



S.E.P.

S.E.S.

Tec.N.M.

**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA**

**“DISEÑO DE UN RELLENO SANITARIO
INTERMUNICIPAL SUSTENTABLE”**

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

P R E S E N T A
DIEGO SANTANA RODRÍGUEZ
No. CONTROL: 0828M0976

DIRECTORA
DRA. MARÍA DEL CONSUELO HERNÁNDEZ BERRIEL

CO-DIRECTORA
DRA. MARÍA DEL CONSUELO MAÑÓN SALAS

METEPEC, ESTADO DE MÉXICO, DICIEMBRE DE 2017

A Isa y Balta por su incondicional cariño y apoyo

A Elvi por estar a mi lado

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Instituto Tecnológico de Toluca por abrirme las puertas de sus instalaciones y brindarme la oportunidad formarme profesionalmente.

Agradezco al CONACYT y al COMECYT por brindarme los apoyos necesarios para lograr los objetivos planteados en este proyecto y la estancia de investigación en el extranjero.

A mis directoras de tesis, Dra. María y Dra. Chelo, así como a mis revisores Dra., Carmen, Dr. Nicolás, y Dra. Ana Belem por los conocimientos adquiridos durante el desarrollo de este proyecto, por su tolerancia y su completa disposición.

A la Dra. Amaya, Dra. Ana y M. Elizabeth por compartir sus conocimientos, experiencias y por hacerme sentirme como en casa aun estando lejos.

A la empresa MASERA S. A. de C.V. por brindarme el apoyo tanto la recopilación de la información como en el ingreso de sus instalaciones y en especial al Ing. Francisco, Ing. Juan Carlos y a la Ing. Mari por su pronta disposición.

A todas aquellas personas que me apoyaron durante el desarrollo del presente proyecto y con las que compartí experiencias, bromas, risas y laboratorio, en especial a: Lau, Isis, Ana, Kari, Elvira, Aiza, Olay, Jesús, Quique, Dr. Jesús, Dr. Isaías, Julio, Mayte, Juan, Xóchitl y Nadia.

RESUMEN

En México la mayor generación de residuos sólidos urbanos (RSU) corresponde a la zona centro, en donde los municipios de la periferia del Estado de México (EdoMex) y de entidades federativas aledañas (Morelos y Guerrero), carecen de los recursos necesarios para la construcción de Rellenos Sanitarios (RESA), de tal forma que los sitios de disposición final (SDF) existentes son insuficientes y los RSU son depositados generalmente en Tiraderos a Cielo Abierto (TCA), lo cual conlleva riesgos de contaminación ambiental y de salud pública.

De acuerdo con lo anterior, el presente trabajo tuvo por objetivo diseñar un RESA intermunicipal sustentable, para municipios colindantes entre el EdoMex, Guerrero y Morelos. Para ello, se recabó y procesó información de los municipios de las entidades federativas mencionadas, se seleccionó mediante análisis de Clúster y Ponderación Lineal aquellos representativos del área de estudio y se realizó la caracterización de RSU en sus SDF; a continuación, para un municipio representativo y los colindantes, se dimensionó una celda para contener los RSU generados en dos años y considerando celdas tipo CA y CB, se estimó su vida útil. Posteriormente utilizando Modulo 4.0 se simuló diferentes escenarios con recirculaciones en pozos y en superficie para un periodo de operación de 30 años; eligiéndose para CA y CB, los que presentaron las mayores generaciones de CH₄; finalmente se realizó la evaluación técnico-económica para el RESA sustentable.

Entre los resultados destacan que de los 24 municipios del área de estudio se obtuvieron cuatro Clúster, siendo el elegido el número 3, representado por Tejupilco, EdoMex. Se caracterizaron los SDF de Tejupilco, EdoMex., Pilcaya, Gro. y Huitzilac, Mor., donde los materiales potencialmente valorizables corresponden al 43.7%, 35.3% y 25.2% respectivamente. Para el Clúster 3 se dimensionaron celdas de capacidad volumétrica de 180 798 y 101 826 m³, esta última sin el 80% de reciclables. De contar con un RESA intermunicipal con CA y CB para el Clúster 3, éste tendría una vida útil de 8 años con las generaciones de RSU proyectadas y de 14 años recuperando el 80% de los materiales potencialmente valorizables.

ABSTRACT

In Mexico the largest generation of municipal solid waste (MSW) corresponds to the downtown area, where the municipalities of the periphery of the State of Mexico (Edomex) and neighboring states (Morelos and Guerrero), lack the necessary resources for the construction of Landfills, so that existing disposal sites are insufficient and MSW are generally deposited in open dumpsites, which carries risks of environmental pollution and public health.

In accordance with the above, the present work aimed to design a sustainable intermunicipal landfill, for adjacent municipalities between EdoMex, Guerrero and Morelos. To do this, it was collected and processed data from the municipalities of the states mentioned, was selected by cluster analysis and linear weighting those representative of the study area and characterization of MSW in its final disposal sites; then for a representative municipality and surrounding, a cell is sized to contain the MSW generated in two years and considering cell type CA and CB, life was estimated. Subsequently, using Moduelo 4.0, different scenarios were simulated with recirculations in wells and surface for a period of operation of 30 years; choosing for CA and CB, those that presented the greatest generations of CH₄; finally the technical economic evaluation for the sustainable landfill was made.

Among the results, it is worth mentioning that of the 24 municipalities in the study area, four Cluster were obtained, with the chosen one being number 3, represented by Tejupilco, EdoMex. The SDF of Tejupilco, EdoMex., Pilcaya, Gro. and Huitzilac, Mor., where the potentially recoverable materials correspond to 43.7%, 35.3% and 25.2% respectively. For Cluster 3, cells of volumetric capacity of 180 798 and 101 826 m³ were sized, the latter without 80% of recyclables. To have an inter-landfill with CA and CB for Cluster 3, it would have a lifespan of eight years with projected MSW generations and 14 years recovering 80% of potentially recoverable materials.

ÍNDICE

RESUMEN.....	iii
ABSTRACT.....	iv
ÍNDICE.....	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
INTRODUCCIÓN.....	1
1. FUNDAMENTOS.....	3
1.1 GENERACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN MÉXICO.....	3
1.2 GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	5
1.2.1 Barrido, recolección y transporte.....	8
1.2.2 Transferencia.....	8
1.2.3 Aprovechamiento de reciclables de residuos sólidos urbanos.....	9
1.2.4 Disposición final.....	10
1.2.5 Producción y aprovechamiento de biogás.....	11
1.3 DISEÑO DE RELLENOS SANITARIOS.....	13
1.3.1 Tipos de rellenos sanitarios sustentables.....	18
1.3.2 Factores de diseño.....	19
1.3.3 Casos de rellenos sanitarios sustentables.....	21
1.4 DISEÑO Y SIMULACIÓN CON Moduelo 4.0.....	23
1.4.1 Modelo morfológico.....	24
1.4.2 Modelo meteorológico.....	25
1.4.3 Modelo hidrológico.....	25
1.4.4 Modelo de biodegradación.....	26
1.4.5 Vertido y operación tradicional.....	27
1.4.6 Operación con recirculación.....	27
1.5 RELACIONES DE INTERMUNICIPALIDAD.....	27
2. PARTE EXPERIMENTAL.....	29
2.1 RECOPIACIÓN Y PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN.....	30
2.2 SELECCIÓN DE MUNICIPIOS.....	30

2.3 CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS	31
2.4 DISEÑO DE UN RELLENO INTERMUNICIPAL SUSTENTABLE	32
2.4.1 Dimensionamiento de Celdas	32
2.4.2 Modelo meteorológico	35
2.4.3 Constantes y calibración	35
2.4.4 Modelo de generación de residuos sólidos urbanos	37
2.4.5 Modelo de almacenamiento de lixiviado	37
2.4.6 Estimación de biogás y lixiviados mediante simulación	37
2.4.7 Dimensionamiento de sistemas de aprovechamiento de biogás....	40
2.5 EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE UN RELLENO INTERMUNICIPAL SUSTENTABLE	40
2.5.1 Selección del sistema de aprovechamiento de biogás	40
2.5.2 Análisis económico del sistema de aprovechamiento de biogás ...	41
3. RESULTADOS.....	44
3.1 RECOPIACIÓN Y PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN	44
3.2 MUNICIPIOS SELECCIONADOS	48
3.3 ESTUDIOS DE CARACTERIZACIÓN	52
3.3.1 Caracterización Tejupilco	52
3.3.2 Caracterización Huitzilac	53
3.3.3 Caracterización Pilcaya.....	54
3.3.4 Composición de residuos sólidos urbanos en Modulo 4.0.....	55
3.4 DISEÑO DE UN RELLENO INTERMUNICIPAL SUSTENTABLE	56
3.4.1 Dimensionamiento de celdas	56
3.4.2 Diseño de celdas tipo para simulación	59
3.4.3 Simulación de la operación tradicional CA y CB.....	66
3.4.4 Simulación de la operación con recirculación de lixiviados en CA y CB	68
3.4.5 Dimensionamiento del sistema de aprovechamiento de biogás....	72
3.5 EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE UN RELLENO SANITARIO INTERMUNICIPAL SUSTENTABLE	84
3.5.1 Selección del sistema de aprovechamiento de biogás	84

3.5.2 Análisis económico del sistema de aprovechamiento de biogás ...	86
3.5.3 Análisis de sensibilidad	96
4. CONCLUSIONES	98
5. REFERENCIAS	99
ANEXO A.....	106
ANEXO B.....	108
ANEXO C.....	109
ANEXO D.....	110
ANEXO E	111
ANEXO F	112
ANEXO G.....	113
ANEXO H.....	117
ANEXO I.....	125
ANEXO J	126

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Generación de RSU en la zona centro de México5

