	540000	540000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2011	720000	1260000	1251918	0	0	0	0	0	0	1251918	2503836,73
2012	720000	1980000	1251918	1669224	0	0	0	0	0	2921143	5842285,71
2013	720000	2700000	1251918	1669224	1669224	0	0	0	0	4590367	9180734,69
2014	720000	3420000	1251918	1669224	1669224	1669224	0	0	0	6259592	12519183,7
2015	720000	4140000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	0	0	7928816	15857632,7
2016	240000	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	0	9598041	19196081,6
2017	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2018	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2019	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2020	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2021	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2022	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2023	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2024	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2025	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2026	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2027	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2028	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2029	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898

Evaluación de generación de biogás en el vertedero de Piedras Blancas, Córdoba.

Tabla A.7 (continuación): Resultados de generación de biogás del modelo de Orden Cero

Año	Disposición total de Residuos [Tn/año]	Disposición total de Residuos Acum. [Tn]	Año							Generación de metano Total Anual [m ³ /año]	Generación de biogás Total Anual [m ³ /año]
			2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016		
2030	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2031	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2032	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2033	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2034	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2035	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2036	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2037	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2038	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2039	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2040	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2041	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2042	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2043	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2044	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2045	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2046	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2047	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2048	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2049	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2050	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2051	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898

Evaluación de generación de biogás en el vertedero de Piedras Blancas, Córdoba.

Tabla A.7 (continuación): Resultados de generación de biogás del modelo de Orden Cero

Año	Disposición total de Residuos [Tn/año]	Disposición total de Residuos Acum. [Tn]	Año							Generación de metano Total Anual [m ³ /año]	Generación de biogás Total Anual [m ³ /año]
			2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016		
2052	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2053	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2054	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2055	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2056	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2057	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2058	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
2059	0	4380000	1251918	1669224	1669224	1669224	1669224	1669224	556408	10154449	20308898
									TOTAL [m³]	469.191.184	938.382.367

Tabla A.8: Resultados de generación de metano del modelo de Orden Cero

Año	Disposición total de Residuos [Tn/año]	Disposición total de Residuos Acum. [Tn]	Generación de metano Total Anual [m ³ /año]	Generación de metano Total Anual [Tn/año]
2010	540000	540000	0	0,0
2011	720000	1260000	1251918	850,1
2012	720000	1980000	2921143	1983,5
2013	720000	2700000	4590367	3116,9
2014	720000	3420000	6259592	4250,3
2015	720000	4140000	7928816	5383,7
2016	240000	4380000	9598041	6517,1
2017	0	4380000	10154449	6894,9
2018	0	4380000	10154449	6894,9
2019	0	4380000	10154449	6894,9
2020	0	4380000	10154449	6894,9
2021	0	4380000	10154449	6894,9
2022	0	4380000	10154449	6894,9
2023	0	4380000	10154449	6894,9
2024	0	4380000	10154449	6894,9
2025	0	4380000	10154449	6894,9
2026	0	4380000	10154449	6894,9
2027	0	4380000	10154449	6894,9
2028	0	4380000	10154449	6894,9
2029	0	4380000	10154449	6894,9
2030	0	4380000	10154449	6894,9
2031	0	4380000	10154449	6894,9
2032	0	4380000	10154449	6894,9
2033	0	4380000	10154449	6894,9
2034	0	4380000	10154449	6894,9
2035	0	4380000	10154449	6894,9
2036	0	4380000	10154449	6894,9
2037	0	4380000	10154449	6894,9
2038	0	4380000	10154449	6894,9
2039	0	4380000	10154449	6894,9
2040	0	4380000	10154449	6894,9
2041	0	4380000	10154449	6894,9
2042	0	4380000	10154449	6894,9
2043	0	4380000	10154449	6894,9
2044	0	4380000	10154449	6894,9
2045	0	4380000	10154449	6894,9
2046	0	4380000	10154449	6894,9
2047	0	4380000	10154449	6894,9
2048	0	4380000	10154449	6894,9

Tabla A.8 (continuación): Resultados de generación de metano del modelo de Orden Cero