Tabla 1.2 Estudios y análisis previos para la construcción y diseño de RESA 13

Tabla 1.3 Obras complementarias 14

Tabla 1.4 Proyectos registrados por México en MDL22

Tabla 1.4 Proyectos registrados por México en MDL (Continuación)23

Tabla 2.1 Parámetros listados por criterio31

Tabla 2.2 Dimensiones de los modelos morfológicos.....33

Tabla 2.3 Características morfológicas de las celdas tipo33

Tabla 2.4 Características de las celdas en los modelos morfológicos34

Tabla 2.5 Constantes empleadas en Modulo 4.035

Tabla 2.5 Constantes empleadas en Modulo 4.0 (continuación)36

Tabla 2.6 Propiedades de los depósitos de almacenamiento.....37

Tabla 2.7 Escenarios de operación y simulaciones.....38

Tabla 2.7 Escenarios de operación y simulaciones (continuación).....39

Tabla 2.8 Costos de pozos y tubería de conducción de biogás.....41

Tabla 2.9 Costos de inversión para la planta generadora y conexión a la red eléctrica42

Tabla 2.10 Inversiones y costos adicionales para la Puesta en Marcha42

Tabla 3.1 Categoría poblacional de municipios46

Tabla 3.1 Categoría poblacional de municipios (continuación).....47

Tabla 3.2 Información en materia de RSU47

Tabla 3.2 Información en materia de RSU (continuación)48

Tabla 3.3 Parámetros analizados y su ponderación48

Tabla 3.4 Clúster y ponderación lineal de municipios.....	50
Tabla 3.5 Municipios seleccionados.....	51
Tabla 3.6 Selección del área de estudio.....	51
Tabla 3.7 Composición de RSU para el modelo de generación de residuos	56
Tabla 3.8 Generación de RSU proyectada para dos años	57
Tabla 3.9 Generación de RSU que ingresaría al RESA intermunicipal sustentable	58
Tabla 3.10 Constantes utilizadas en los distintos escenarios de simulación	61
Tabla 3.10 Constantes utilizadas en los distintos escenarios de simulación (continuación)	62
Tabla 3.11 Escenarios de operación y simulaciones para CA y CB	62
Tabla 3.11 Escenarios de operación y simulaciones para CA y CB (continuación)	63
Tabla 3.12 Elementos de un sistema de conducción de biogás de RESA.....	76
Tabla 3.13 Criterios para estimación de potencia de metano	78
Tabla 3.14 Generación de Lixiviado en Modulo 4.0 de CA RP	80
Tabla 3.14 Generación de Lixiviado en Modulo 4.0 de CA RP (continuación)....	81
Tabla 3.15 Dimensionamiento de la Fosa A.....	81
Tabla 3.16 Generación de Lixiviado en Modulo 4.0 de CB RP	82
Tabla 3.17 Dimensionamiento de la Fosa B.....	83
Tabla 3.18 Dimensiones de Fosas A y B.....	84
Tabla 3.19 Costo de Inversión de Excavación de Vasos, pozos de venteo y drenado de lixiviados	88
Tabla 3.20 Costos de Inversión para Sistemas de aprovechamiento de biogás en RESA.....	90

Tabla 3.21 Gastos para recirculación de lixiviados en 2017	91
Tabla 3.22 Costos e ingresos resumidos para RESA con RSU de Clúster 3.....	92
Tabla 3.23 Costos e ingresos resumidos para RESA con RSU de Clúster 3 sin 80% de valorizables	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Generación de RSU por entidad federativa 4

Figura 1.2 Manejo Integral de los RSU 7

Figura 1.3 Método de zanja o trinchera 14

Figura 1.4 Método de área 15

Figura 1.5 Método de terrazas 15

Figura 1.6 Método de rampa 16

Figura 1.7 Método de terraplén 16

Figura 1.8 Método combinado 17

Figura 1.9 Diseño de una celda diaria 21

Figura 2.1 Diagrama de bloques de actividades experimentales 29

Figura 2.2 Calibración de constantes en Modulo 4.0; a) Lixiviado acumulado en RESA X, b) DQO en lixiviados 36

Figura 3.1 Identificación de municipios y SDF 45

Figura 3.2 Dendrograma presentando cuatro Clúster 49

Figura 3.3 Caracterización TCA Tejupilco 53

Figura 3.4 Caracterización TCA Huitzilac 54

Figura 3.5 Caracterización TCA Pilcaya 55

Figura 3.6 Celda tipo A, Modelo morfológico 59

Figura 3.7 Celda tipo B, Modelo morfológico 60

Figura 3.8 Curvas de nivel en fichero .dxf; a) Vaso de CA; b) Vaso de CB 64

Figura 3.9 Llenado de vasos y pozos de inyección de lixiviado; a) Pozos, banco y corona de Ca; b) Pozos, bancos y corona de CB 65

Figura 3.10 Dinámica de CH₄ de la operación SR de la CA 66

Figura 3.11 Dinámica de CH₄ de la operación SR de la CB 68

Figura 3.12 Dinámica de CH ₄ de la operación de RS de CA	69
Figura 3.13 Dinámica de CH ₄ de la operación de RS de CB	70
Figura 3.14 Dinámica de CH ₄ de la operación de RP de CA	71
Figura 3.15 Dinámica de CH ₄ de la operación de RP de CB	72
Figura 3.16 Pozos de CA con radio de influencia	74
Figura 3.17 Pozos de CB con radio de influencia	75
Figura 3.18 Distribución de Pozos de CA.....	77
Figura 3.19 Distribución de Pozos de CB.....	77
Figura 3.20 Recuperación de emisiones de CH ₄ en rangos bajo y medio.....	79
Figura 3.21 a) Fosa A trapezoidal	83
Figura 3.21 a) Fosa B trapezoidal	83
Figura 3.22 Sistema de Conducción de Biogás	85

INTRODUCCIÓN

La generación de residuos sólidos urbanos (RSU) se ha incrementado debido al crecimiento acelerado de la población, al desarrollo industrial, a las modificaciones tecnológicas y a los cambios en los patrones de consumo, razones por las cuales, se ha propiciado una fuerte demanda en el servicio de aseo urbano y el inadecuado manejo de los RSU trae consigo una poderosa fuente de contaminación ambiental y de salud pública (Ríos, 2009; Yáñez, 2010).

En la mayoría de los países en vías de desarrollo, ha prevalecido el manejo de los RSU bajo el esquema de “recolección y disposición final” dejando rezagados el aprovechamiento, reciclaje, tratamiento y la disposición final ambientalmente adecuada (Sáez *et al.*, 2014); en México, se producen sobre 42.923 millones de toneladas de RSU de los cuales el 94.8% es llevado a Sitios de Disposición Final (SDF) y únicamente el 5.2 % se recicla (INEGI, 2017). De estos SDF sólo el 66.4% cumplen con las especificaciones establecidas en la NOM-083-SEMARNAT-2003 y el resto no cuenta con la infraestructura necesaria para subsanar la problemática generada a nivel nacional en cuestiones ambientales y de salud pública. A pesar de que el método de disposición final en nuestro país constituye la alternativa técnica y económica ideal para el manejo de RSU, se encuentra lejos de ser la mejor solución al problema de la gestión de RSU (Bernache, 2006; Villafuerte *et al.*, 2004).

La mayor generación del país corresponde a la zona centro, en donde únicamente 15 municipios del Estado de México (EdoMex) cuentan con Relleno Sanitario (RESA), otros 40 municipios con Rellenos de Tierra Controlado (RTC), 35 con Tiraderos a Cielo Abierto (TCA) y 35 carecen de SDF, mientras que la Ciudad de México (CDMX) dispone los RSU generados en la periferia. Por otro lado, los municipios de entidades federativas aledañas al EdoMex cuentan con los recursos necesarios para la construcción de RESA y a pesar de que existen diversos acuerdos intermunicipales, la generación y volumen de los RSU ha aumentado en los últimos años, de tal forma que los sitios existentes son insuficientes y los RSU son dispuestos generalmente en TCA (GEM, 2017).

De acuerdo con lo anterior el presente trabajo tuvo por objetivo diseñar un RESA intermunicipal sustentable que brindara servicio a municipios colindantes entre el EdoMex y dos entidades federativas aledañas a éste. En la primera parte se presentan los fundamentos donde se muestra la situación actual en materia de RSU en el contexto global y nacional, la Gestión de RSU en México, la intermunicipalidad como un factor determinante en la racionalización de recursos, administración y gestión de servicios, así como las bases de diseño de los RESA, tipos y casos de éxito en México.

En la segunda parte se desarrolla la metodología, la cual se estructura de la siguiente manera; recopilación y procesamiento de información, selección de municipios, caracterización de RSU, diseño del RESA Intermunicipal Sustentable y finalmente la evaluación técnico-económica del proyecto.

El tercer apartado corresponde a los resultados, comprenden la recopilación de la información, el procesamiento y selección de municipios; caracterización de RSU en SDF del área en estudio, el diseño de las celdas para los RSU de los municipios seleccionados y la simulación de éstas mediante uso de Modulo 4.0, así como la evaluación técnico-económica.

Finalmente se presentan las conclusiones, las referencias y los anexos, los cuales contienen información de vital importancia mencionada tanto en la metodología como en los resultados.

1. FUNDAMENTOS

Actualmente la generación mundial de RSU es aproximadamente de 1.3 billones de toneladas (BT) y se espera que se incremente a 2.2 BT por año hasta el 2025, esto representa un aumento significativo en la tasa de generación de RSU “*per cápita*”, de 1.2 a 1.42 kg por día en los siguientes 10 años (Hoorweg & Bhada-Tata, 2012).