Año	Disposición total de Residuos [Tn/año]	Disposición total de Residuos Acum. [Tn]	Generación de metano Total Anual [m ³ /año]	Generación de metano Total Anual [Tn/año]
2049	0	4380000	10154449	6894,9
2050	0	4380000	10154449	6894,9
2051	0	4380000	10154449	6894,9
2052	0	4380000	10154449	6894,9
2053	0	4380000	10154449	6894,9
2054	0	4380000	10154449	6894,9
2055	0	4380000	10154449	6894,9
2056	0	4380000	10154449	6894,9
2057	0	4380000	10154449	6894,9
2058	0	4380000	10154449	6894,9
2059	0	4380000	10154449	6894,9
		TOTAL [ton]		318.580,8

Tabla A.9: Resultados de generación de biogás de la estimación alternativa mediante el modelo LandGEM

Año	Disposición total de Residuos [Tn/año]	Disposición total de Residuos Acum. [Tn]	Disposición de residuos [Tn/año]			Generación de Biogás [m ³ /año]			
			Relativamente Inerte	Moderadamente Biodegradable	Biodegradable	Relativamente Inerte	Moderadamente Biodegradable	Biodegradable	Total
2010	540000	0	162657	56726	320606	0	0	0	0
2011	720000	540000	216876	75635	427474	128962	534892	8869924	9533779
2012	720000	1260000	216876	75635	427474	298358	1227109	19933066	21458533
2013	720000	1980000	216876	75635	427474	464399	1892183	30044017	32400600
2014	720000	2700000	216876	75635	427474	627153	2531180	39284730	42443063
2015	720000	3420000	216876	75635	427474	786684	3145121	47730106	51661910
2016	240000	4140000	72292	25212	142491	943056	3734989	55448598	60126643
2017	0	4380000	0	0	0	981699	3826268	54618391	59426358
2018	0	4380000	0	0	0	962260	3676238	49917451	54555949
2019	0	4380000	0	0	0	943206	3532090	45621115	50096412
2020	0	4380000	0	0	0	924529	3393595	41694560	46012684
2021	0	4380000	0	0	0	906222	3260530	38105959	42272711
2022	0	4380000	0	0	0	888278	3132683	34826224	38847185
2023	0	4380000	0	0	0	870689	3009849	31828772	35709310

Evaluación de generación de biogás en el vertedero de Piedras Blancas, Córdoba.

Tabla A.9 (continuación) : Resultados de generación de biogás de la estimación alternativa mediante el modelo LandGEM