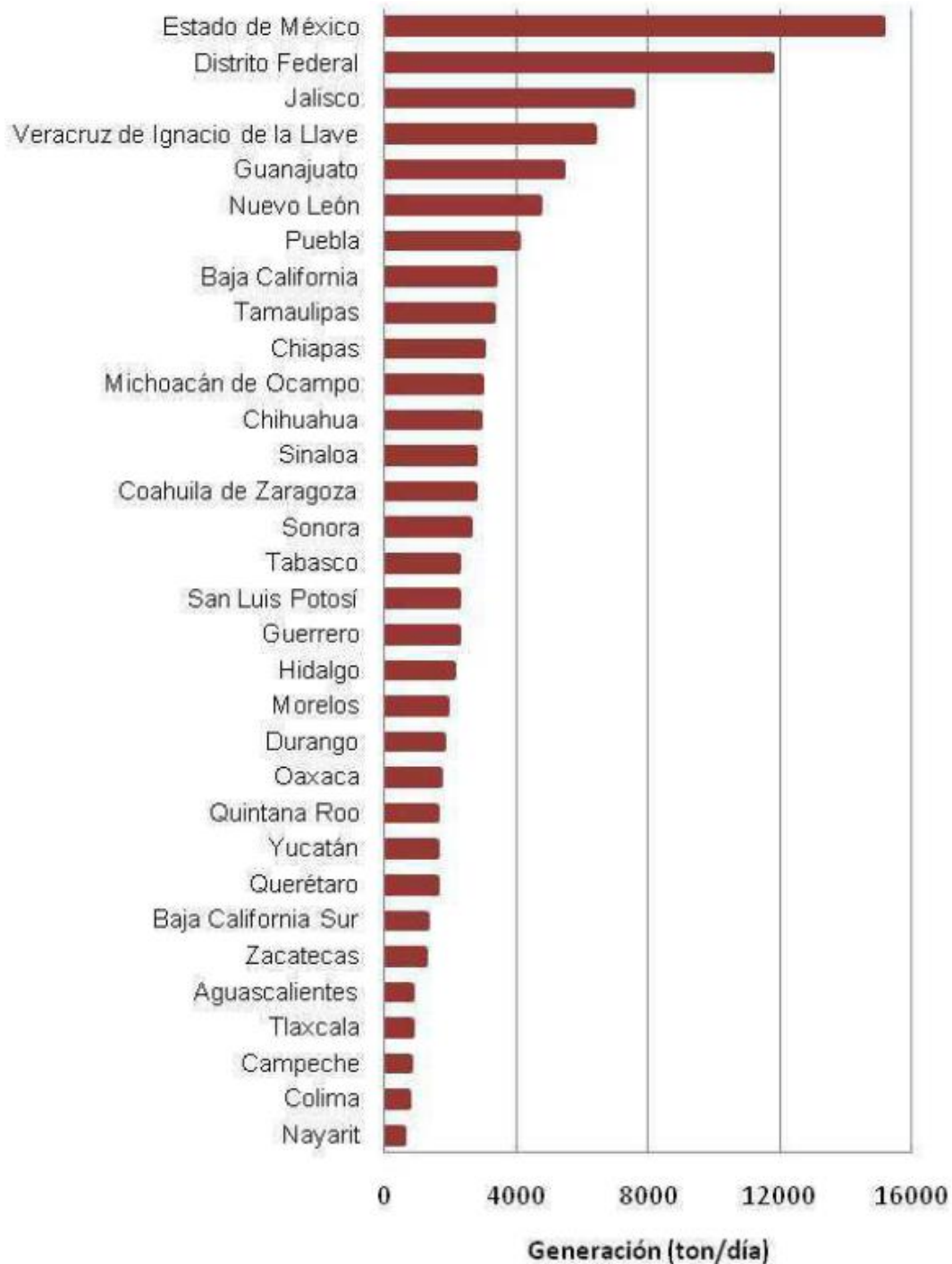
Ante este panorama surge la necesidad de cubrir un rubro de vital importancia para consolidar los esfuerzos aplicados a la implementación de los sistemas de Rellenos Sanitarios (RESA) sustentables, como la capacitación y formación de los recursos humanos que satisfagan la demanda de personal con un perfil mínimo de conocimientos que aseguren el óptimo funcionamiento de los mismos, el aprovechamiento máximo del espacio disponible, la minimización de los posibles efectos negativos hacia el ambiente y la salud de la población, la seguridad de los operadores y el aprovechamiento del biogás como un energético alternativo, para lo cual es necesario implementar una correcta legislación ambiental así como procedimientos que permitan que los RESA sustentables sean competitivos (Yáñez, 2010).

La mayoría de los países Latinoamericanos enfrentan problemas para la gestión de los RSU, lo cual incide en que gran parte se confinen inadecuadamente en Tiraderos a Cielo Abierto (TCA), por lo que se ha optado por implementar Rellenos de Tierra Controlados (RTC) a los países con escasos recursos y de infraestructura para minimizar daños a los ecosistemas, ya que este último método no cumple con las especificaciones necesarias de impermeabilización (Buenrostro & Oakley, 2013).

1.1 GENERACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN MÉXICO

En México de acuerdo al último reporte del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), se produjeron sobre 42.923 millones de toneladas (Mt) de RSU, de los cuales el 66.40% de RSU fueron dispuestas en RESA, el 20.30% en sitios no controlados, 8.10% en rellenos de tierra controlados y finalmente el 5.20% se recicló (INEGI, 2017), mientras que el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático

(INECC) y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) reportaron que el EdoMex, la Ciudad de México y Jalisco generan el 33% de los RSU del país, en tanto que los estados de Campeche, Colima y Nayarit representan el 2% total, cuyos valores se muestran en la figura 1.1.



Fuente: INECC & SEMARNAT, 2012.

Figura 1.1 Generación de RSU por entidad federativa

El EdoMex cuenta con 125 municipios y alrededor de 16.5 millones de habitantes, por lo que enfrenta problemas para la gestión de los RSU, lo cual puede incidir en la disposición final de los mismos en TCA. De acuerdo con censos realizados por el INEGI, Toluca es uno de los municipios en donde el promedio de los RSU recolectados es alto, debido a que alcanza los 600 000 kg/d (INEGI, 2017). Cabe mencionar que las entidades federativas del centro de la república suman el 32 % de la generación nacional de RSU (Tabla 1.1).

Tabla 1.1 Generación de RSU en la zona centro de México

ENTIDAD FEDERATIVA	No. MUNICIPIOS	HABITANTES (millones)	GENERACIÓN DE RSU (ton/d)
Ciudad de México	1	8.9	11700
Estado de México	125	15.2	15000
Guerrero	81	3.4	2300
Hidalgo	84	2.7	2500
Michoacán	113	4.4	3000
Morelos	33	1.8	2000
Puebla	227	5.8	4000
Querétaro	18	1.9	1500
Tlaxcala	60	1.2	500

Fuente: Adaptado de INECC & SEMARNAT, 2012.

1.2 GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

A principios de la década del 70, la creciente preocupación pública respecto del potencial de detrimento/reducción de los recursos naturales y la necesidad de su sustentabilidad, motivó un cambio en la gestión de los RSU. Este nuevo criterio fue direccionado hacia el estudio y análisis de los materiales existentes en los RSU, a fin de establecer aquellos elementos que resultaban susceptibles de un uso beneficioso, fundamentalmente a través de la reutilización y el reciclaje.

Este proceso derivó en la Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos (GIRSU), definitivamente instalada en los años 90's y que se definió como la selección y

aplicación de técnicas, tecnologías y programas de manejo acordes con objetivos y metas específicos de gestión de RSU. Específicamente en el capítulo 21 “Manejo Ecológicamente Racional de los Residuos Sólidos”, la Agenda XXI de la Cumbre de Río de 1992 enuncia los postulados, que luego fueron retomados y enfatizados en la Cumbre de Johannesburgo en 2002 y que pueden sintetizarse en los siguientes puntos (Gaggero & Ordoñez, 2010):

- a) Minimización de la generación
- b) Maximización de la reutilización y el reciclado
- c) Tecnologías de eliminación, tratamiento y disposición final ambientalmente adecuadas, que incluyan recuperación de energía
- d) Ampliación del alcance de los servicios relacionados con los residuos
- e) Tecnologías de producción limpia y consumo sustentable
- f) Investigación, experimentación, desarrollo e innovación tecnológica sobre el reciclado, abono orgánico y recuperación de energía
- g) Educación pública, participación y apoyo de la comunidad en la GIRSU

En México de acuerdo a la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR), la GIRSU es un conjunto articulado e interrelacionado de acciones normativas, operativas, financieras de planeación, administrativas, sociales, educativas, de monitoreo, supervisión y evaluación, para el manejo de RSU, desde su generación hasta la disposición final a fin de lograr beneficios ambientales, la optimización económica de su manejo de su aceptación social, respondiendo a las necesidades y circunstancias de cada localidad o región.

De acuerdo con la ley anteriormente mencionada, en su artículo sexto establece que la GIRSU es una responsabilidad compartida entre los tres órdenes de gobierno; federal, estatal y municipal. Sin embargo, en el décimo artículo delega a los municipios el Manejo Integral de los RSU (MIRSU), siendo ésta la parte técnica de la gestión, la cual tiene que ver con la recolección, barrido, tratamiento y la disposición final de los RSU de acuerdo con la LGPGIR (DOF, 2015).

En otras palabras, la GIRSU es la forma en que los municipios pueden manejar de forma integral sus RSU, obtener beneficios económicos por aprovecharlos, valorarlos, disminuir los daños al ambiente y la salud a través de la participación y educación de la gente y del diseño de reglamentos que permitan un manejo cada vez mejor. En general la GIRSU incluye (SEMARNAT, 2008):

- a) MIRSU
- b) Desarrollo y aplicación de normatividad
- c) Educación y capacitación
- d) Planeación, desarrollo y administración de acciones para aprovechar y valorar los residuos
- e) Construcción de infraestructura como RESA o plantas de tratamiento, entre otros
- f) Monitoreo, supervisión y evaluación de las distintas acciones que se realizan

El manejo tradicional de los RSU es aquél que sólo contempla la recolección, el transporte y la disposición final de los RSU, regularmente es el tipo de manejo establecido en la mayor parte de las localidades del país, sin embargo, el MIRSU incluye otros componentes como separación en la fuente, transferencia, valorización y aprovechamiento de RSU como se muestra en la figura 1.2.



Fuente: SEMARNAT, 2008.

Figura 1.2 Manejo Integral de los RSU

En los siguientes subapartados de la GIRSU se describen los tópicos del MIRSU, por ser los de mayor interés para este trabajo.

1.2.1 Barrido, recolección y transporte

El barrido consiste en la limpieza manual o mecánica de los RSU depositados en la vía pública y tiene 3 propósitos; cuidar la salud humana, cuidar que la basura no dañe los servicios públicos de la localidad como es por ejemplo el alcantarillado y el drenaje, previniendo con ello inundaciones y el tercero consiste en cuidar la imagen de la localidad (SEMARNAT, 2008).

Sin embargo, una de las actividades de mayor importancia, por lo que a costos y disponibilidad de infraestructura corresponde, así como por su contribución a la prevención de la dispersión de los residuos en el ambiente, es la recolección y transporte de los RSU. La recolección en las localidades generalmente va de la mano del transporte y consiste en la colecta de los RSU en las casas, comercios y su transporte a las estaciones de transferencia, plantas de tratamiento o SDF. La recolección es la parte más costosa del manejo de RSU, llega a ser hasta el 70% de lo que se invierte y su costo varía de \$130-\$250 por tonelada de RSU. Para establecer un sistema de recolección se debe decidir (INECC & SEMARNAT, 2012):

- a) El método de recolección
- b) La frecuencia y el horario de recolección
- c) El tipo de vehículos de recolección y su capacidad
- d) El diseño de las rutas

1.2.2 Transferencia

Cuando la generación de RSU es demasiada como en las grandes ciudades o los sitios de disposición final están muy lejos, los costos de transporte pueden ser muy altos. Esto obliga a establecer estaciones de transferencia que acortan las distancias para los vehículos de recolección (SEDESOL, 2012).

- a) De carga directa
- b) De almacenamiento y carga o carga indirecta

c) Mixtas

Los beneficios de las estaciones de transferencia son:

- a) La carga de los vehículos utilizados para llevar los RSU de la planta de transferencia a los sitios de tratamiento o disposición final es siete a diez veces mayor que la de los vehículos de recolección
- b) Menos viajes y mayor capacidad significan menores costos y mayor eficiencia en el servicio
- c) Menos vehículos circulando por las localidades o ciudades

1.2.3 Aprovechamiento de reciclables de residuos sólidos urbanos

De acuerdo con la LGPGIR, la valorización se define como el principio y conjunto de acciones asociadas cuyo objetivo es recuperar el valor remanente o el poder calorífico de los materiales que componen los RSU, mediante su reincorporación en procesos productivos, bajo criterios de responsabilidad compartida, manejo integral y eficiencia ambiental, tecnológica y económica (Aguilar, 2011).

Desde el punto de vista de las acciones requeridas para la instalación de infraestructura ambiental que permita la eficiente valorización de los materiales contenidos en los RSU, es necesario tomar en cuenta variables tales como la existencia de un mercado que cuente con una oferta y demanda de materia prima secundaria, así como que asigne un valor de mercado a la misma con sus correspondientes variabilidades espaciales y temporales. Por otra parte, cobra también gran relevancia la identificación de las condiciones de calidad y cantidad en las que los materiales valorizables son generados en su origen, las cuales se ven influenciadas significativamente por factores de tipo social y cultural (Andrés *et al*, 2012).

El reutilizar y reciclar RSU no puede eliminar la necesidad de disponer en RESA, sin embargo, extiende la vida útil de éstos y retrasa la necesidad de nuevos sitios de disposición final. Además, se ahorran recursos que como se ha observado a través de la historia, cada vez se incrementa la demanda de materias primas de las cuales su agotamiento es inminente.

La reutilización y el reciclaje ya no son opcionales, sino esenciales para abordar los problemas a largo plazo asociados con la gestión de RSU (Bagchi, 2004)

1.2.4 Disposición final

La disposición final se refiere al depósito permanente de los RSU en un sitio y se hace básicamente en sitios que de acuerdo a su funcionamiento e infraestructura se clasifican como TCA, relleno de tierra no controlado (RTNC), RTC y RESA. El TCA es el sitio en el que se depositan los RSU sin ningún control sobre la cantidad, fuente de generación (tipos de residuos) y características de los residuos que se depositan, además carecen de todos los requisitos e infraestructura que establece la NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF, 2004). El RTNC, son sitios con características similares a los TCA, con la diferencia de que los RSU se cubren con tierra. El RTC es el sitio que cumple con las especificaciones de un RESA en lo que se refiere a obras de infraestructura y operación, pero no cumple con las especificaciones de impermeabilización (Buenrostro & Oakley, 2013).

Por otro lado, el RESA es una obra de infraestructura que involucra métodos y obras de ingeniería para la disposición final de los RSU y de manejo especial, con el fin de controlar a través de la compactación e infraestructura adicional, los impactos ambientales (DOF, 2004). Se ha reportado que se ha incrementado el número de RESA en México, pasando de 57 en 2000 a 260 en 2012 (CESOP, 2012).

Los tipos de RESA básicamente se pueden agrupar en RESA tradicional o húmedo, RESA seco o pretratamiento de alta compactación y RESA biorreactor (Sánchez-Gómez, 2006):

- a) RESA tradicional o húmedo, consiste en el depósito de los RSU, dentro de celdas y en capas compactadas, las cuales se cubren con tierra, utilizando maquinaria pesada para la distribución, homogenización y compactación de los RSU. El RESA húmedo debe contar con captación, extracción, tratamiento y monitoreo de biogás y de lixiviados; captación y desvío de aguas pluviales; monitoreo de acuíferos y seguimiento de los asentamientos humanos adyacentes o cercanos al RESA como medidas de control, que deben mantenerse hasta por 25 años.

- b) RESA seco o pretratamiento de alta compactación, el pretratamiento puede contener procesos adicionales como la selección manual y la separación completamente automatizada hasta el encapsulamiento de las pacas con plásticos, los cuales se pueden adaptar a las necesidades locales, a la variación de la cantidad y propiedades de los RSU. Otra forma de reducir el volumen de los RSU es la compactación a alta presión para formar balas o bloques sólidos (alrededor de 1 m³) que pesan de 850 a 950 kg, estas eliminan la necesidad de clasificación en el punto de origen y el apisonamiento en el campo, su principal objetivo es acelerar y facilitar el control de los RESA a través de la reducción del volumen de los RSU por su alta compactación. Permite aumentar la vida útil de un RESA hasta 50%, pero prolonga el tiempo de descomposición de la FO y la reducción de volumen de los RSU implica un 70-75 % menos de cobertura diaria (20 cm de tierra por capa de 5 pacas de altura).
- c) RESA Sustentable: también denominados biorrellenos o RESA biorreactor, son una tecnología muy semejante a la del RESA tradicional, sin embargo, con base a los conocimientos y la problemática ambiental mundial, la concepción del RESA, como una instalación bajo control, ha evolucionado, por lo que ahora se puede operar como un reactor biológico gigante. Se diferencia principalmente por el requerimiento obligatorio de la "recirculación formulada" de lixiviados crudos o previamente inoculados con agentes suplementarios, lo cual permite acelerar el proceso de descomposición, aumentar el tiempo de retención celular y reducir los tiempos de estabilización de los RSU; además cuando los sistemas son aerobios, es necesario inyectar aire a presión al interior de la masa de RSU (Lobo-García *et al.*, 2015).

1.2.5 Producción y aprovechamiento de biogás

El correcto manejo de la Fracción Orgánica (FO) de los RSU se logra a través de diferentes tratamientos que implican un reciclaje de materias orgánicas, transformándolas en productos con valor agregado. El reciclaje de materia orgánica ha recibido un fuerte impulso con el alto costo de los fertilizantes químicos, con la

búsqueda de alternativas no tradicionales de energía, así como también, la necesidad de vías de descontaminación y eliminación de residuos.

La población microbiana juega un importante papel en las transformaciones de estos residuos orgánicos especialmente si se considera que disponen de un amplio rango de respuestas frente a la molécula de oxígeno, componente universal de las células. Esto permite establecer bioprocesos en función de la presencia o ausencia de oxígeno, con el objeto de tratar adecuadamente diversos residuos orgánicos (FAO, 2011).

Aprovechar el poder de la energía del biogás ofrece beneficios ambientales y económicos a los RESA, los usuarios de dicha energía y a la sociedad. En general, los propietarios de los RESA sustentables, los proveedores de servicios energéticos, empresas, agencias estatales, gobiernos locales, comunidades y otros interesados pueden desarrollar proyectos exitosos de energía de biogás que permitan (EPA, 2015):

- a) Reducir las emisiones GEI que contribuyen al cambio climático global
- b) Compensar el uso de recursos no renovables y así ayudar a mejorar la calidad del aire local
- c) Proporcionar ingresos para los RESA sustentables
- d) Reducir los costos de energía para los usuarios de energía de biogás
- e) Crear puestos de trabajo y promover la inversión en las empresas locales

Existen casos de éxito como el del Sistema Metropolitano de Desechos Sólidos en el Estado de Nuevo León, que captura y convierte 1.3 Mt de gases efecto invernadero a 12 MW de energía, que son utilizados para mover el sistema de transporte metro y el alumbrado público del centro de la ciudad. Actualmente, otros rellenos en México como el de Tlalnepantla, Aguascalientes y Nuevo Laredo inician este proceso (GENL, 2015).

1.3 DISEÑO DE RELLENOS SANITARIOS

Al diseñar un RESA, se debe asegurar el cumplimiento de la NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF, 2004), la cual establece la selección del sitio, el diseño, la construcción, la operación, el monitoreo, la clausura y las obras complementarias que deben hacerse en un sitio de disposición final.