Año	Disposición total de Residuos [n/año]	Disposición total de Residuos Acum. [Tn]	Disposición de residuos [Tn/año]			Generación de Biogás [m³/año]			
			Relativamente Inerte	Moderadamente Biodegradable	Biodegradable	Relativamente Inerte	Moderadamente Biodegradable	Biodegradable	Total
2024	0	4380000	0	0	0	853448	2891831	29089307	32834586
2025	0	4380000	0	0	0	836548	2778441	26585625	30200614
2026	0	4380000	0	0	0	819984	2669497	24297432	27786912
2027	0	4380000	0	0	0	803747	2564824	22206181	25574752
2028	0	4380000	0	0	0	787832	2464256	20294921	23547009
2029	0	4380000	0	0	0	772232	2367631	18548161	21688024
2030	0	4380000	0	0	0	756940	2274795	16951743	19983478
2031	0	4380000	0	0	0	741952	2185599	15492727	18420277
2032	0	4380000	0	0	0	727260	2099900	14159286	16986447
2033	0	4380000	0	0	0	712860	2017562	12940613	15671035
2034	0	4380000	0	0	0	698744	1938452	11826830	14464026
2035	0	4380000	0	0	0	684908	1862445	10808909	13356261
2036	0	4380000	0	0	0	671346	1789417	9878599	12339362
2037	0	4380000	0	0	0	658052	1719253	9028359	11405665
2038	0	4380000	0	0	0	645022	1651840	8251299	10548161
2039	0	4380000	0	0	0	632250	1587071	7541120	9760440
2040	0	4380000	0	0	0	619730	1524841	6892064	9036635
2041	0	4380000	0	0	0	607459	1465051	6298873	8371382
2042	0	4380000	0	0	0	595430	1407605	5756736	7759772
2043	0	4380000	0	0	0	583640	1352412	5261261	7197313
2044	0	4380000	0	0	0	572083	1299383	4808430	6679897
2045	0	4380000	0	0	0	560755	1248434	4394574	6203763
2046	0	4380000	0	0	0	549652	1199482	4016338	5765472
2047	0	4380000	0	0	0	538768	1152450	3670657	5361874
2048	0	4380000	0	0	0	528099	1107262	3354728	4990089
2049	0	4380000	0	0	0	517642	1063845	3065990	4647478
2050	0	4380000	0	0	0	507392	1022131	2802104	4331628
2051	0	4380000	0	0	0	497345	982053	2560930	4040329
2052	0	4380000	0	0	0	487497	943546	2340514	3771557
2053	0	4380000	0	0	0	477844	906549	2139069	3523462
2054	0	4380000	0	0	0	468382	871003	1954962	3294347
2055	0	4380000	0	0	0	459108	836850	1786701	3082658
2056	0	4380000	0	0	0	450017	804037	1632921	2886975
2057	0	4380000	0	0	0	441106	772510	1492378	2705994
2058	0	4380000	0	0	0	432371	742220	1363931	2538521
2059	0	4380000	0	0	0	423810	713117	1246539	2383465
								TOTAL [m³]	947.684.797

Evaluación de generación de biogás en el vertedero de Piedras Blancas, Córdoba.

Tabla A.10: Resultados de generación de metano de la estimación alternativa mediante el modelo LandGEM

Año	Disposición total de Residuos [Tn/año]	Disposición total de Residuos Acum. [Tn]	Disposición de residuos [Tn/año]			Generación de Metano [Tn/año]			
			Relativamente Inerte	Moderadamente Biodegradable	Biodegradable	Relativamente Inerte	Moderadamente Biodegradable	Biodegradable	Total
2010	540000	0	162657	56726	320606	0	0	0	539989
2011	720000	540000	216876	75635	427474	43	178	2959	3180
2012	720000	1260000	216876	75635	427474	100	409	6649	7158
2013	720000	1980000	216876	75635	427474	155	631	10022	10808
2014	720000	2700000	216876	75635	427474	209	844	13104	14158
2015	720000	3420000	216876	75635	427474	262	1049	15922	17233
2016	240000	4140000	72292	25212	142491	315	1246	18496	20057
2017	0	4380000	0	0	0	327	1276	18219	19823
2018	0	4380000	0	0	0	321	1226	16651	18198
2019	0	4380000	0	0	0	315	1178	15218	16711
2020	0	4380000	0	0	0	308	1132	13908	15349
2021	0	4380000	0	0	0	302	1088	12711	14101
2022	0	4380000	0	0	0	296	1045	11617	12958
2023	0	4380000	0	0	0	290	1004	10617	11912
2024	0	4380000	0	0	0	285	965	9703	10953
2025	0	4380000	0	0	0	279	927	8868	10074
2026	0	4380000	0	0	0	274	890	8105	9269
2027	0	4380000	0	0	0	268	856	7407	8531
2028	0	4380000	0	0	0	263	822	6770	7855
2029	0	4380000	0	0	0	258	790	6187	7235
2030	0	4380000	0	0	0	252	759	5655	6666
2031	0	4380000	0	0	0	247	729	5168	6145
2032	0	4380000	0	0	0	243	700	4723	5666
2033	0	4380000	0	0	0	238	673	4317	5227
2034	0	4380000	0	0	0	233	647	3945	4825
2035	0	4380000	0	0	0	228	621	3606	4455
2036	0	4380000	0	0	0	224	597	3295	4116
2037	0	4380000	0	0	0	220	573	3012	3805
2038	0	4380000	0	0	0	215	551	2752	3519
2039	0	4380000	0	0	0	211	529	2516	3256
2040	0	4380000	0	0	0	207	509	2299	3014
2041	0	4380000	0	0	0	203	489	2101	2792
2042	0	4380000	0	0	0	199	470	1920	2588
2043	0	4380000	0	0	0	195	451	1755	2401
2044	0	4380000	0	0	0	191	433	1604	2228
2045	0	4380000	0	0	0	187	416	1466	2069
2046	0	4380000	0	0	0	183	400	1340	1923
2047	0	4380000	0	0	0	180	384	1224	1789