El proyecto de planeación de un RESA debe contemplar los siguientes aspectos:

- a) La selección del sitio requiere de información cuidadosa y estudios de las posibles áreas con las que cuenta el (los) municipio (s); tener claridad de las necesidades en función de cuánta cantidad de RSU se produce, esto se relaciona con la vida útil del terreno disponible y los recursos con que se cuenta para la construcción, operación y mecanismos de financiamiento que se aplicarán.

El reconocimiento es vital y no solamente incluye factores técnicos, sino también de factores ambientales, económicos, sociales y políticos, ya que el objetivo es encontrar un sitio donde la disposición final de los RSU pueda realizarse con el mínimos trastorno del ambiente y de la salud pública (Yáñez-García, 2009). En la tabla 1.2 se presentan los estudios que se deben realizar de acuerdo con la categoría del sitio conforme a la NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF, 2004).

Tabla 1.2 Estudios y análisis previos para la construcción y diseño de RESA

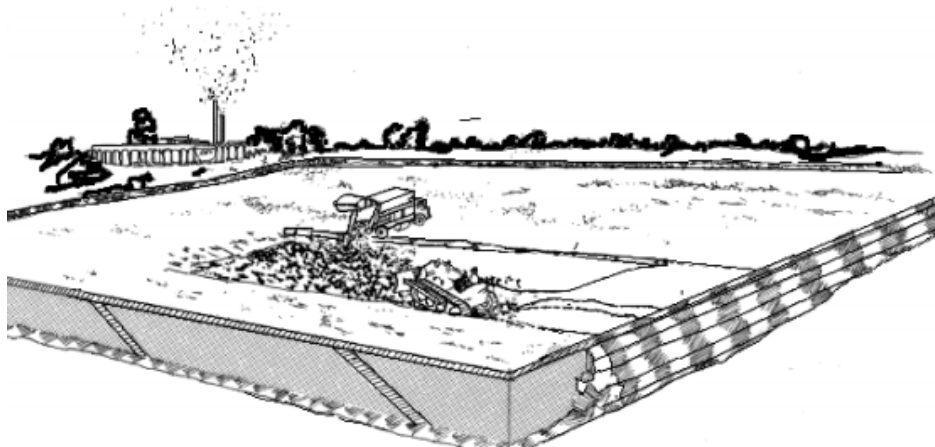
ESTUDIOS Y ANÁLISIS	A	B	C
Geológico y Geohidrológico Regionales	X		
Evaluación Geológica y Geohidrológico	X	X	
Hidrológico	X	X	
Topográfico	X	X	X
Geotécnico	X	X	X
Generación y composición de RSU	X	X	X
Generación de Biogás	X	X	
Generación de Lixiviado	X	X	

Además, los SDF deberán contener las siguientes obras complementarias presentadas en la tabla 1.3.

Tabla 1.3 Obras complementarias

TIPO DE RESA	A	B	C
Caminos de acceso	X	X	X
Caminos interiores	X	X	
Cerca perimetral	X	X	X
Caseta de vigilancia y control de acceso	X	X	X
Báscula	X		
Agua potable, electricidad y drenaje	X	X	
Vestidores y servicios sanitarios	X	X	X
Franja de amortiguamiento (Mínimo 10 m)	X	X	X
Oficinas	X		
Servicio Médico y Seguridad Personal	X		

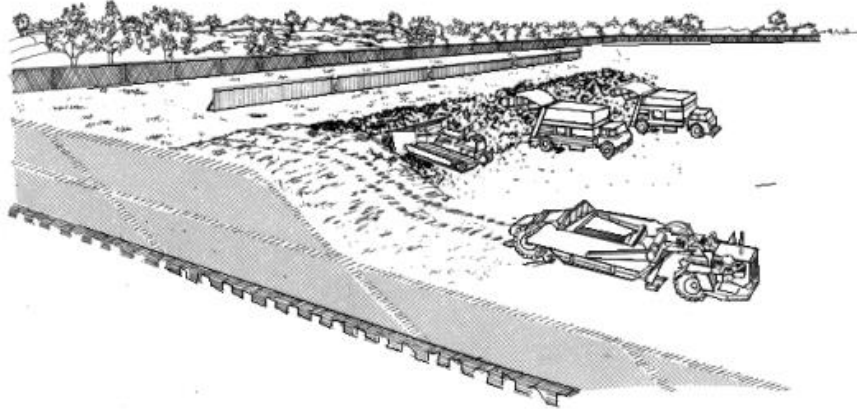
- b) El diseño y método de operación, será en función de la cantidad de residuos que va a recibir y el dinero con que se cuenta. Los métodos empleados para disponer de los RSU dependen del perfil del terreno, el que resulte más conveniente para el desarrollo de las actividades referentes al confinamiento (Tchobanoglous *et al.*, 1994; Yáñez-García, 2009).
- Método de zanja o trinchera, utilizado normalmente en sitios donde el nivel de las aguas freáticas es profundo, las pendientes del terreno son suaves y las trincheras pueden ser excavadas utilizando equipos normales de movimiento. Consiste en depositar los RSU sobre el talud inclinado (3:1 con un ángulo de 18°), donde son esparcidos y compactados con el equipo adecuado, en capas, hasta formar una celda que después será cubierta (Figura 1.3).



Fuente: Tchobanoglous, 1994

Figura 1.3 Método de zanja o trinchera

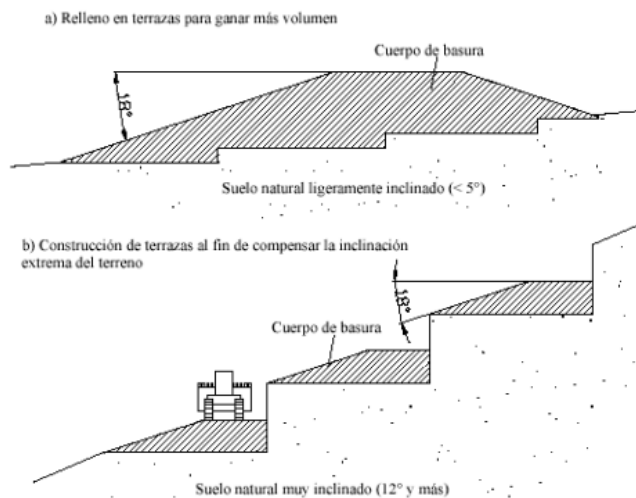
- Método de área, se emplea en cualquier tipo de terreno disponible como canteras abandonadas, inicio de cañadas, terrenos planos, depresiones y ciénegas contaminadas. Consiste en depositar los RSU sobre el talud inclinado, se compactan en capas inclinadas para formar la celda que después se cubre con tierra. Las celdas se construyen inicialmente en un extremo del área a rellenar y se avanza hasta terminar en el otro extremo como se muestra en la figura 1.4.



Fuente: Tchobanoglous, 1994

Figura 1.4 Método de área

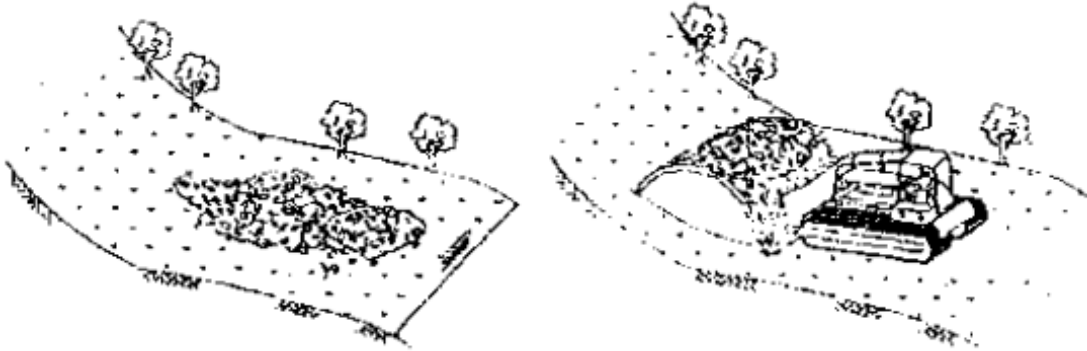
- Método de terrazas, se emplea principalmente cuando los RSU han sido depositados en cañadas o barrancas. Consiste primordialmente en dividir el talud original de los RSU en dos ó más secciones, dependiendo de la altura y longitud del talud, esta división se marca dejando una superficie horizontal, de modo que entre talud y talud existe un ancho de corona (Figura 1.5).



Fuente: Tchobanoglous, 1994

Figura 1.5 Método de terrazas

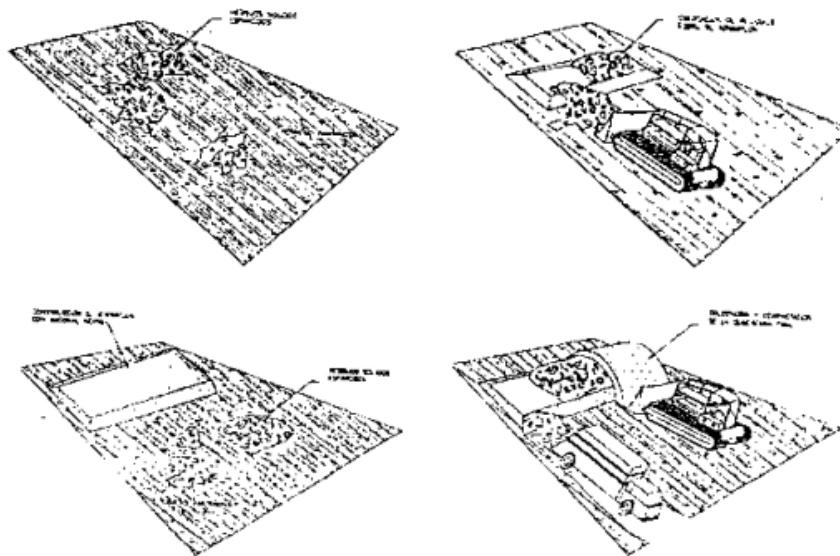
- Método de rampa, es una variación del método de área y se emplea en terrenos ondulados. Consiste en remover, conformar y compactar los RSU sobre el talud del terreno, para posteriormente ser cubierto con material inerte (Figura 1.6).



Fuente: Tchobanoglous, 1994

Figura 1.6 Método de rampa

- Método de terraplén, es empleado en lugares donde el tipo de terreno es pantanoso, por lo que es necesario realizar un terraplén sobre el nivel de terreno, con material seco, donde puedan ser colocados, conformados y cubiertos de RSU como se muestra en la figura 1.7.

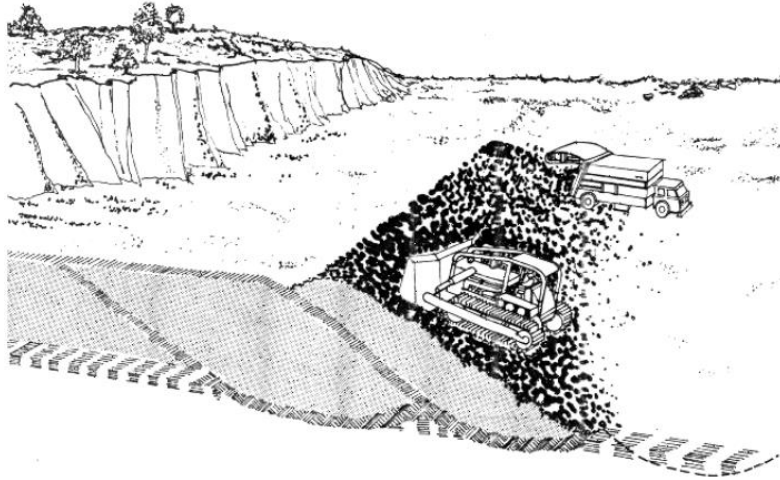


Fuente: Tchobanoglous, 1994

Figura 1.7 Método de terraplén

- Método combinado, en algunos casos cuando la condiciones geohidrológicas, topográficas y físicas del sitio elegido para construir el RESA Sustentable son apropiadas, se pueden combinar los métodos área y trinchera, el cual se considera el más eficiente ya que permiten ahorrar el

transporte del material de cubierta y aumentar la vida útil del sitio. Se recomienda este método cuando se carece de material de cubierta en la zona ya que proporciona mayor volumen y economiza el material de cubierta (Figura 1.8).



Fuente: Tchobanoglous, 1994

Figura 1.8 Método combinado

- c) La preparación del sitio consiste en la limpieza y preparación del suelo (incluida ubicación de la báscula); construcción de los caminos de acceso, de circulación interna, drenaje pluvial, fosas de lixiviados, cerca perimetral, así como caseta de vigilancia.
- d) La construcción, en la construcción se debe poner atención a el manejo de lixiviados y al control de gases, además las actividades de construcción y operación del RESA Sustentables se desarrollarán de manera simultánea, mientras que se excava la parte de la primera celda acondicionada
- e) La ubicación de las rutas de acceso, se consideran parte integral del diseño del RESA que existan vías de acceso necesarias, tanto el ingreso de los vehículos recolectores, como para el tránsito del equipo de construcción desde la entrada del sitio hasta el fondo del mismo.
- f) Clausura, un RESA debe ser cerrado de acuerdo a un procedimiento previsto para asegurar, en el largo plazo, la protección de la salud humana y del ambiente. El objetivo de la clausura es reducir al mínimo los daños al ambiente ocasionados

por la descomposición de los FO de los RSU y los asentamientos que tiene el terreno por el peso de los RSU

1.3.1 Tipos de rellenos sanitarios sustentables

En el RESA sustentable las condiciones de líquido y gas son activamente manejadas para controlar y mejorar los procesos microbianos, para estabilizar los constituyentes orgánicos dentro de los 5 a los 10 años siguientes de su clausura (Foth& Van Dyke, 2004).

La elección de cualquier técnica presentada está sujeta a las condiciones del lugar, la inversión, la operación y la capacitación del personal. Con estos objetivos surgen los distintos tipos de biorrellenos de acuerdo con las condiciones en estudio (Lobo-García *et al.*, 2015; Reinhart *et al.*, 2002):

- a) Anaerobio: consiste en añadir agua al residuo mediante recirculación de los lixiviados, buscando alcanzar los niveles óptimos de humedad para su degradación biológica, ésta ocurre en ausencia de oxígeno y da lugar al biogás, principalmente compuesto de dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4). Este biogás debe ser captado ya que es un gas de efecto invernadero, además tiene un importante potencial energético que puede ser aprovechado en la generación de electricidad o calor durante los años de su producción.
- b) Semiaeróbico: en esta técnica acelera la degradación del residuo en condiciones aeróbicas favoreciendo la aireación natural del relleno a través de las conducciones de recolección de lixiviados.
- c) Aerobio: en la adición de líquido, habitualmente por recirculación de lixiviado, se añade la inyección de aire al interior del vertedero, suministrando así oxígeno para la degradación aeróbica del residuo y es más rápida que la anaeróbica, en esta técnica se deben controlar estrechamente las condiciones de humedad, pues las reacciones exotérmicas pueden provocar incendios por combustión de los residuos.
- b) Híbrido: surge de la combinación de las técnicas de anaerobio y aerobio. Los residuos de las zonas superiores, más recientemente depositados, se airean

intermitentemente para acelerar la degradación de la FO, mientras que se intenta aprovechar también de la formación de biogás en condiciones anaeróbicas en los RSU más enterrados.

1.3.2 Factores de diseño

Las bases para el diseño del RESA Sustentable incluye aspectos como (Yáñez-García, 2009; CFE, 2012; Colomer *et al.*, 2013):

- a) Determinación de la vida útil del RESA Sustentable, el tiempo que estará en operación el sitio para la disposición de RSU está en función del volumen disponible en el sitio seleccionado, del método de operación y del volumen de RSU compactados.
- b) Diseño de la celda diaria, la celda diaria es la conformación de los RSU dispuestos en un día de operación, incluyendo la cobertura con tierra o material inerte que se desee emplear, compactados mecánicamente de 600 a 950 kg/m³ de acuerdo con el método empleado y equipo utilizado.

Para el diseño de la celda se tomará en cuenta, la generación diaria (toneladas, t), peso volumétrico de los RSU compactados, volumen de material de cobertura (m³) y frente de tiro (ancho de la celda, m).

El material de cobertura evita la proliferación de fauna nociva, reduce la generación de olores y evita la dispersión de los RSU, los espesores y tiempos de exposición recomendados son los siguientes:

- Cubierta diaria: 15 cm de espesor mínimo por 7 días
- Cubierta intermedia: 30 cm de espesor mínimo de 7-365 días
- Cubierta final: 60 cm de espesor mínimo, mayor a 365 días

Para efectos de diseño respecto a la altura, puede ser hasta 3 m, incluyendo el espesor de los RSU a disponer y el material de cobertura requerido (DOF, 2004).

El ancho de la celda deberá estar determinado por la longitud necesaria para el funcionamiento adecuado y la ejecución de maniobras del equipo, tanto de

compactación como de transporte. Para poblaciones mayores de 250 000 habitantes, el ancho mínimo se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$F = \sum_{i=1}^n (X_i)^2 \quad (1)$$

Donde:

F =Longitud del frente de tiro (m)

X_i = Ancho de la hora de las máquinas empleadas

Para el volumen de la celda se determina empleando la siguiente ecuación (DOF, 2004):

$$V_c = \frac{D_s}{D} M_c \quad (2)$$

Donde:

V_c =Volumen de la celda diaria (m³)

D_s =Cantidad media de RSU que llegan al RESA Sustentable

D = Densidad de compactación de los RSU

M_c =Factor de material de cobertura (1.2-1.25)

Por otro lado, el largo de la celda se calcula en función de la altura y el ancho de la celda previamente determinados, de acuerdo con la configuración trapezoidal de la celda diaria:

$$L = \frac{V_c}{WA} \quad (3)$$

Donde:

L = Largo de la celda (m)

V_c =Volumen de la celda (m³)

W =Ancho de la celda (m)

A =Altura de la celda (m)

En la figura 1.9 se presenta el diseño de una celda diaria y sus componentes cuyos valores se calculan mediante las ecuaciones anteriores.