Tabla A.10 (continuación): Resultados de generación de metano de la estimación alternativa mediante el modelo LandGEM

Evaluación de generación de biogás en el vertedero de Piedras Blancas, Córdoba.

Año	Disposición total de Residuos [Tn/año]	Disposición total de Residuos Acum. [Tn]	Disposición de residuos [Tn/año]			Generación de Metano [Tn/año]			
			Relativamente Inerte	Moderadamente Biodegradable	Biodegradable	Relativamente Inerte	Moderadamente Biodegradable	Biodegradable	Total
2048	0	4380000	0	0	0	176	369	1119	1665
2049	0	4380000	0	0	0	173	355	1023	1550
2050	0	4380000	0	0	0	169	341	935	1445
2051	0	4380000	0	0	0	166	328	854	1348
2052	0	4380000	0	0	0	163	315	781	1258
2053	0	4380000	0	0	0	159	302	714	1175
2054	0	4380000	0	0	0	156	291	652	1099
2055	0	4380000	0	0	0	153	279	596	1028
2056	0	4380000	0	0	0	150	268	545	963
2057	0	4380000	0	0	0	147	258	498	903
2058	0	4380000	0	0	0	144	248	455	847
2059	0	4380000	0	0	0	141	238	416	795
								TOTAL [ton]	856.112

Tabla A.10: Análisis de variabilidad. Resultados de generación de biogás tomando una variación de +/- 10% en la cantidad de residuos.

Variación + 10%				Variación - 10%			
Año	Residuos aceptados (Tn/año)	Residuos Depositados (Tn)	Biogás Generado (m ³ /año)	Año	Residuos aceptados (Tn/año)	Residuos Depositados (Tn)	Biogás Generado (m ³ /año)
2010	594000	0	0	2010	486000	0	0
2011	792000	594000	8393449	2011	648000	486000	6867367
2012	792000	1386000	19064362	2012	648000	1134000	15598114
2013	792000	2178000	29073732	2013	648000	1782000	23787599
2014	792000	2970000	38462571	2014	648000	2430000	31469376
2015	792000	3762000	47269348	2015	648000	3078000	38674921
2016	264000	4554000	55530150	2016	216000	3726000	45433759
2017	0	4818000	55817980	2017	0	3942000	45669256
2018	0	4818000	52357544	2018	0	3942000	42837991
2019	0	4818000	49111638	2019	0	3942000	40182250
2020	0	4818000	46066962	2020	0	3942000	37691151
2021	0	4818000	43211041	2021	0	3942000	35354488

Tabla A.10 (continuación): Análisis de variabilidad. Resultados de generación de biogás tomando una variación de +/- 10% en la cantidad de residuos.

Evaluación de generación de biogás en el vertedero de Piedras Blancas, Córdoba.

Variación + 10%				Variación - 10%			
Año	Residuos aceptados (Tn/año)	Residuos Depositados (Tn)	Biogás Generado (m ³ /año)	Año	Residuos aceptados (Tn/año)	Residuos Depositados (Tn)	Biogás Generado (m ³ /año)
2022	0	4818000	40532172	2022	0	3942000	33162687
2023	0	4818000	38019380	2023	0	3942000	31106766
2024	0	4818000	35662369	2024	0	3942000	29178302
2025	0	4818000	33451480	2025	0	3942000	27369393
2026	0	4818000	31377656	2026	0	3942000	25672627
2027	0	4818000	29432398	2027	0	3942000	24081053
2028	0	4818000	27607736	2028	0	3942000	22588148
2029	0	4818000	25896195	2029	0	3942000	21187796
2030	0	4818000	24290760	2030	0	3294000	19874258
2031	0	4818000	22784855	2031	0	3294000	18642154
2032	0	4818000	21372307	2032	0	3294000	17486433
2033	0	4818000	20047331	2033	0	3294000	16402362
2034	0	4818000	18804497	2034	0	3294000	15385498
2035	0	4818000	17638712	2035	0	3294000	14431674
2036	0	4818000	16545200	2036	0	3294000	13536982
2037	0	4818000	15519480	2037	0	3294000	12697757
2038	0	4818000	14557350	2038	0	3294000	11910559
2039	0	4818000	13654867	2039	0	3294000	11172164
2040	0	4818000	12808334	2040	0	3294000	10479546
2041	0	4818000	12014281	2041	0	3294000	9829866
2042	0	4818000	11269456	2042	0	3294000	9220464
2043	0	4818000	10570806	2043	0	3294000	8648841
2044	0	4818000	9915469	2044	0	3294000	8112656
2045	0	4818000	9300759	2045	0	3294000	7609712
2046	0	4818000	8724159	2046	0	3294000	7137948
2047	0	4818000	8183304	2047	0	3294000	6695431
2048	0	4818000	7675981	2048	0	3294000	6280348
2049	0	4818000	7200108	2049	0	3294000	5890998
2050	0	4818000	6753737	2050	0	3294000	5525785
2051	0	4818000	6335039	2051	0	3294000	5183214
2052	0	4818000	5942299	2052	0	3294000	4861881
2053	0	4818000	5573906	2053	0	3294000	4560468
2054	0	4818000	5228352	2054	0	3294000	4277742
2055	0	4818000	4904220	2055	0	3294000	4012544
2056	0	4818000	4600183	2056	0	3294000	3763786

Tabla A.10 (continuación): Análisis de variabilidad. Resultados de generación de biogás tomando una variación de +/- 10% en la cantidad de residuos.

Evaluación de generación de biogás en el vertedero de Piedras Blancas, Córdoba.

Variación + 10%				Variación - 10%			
Año	Residuos aceptados (Tn/año)	Residuos Depositados (Tn)	Biogás Generado (m ³ /año)	Año	Residuos aceptados (Tn/año)	Residuos Depositados (Ton)	Biogás Generado (m ³ /año)
2057	0	4818000	4314994	2057	0	3294000	3530450
2058	0	4818000	4047486	2058	0	3294000	3311580
2059	0	4818000	3796562	2059	0	3294000	3106278
TOTAL [m³]			1.040.712.961				851.492.423

Tabla A.11: Análisis de variabilidad. Resultados de generación de biogás tomando una variación de +/- 10% en el coeficiente de velocidad de generación de metano k.

Año	Residuos aceptados (Tn/año)	Residuos Depositados (Tn)	Biogás Generado [m ³ /año]		
			Variación +10%	Variación -10%	Sin Variación
2010	540000	0	0	0	0
2011	720000	540000	8369607	6886953	7657276
2012	720000	1260000	18960126	15684076	17392263
2013	720000	1980000	28830710	23988802	26523731
2014	720000	2700000	38030302	31828692	35089093
2015	720000	3420000	46604514	39229763	43123445
2016	240000	4140000	54595859	46216578	50659708
2017	0	4380000	54604309	46690588	50922293
2018	0	4380000	50892360	44077198	47765365
2019	0	4380000	47432745	41610086	44804152
2020	0	4380000	44208311	39281065	42026518
2021	0	4380000	41203072	37082405	39421084
2022	0	4380000	38402125	35006809	36977174
2023	0	4380000	35791585	33047390	34684774
2024	0	4380000	33358507	31197645	32534491
2025	0	4380000	31090827	29451434	30517516
2026	0	4380000	28977301	27802963	28625582
2027	0	4380000	27007451	26246761	26850939
2028	0	4380000	25171510	24777664	25186315
2029	0	4380000	23460375	23390796	23624890
2030	0	4380000	21865560	22081554	22160265
2031	0	4380000	20379160	20845594	20786439
2032	0	4380000	18993804	19678813	19497784
2033	0	4380000	17702623	18577341	18289019

Evaluación de generación de biogás en el vertedero de Piedras Blancas, Córdoba.