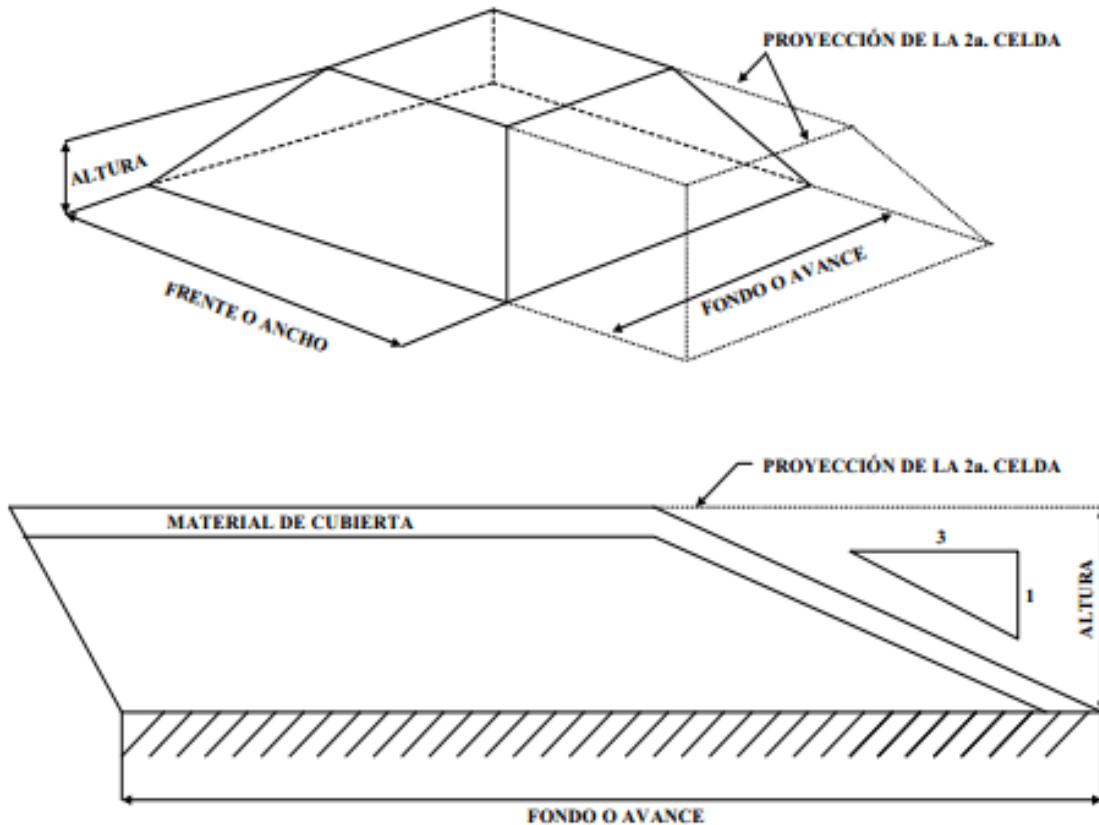


Figura 1.9 Diseño de una celda diaria

1.3.3 Casos de rellenos sanitarios sustentables

El Mecanismo para un Desarrollo Limpio (MDL) es uno de los tres mecanismos establecidos en el Protocolo de Kioto para facilitar la ejecución de proyectos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero por las partes, que son países en vías de desarrollo, en cooperación con países desarrollados. Por un lado, tiene como objetivo ayudar a los países desarrollados, a cumplir con sus metas de limitación y reducción de emisiones de GEI y por el otro ayudar a los países en vías de desarrollo, al logro de un desarrollo sostenible.

El mecanismo permite que las partes no incluidas de beneficien de las actividades de proyectos que tengan por resultado reducciones certificadas de emisiones y que las partes incluidas utilicen las reducciones certificadas de emisiones resultantes de esas actividades de proyectos, para contribuir al cumplimiento de una parte de sus

compromisos cuantificados de limitación y reducción de las emisiones contraídos. Es un mecanismo de mercado, ya que los créditos resultantes de las reducciones de emisiones de gases de efecto invernadero o por la absorción en los sumideros se comercializan y quien los adquiere los contabiliza para el logro de los compromisos de reducción asumidos.

A la fecha, México cuenta con 17 proyectos registrados en el portal del MLD de las Naciones Unidas que comercializan bonos de carbono, tal como se muestra en la tabla 1.4 (CFE, 2012).

Tabla 1.4 Proyectos registrados por México en MDL

Nombre del Proyecto	Localidad	Reducciones de CO ₂ eq por año
Aguascalientes Ecomethane Landfill Gas to Energy Project	Aguascalientes, Ags	162 593
Ecatepec Ecomethane Landfill Gas to Energy Project	Ecatepec, Méx	209353
Hasars Landfill Gas Project	Zapopan, Jal.	137735
Tultilan ecomethane Gas to Energy Project	Tultitlán, Méx	41681
Ciudad Juárez Landfill Gas to Energy Project	Ciudad Juárez, Chih.	170499
Proactiva Merida Landfill Gas to Energy Project	Mérida, Yuc	106340
Durango Ecomethane Gas to Energy Project	Durango, Dgo	83340
Milpillas Landfill gas recovery Project	Temixco, Mor	153 588
Monterrey II LFG to Energy Project	Monterrey, N. L.	225323
Tecamac EcoMethane Landfill Gas to Energy Project	Tecámac, Méx	57196
Verde Valle Landfill Gas Project	Tijuana, B. C.	197259
Landfill Gas Management Project Puerto Vallarta Landfill Site, Mexico	Puerto Vallarta, Jal	52267

Tabla 1.4 Proyectos registrados por México en MDL
(Continuación)

Nombre del Proyecto	Localidad	Reducciones de CO ₂ eq por año
Coyula Landfill Gas Project	Guadalajara, Jal	42746
Culiacán Northern Landfill Gas Project	Culiacán, Sin	42746
Landfill Gas Recovery and Flaring Project in the El Verde Landfill, León	León, Gto	178901
Relleno Norte Landfill Gas Project	Cancún, Q. R.	36878
Monterrey I LFG to Energy Project	Monterrey, N. L.	209273

1.4 DISEÑO Y SIMULACIÓN CON Modulo 4.0

En un SDF intervienen diversos factores tanto ambientales como de diseño, por lo que produce impactos significativos en el Uso de suelo, Generación de contaminantes líquidos, Contaminación atmosférica, Generación de energía, Riesgos ambientales y de Salud pública. Para abordar esta complejidad de procesos que se llevan a cabo en el interior y entorno de los RESA, se utilizan instrumentos para modelizar y simular múltiples escenarios que a través de ellos se obtengan metodologías o criterios para su diseño (Cuartas, 2012).

Modulo 4.0 es un software que ha logrado interrelacionar las distintas variables existentes en los SDF, cuyo propósito general es la simulación de RESA como herramienta para el diseño, diagnóstico y seguimiento (López *et al.*, 2013).

El software se basa en una representación tridimensional del RESA, formada por capas compuestas y celdas que se van activando a lo largo de la simulación según el historial/plan de explotación. Simulando los procesos hidrológicos, de biodegradación y asentamiento a lo largo del tiempo de manera simplificada, permite estimar, diariamente, el estado de humedad y composición del vertedero, caudal y contaminación orgánica de lixiviados, flujos a través del contorno, asientos

El modelo de simulación se crea combinando cuatro submodelos de distinto tipo que el usuario define de manera independiente:

- a) Modelo meteorológico
- b) Modelo de producción de residuos
- c) Modelo de almacenamiento de lixiviados
- d) Modelo morfológico del vertedero

En cada submodelo los datos están agrupados en una o más entidades, lo que permite crear simulaciones de diferentes escenarios combinando entidades y submodelos. Los datos en cada caso se definen a través de las ventanas correspondientes. Para facilitar el manejo de series temporales de datos (series meteorológicas, de lixiviados enviados a planta de tratamiento, de distintas corrientes de residuos) existe la opción de cargarlas directamente desde hojas de cálculo externas al programa (Microsoft Excel) donde pueden editarse si no se desea hacerlo directamente en el programa (López *et al.*, 2013).

1.4.1 Modelo morfológico

Son todos aquellos aspectos referentes a la disposición geométrica del RESA (topografía del área de vertido, situación de cada celda y orden de llenado) y características de la discretización (dimensiones horizontales de las unidades elementales en que se divide el modelo de vertedero, llamadas “celdas”, espesor de las capas, tipología de las celdas, situación de los drenes, celdas sometidas a recirculación y escorrentía superficial).

La operación comprende las siguientes etapas (López *et al.*, 2013):

- a) Definición de los parámetros de discretización, define el tamaño de celdas del RESA, donde entre más pequeñas las celdas mayor proximidad se tiene del modelo del terreno y del orden de llenad/o de los RSU.
- b) Carga del fichero *.dxf*, corresponde al plano original en 3D por las diversas cotas propias del terreno elaboradas y visualizadas en cualquier software de diseño asistido.

- c) Modificación de los datos originales en caso necesario.
- d) Discretización del plano original.
- e) Modificación de la discretización en caso necesario.
- f) Cálculo de las cotas de las celdas del modelo.
- g) Creación del fichero XML, este fichero permite crear un nuevo modelo donde se desarrollan todas las interrelaciones de los escenarios que se deseen estudiar.

1.4.2 Modelo meteorológico

Incluye las series temporales que tienen relevancia en el balance hidrológico, considera las siguientes variables meteorológicas (López *et al.*, 2013):

- a) Humedad relativa media diaria (%)
- b) Temperatura media diaria (°C)
- c) Velocidad media diaria del viento (km/h)
- d) Insolación (h): número de horas diarias de sol
- e) Precipitación horaria (mm): correspondiente a cada una de las horas del día
- f) Precipitación diaria (mm)
- g) Temperatura máxima diaria (°C)
- h) Temperatura mínima diaria (°C)

1.4.3 Modelo hidrológico

Para aplicar los distintos modelos hidrológicos es necesario introducir parámetros en las subcategorías que a continuación se presentan:

- a) Modelo de infiltración superficial. Se define la tasa de infiltración de la capa de cobertura a través de la velocidad de infiltración mínima (mm), velocidad de infiltración máxima (mm) y parámetro de Horton (m^{-1})
- b) Modelo de evapotranspiración. Comprende la profundidad de evaporación (m) y el punto de marchitez (%)

- c) Modelo de escorrentía superficial: consiste en la máxima acumulación superficial (m), es decir, la altura máxima de almacenamiento de agua en superficie antes de que se produzca la escorrentía.
- d) Modelo de flujo preferencial. Se definen parámetros del modelo de flujo a través de canales preferenciales como son, fracción volumen afectado por canales preferenciales (%) y factor de permeabilidad del material en la zona canalizada (adimensional)
- e) Modelo de humedad residual. Contiene los siguientes parámetros: Humedad residual mínima del residuo (%w) e influencia de la presión en la humedad residual del residuo (kg/m^2)

1.4.4 Modelo de biodegradación

Aquí se definen los parámetros necesarios para modelizar la degradación del residuo los cuales son:

- a) Tiempo de activación de la hidrólisis rápida (d)
- b) Tiempo de activación de la hidrólisis lenta (d)
- c) Tiempo de activación de la metanogénesis (d)
- d) Constante de hidrólisis rápida (d^{-1})
- e) Constante de la hidrólisis lenta (d^{-1})
- f) Constante de acetogénesis (d^{-1})
- g) Constante de metanogénesis acetofílica (d^{-1})
- h) Constante de metanogénesis hidrogenofílica (d^{-1})
- i) Fracción de carbono transformada en compuestos intermedios en la hidrólisis (Factor estequiométrico)
- j) Fracción de carbono transformada en acetato en la hidrólisis (Factor estequiométrico)
- k) Fracción de carbono transformada en acetato en la acetogénesis (Factor estequiométrico)

1.4.5 Vertido y operación Tradicional

El modelo morfológico del RESA se construye mediante la colocación sucesiva de celdas que representan los distintos materiales/residuos según el historial de operación que se desee simular. La colocación sucesiva va de la mano con el orden de llenado, ya que el situar una celda con cobertura o no, puede afectar en la simulación durante el periodo que se precise.