Tabla A.11 (continuación): Análisis de variabilidad. Resultados de generación de biogás tomando una variación de +/- 10% en el coeficiente de velocidad de generación de metano k.

Año	Residuos aceptados (Tn/año)	Residuos Depositados (Tn)	Biogás Generado [m ³ /año]		
			Variación +10%	Variación -10%	Sin Variación
2034	0	4380000	16499215	17537520	17155191
2035	0	4380000	15377614	16555901	16091655
2036	0	4380000	14332258	15629226	15094053
2037	0	4380000	13357965	14754419	14158297
2038	0	4380000	12449903	13928577	13280553
2039	0	4380000	11603570	13148959	12457225
2040	0	4380000	10814770	12412979	11684940
2041	0	4380000	10079592	11718193	10960532
2042	0	4380000	9394391	11062296	10281034
2043	0	4380000	8755769	10443112	9643661
2044	0	4380000	8160560	9858584	9045802
2045	0	4380000	7605813	9306775	8485008
2046	0	4380000	7088777	8785851	7958980
2047	0	4380000	6606888	8294085	7465563
2048	0	4380000	6157758	7829844	7002735
2049	0	4380000	5739160	7391588	6568601
2050	0	4380000	5349017	6977862	6161380
2051	0	4380000	4985396	6587294	5779405
2052	0	4380000	4646493	6218586	5421111
2053	0	4380000	4330629	5870516	5085029
2054	0	4380000	4036237	5541929	4769783
2055	0	4380000	3761857	5231733	4474080
2056	0	4380000	3506130	4938900	4196710
2057	0	4380000	3267786	4662457	3936535
2058	0	4380000	3045645	4401488	3692489
2059	0	4380000	2838605	4155125	3463573
TOTAL [m³]			959.724.543	927.924.769	949.434.039

Tabla A.12: Análisis de variabilidad. Resultados de generación de biogás tomando una variación de +/- 10% en el potencial de generación de metano L₀.

Evaluación de generación de biogás en el vertedero de Piedras Blancas, Córdoba.

Año	Residuos aceptados [Tn/año]	Residuos Depositados [Tn]	Biogás Generado [m ³ /año]		
			Variación + 10%	Variación - 10%	Sin Variación
2010	540000	0	0	0	0
2011	720000	540000	8393449	6867367	7657276
2012	720000	1260000	19064362	15598114	17392263
2013	720000	1980000	29073732	23787599	26523731
2014	720000	2700000	38462571	31469376	35089093
2015	720000	3420000	47269348	38674921	43123445
2016	240000	4140000	55530150	45433759	50659708
2017	0	4380000	55817980	45669256	50922293
2018	0	4380000	52357544	42837991	47765365
2019	0	4380000	49111638	40182250	44804152
2020	0	4380000	46066962	37691151	42026518
2021	0	4380000	43211041	35354488	39421084
2022	0	4380000	40532172	33162687	36977174
2023	0	4380000	38019380	31106766	34684774
2024	0	4380000	35662369	29178302	32534491
2025	0	4380000	33451480	27369393	30517516
2026	0	4380000	31377656	25672627	28625582
2027	0	4380000	29432398	24081053	26850939
2028	0	4380000	27607736	22588148	25186315
2029	0	4380000	25896195	21187796	23624890
2030	0	4380000	24290760	19874258	22160265
2031	0	4380000	22784855	18642154	20786439
2032	0	4380000	21372307	17486433	19497784
2033	0	4380000	20047331	16402362	18289019
2034	0	4380000	18804497	15385498	17155191
2035	0	4380000	17638712	14431674	16091655
2036	0	4380000	16545200	13536982	15094053
2037	0	4380000	15519480	12697757	14158297
2038	0	4380000	14557350	11910559	13280553
2039	0	4380000	13654867	11172164	12457225
2040	0	4380000	12808334	10479546	11684940
2041	0	4380000	12014281	9829866	10960532
2042	0	4380000	11269456	9220464	10281034

Tabla A.12 (continuación): Análisis de variabilidad. Resultados de generación de biogás tomando una variación de +/- 10% en el potencial de generación de metano L₀.

Año			Biogás Generado [m ³ /año]
-----	--	--	---------------------------------------

Evaluación de generación de biogás en el vertedero de Piedras Blancas, Córdoba.

	Residuos aceptados [Tn/año]	Residuos Depositados [Tn]	Variación + 10%	Variación - 10%	Sin Variación
2043	0	4380000	10570806	8648841	9643661
2044	0	4380000	9915469	8112656	9045802
2045	0	4380000	9300759	7609712	8485008
2046	0	4380000	8724159	7137948	7958980
2047	0	4380000	8183304	6695431	7465563
2048	0	4380000	7675981	6280348	7002735
2049	0	4380000	7200108	5890998	6568601
2050	0	4380000	6753737	5525785	6161380
2051	0	4380000	6335039	5183214	5779405
2052	0	4380000	5942299	4861881	5421111
2053	0	4380000	5573906	4560468	5085029
2054	0	4380000	5228352	4277742	4769783
2055	0	4380000	4904220	4012544	4474080
2056	0	4380000	4600183	3763786	4196710
2057	0	4380000	4314994	3530450	3936535
2058	0	4380000	4047486	3311580	3692489
2059	0	4380000	3796562	3106278	3463573
		TOTAL [m³]	1.040.712.961	851.492.423	949.434.039

Tabla A.13: Análisis de variabilidad. Resultados de generación de biogás tomando una variación de - 10% en el Factor por Adición de Agua.

Año	Disposición total de Residuos [Tn/año]	Disposición total de Residuos Acum. [Tn]	Generación de Biogás [m ³ /año]
2010	540000	0	0
2011	720000	540000	6817035
2012	720000	1260000	15528710
2013	720000	1980000	23757706
2014	720000	2700000	31530768
2015	720000	3420000	38873156
2016	240000	4140000	45808732
2017	0	4380000	46300449
2018	0	4380000	43735130
2019	0	4380000	41311944
2020	0	4380000	39023018
2021	0	4380000	36860911

Tabla A.13 (continuación): Análisis de variabilidad. Resultados de generación de biogás tomando una variación de - 10% en el Factor por Adición de Agua.

Evaluación de generación de biogás en el vertedero de Piedras Blancas, Córdoba.

Año	Disposición total de Residuos [Tn/año]	Disposición total de Residuos Acum. [Tn]	Generación de Biogás [m ³ /año]
2022	0	4380000	34818598
2023	0	4380000	32889441
2024	0	4380000	31067171
2025	0	4380000	29345865
2026	0	4380000	27719931
2027	0	4380000	26184082
2028	0	4380000	24733329
2029	0	4380000	23362955
2030	0	4380000	22068509
2031	0	4380000	20845783
2032	0	4380000	19690803
2033	0	4380000	18599816
2034	0	4380000	17569276
2035	0	4380000	16595833
2036	0	4380000	15676326
2037	0	4380000	14807764
2038	0	4380000	13987326
2039	0	4380000	13212346
2040	0	4380000	12480303
2041	0	4380000	11788821
2042	0	4380000	11135650
2043	0	4380000	10518669
2044	0	4380000	9935872
2045	0	4380000	9385366
2046	0	4380000	8865361
2047	0	4380000	8374167
2048	0	4380000	7910189
2049	0	4380000	7471918
2050	0	4380000	7057929
2051	0	4380000	6666878
2052	0	4380000	6297493
2053	0	4380000	5948575
2054	0	4380000	5618989
2055	0	4380000	5307663
2056	0	4380000	5013587
2057	0	4380000	4735805
2058	0	4380000	4473413
2059	0	4380000	4225559
		TOTAL [m³]	925.934.919