1.4.6 Operación con recirculación

Pueden definirse sistemas de recirculación de lixiviados durante la etapa de operación del RESA y en el período de postclausura.

- a) Recirculación durante la operación del RESA. Existen siete tipos de sistemas de recirculación para esta etapa: Prehumectación de RSU, riego en el frente de tiro, riego mediante difusores, lagunas sobre la superficie, inyección mediante conducciones horizontales, inyección mediante pozos verticales y extracción mediante pozos verticales.
- b) Recirculación en la etapa de postclausura. Existen cinco tipos de recirculación de lixiviados para el periodo de postclausura: Riego mediante difusores, lagunas sobre la superficie, inyección mediante conducciones horizontales, inyección mediante pozos verticales y extracción mediante pozos verticales.

1.5 RELACIONES DE INTERMUNICIPALIDAD

Uno de los principales problemas de la GIRSU es el establecimiento de SDF cumplan con los requisitos que contempla la legislación mexicana (Buenrostro-Delgado *et al.*, 2005). En la actualidad el 20.30% de los RSU generados en México se disponen en TCA (INEGI, 2017), resultado de la incapacidad económica de los municipios para operar un RESA propio (O. Buenrostro & Bocco, 2003), dichos sitios significan un grave problema ambiental de alto riesgo que afecta el paisaje, flora y fauna local, cuerpos de agua, así como la presencia latente de focos de contaminación que atentan contra la salud pública (Karak *et al.*, 2013).

En la actualidad es imprescindible la construcción de RESA Sustentables para que además de cumplir con las condiciones de construcción y operación especificados en la NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF, 2004), estén ubicados en puntos en los cuales puedan depositar los RSU el máximo número de localidades, para que de esta manera puedan ser administrados y financiados por dos o más municipios, lo que se denomina asociación municipal o intermunicipalidad. Cabe mencionar que la intermunicipalidad en México se entiende como la unión voluntaria de los ayuntamientos para resolver problemas comunes en materia de servicios públicos y mejorar su función en un territorio coherente y que responde a la necesidad de racionalizar los recursos, las acciones administrativas y la gestión de servicios (RIGLM, 2010). Además, los beneficios económicos, sociales y ambientales aumentan con base a la factibilidad económica y al diseño del RESA Sustentable para la recuperación de CH₄ (CFE, 2012).

El hecho de que pequeñas localidades (menores a 30 000 habitantes) no cuenten con SDF propios, se justifica con la idea de que un tractor (por ejemplo, un tipo oruga) no complete una jornada completa (8 h/d) ya que la cantidad de RSU generada es insuficiente, por lo que los RESA Sustentables son una solución viable para las regiones que presenten estas características y cumplan con las especificaciones establecidas.

Ante esta situación es necesario que los municipios, el sector privado, las instituciones públicas y demás organismos afronten racionalmente la correcta GIRSU, considerando mejorar la educación ambiental, la capacidad técnica y económica para el servicio de colecta de RSU, las implicaciones que acarrea la valorización de RSU y el confinamiento final de los mismos (Jaramillo, 2012).

2. PARTE EXPERIMENTAL

En la figura 2.1 se presentan las actividades que se llevaron a cabo para alcanzar los objetivos planteados.

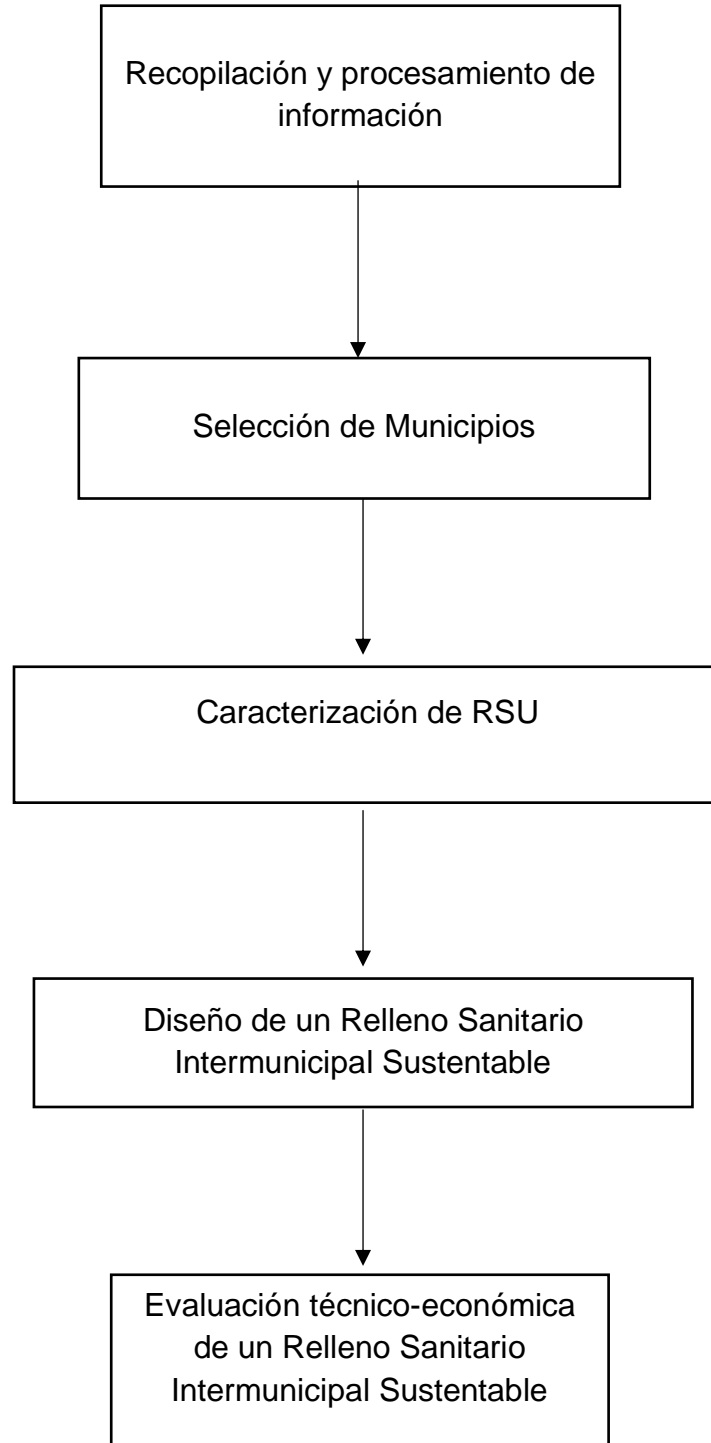


Figura 2.1 Diagrama de bloques de actividades experimentales

2.1 RECOPIACIÓN Y PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN

Estas actividades se realizaron tanto de manera documental (impresa y digital) como con las autoridades municipales y empresarios del área de estudio. Dentro de la información a recabar se tiene número de habitantes, niveles socioeconómicos, gestión de los RSU, localización de TCA y plantas de reciclaje o centros de acopio de materiales revalorizables involucrados.

Se empleó la plataforma Mapa Digital de México, que el INEGI ofrece de manera gratuita (en línea y escritorio) para determinar el área de influencia y trazar ruteo para la correspondiente visita a municipios y TCA.

Se levantó información a través de Cédulas de Encuestas (CE) aplicadas directamente a autoridades involucradas al manejo de RSU de los ayuntamientos correspondientes (Anexo A). Las CE están integradas por información general del municipio, frecuencia de servicio de recolección y barrido, número de trabajadores, rutas de recolección, superficie o longitud de barrido, costos de mantenimiento y equipo, capacitación de personal, número y tipo de SDF, generación de RSU, así como operación del sitio.

Se llevó a cabo la depuración y registro de los datos recabados para seleccionar un lugar para el diseño del RESA Intermunicipal Sustentable.

2.2 SELECCIÓN DE MUNICIPIOS

Se llevó a cabo un proceso de análisis con los parámetros de investigación que se listan en la tabla 2.1, agrupadas con base a los criterios: Población, economía y en materia de RSU.

Se realizó un análisis de correlación en el paquete estadístico IBM® Statistics Versión 24, para determinar los parámetros altamente relacionados (Colineales), descartando aquellas con un valor mayor a 0.7 (Santander & Ruiz, 2004).

Tabla 2.1 Parámetros listados por criterio

POBLACIÓN	ECONÓMICAS	MATERIA DE RSU	
Población Total por Municipio (PTM)	Producto Interno Bruto (PIB)	Recolección de RSU (RRSU)	Cantidad de Rellenos Sanitarios Fuera (CRESAF)
Población total Municipios Colindantes (PTMC)	Ingreso Municipal (IM)	Cantidad de Rellenos Sanitarios Dentro (RESAD)	Cantidad de Sitios de Tierra Controlados Fuera (CSTCF)
Población Total Municipios + Municipios Colindantes (PTM+PTMC)	Unidades Económicas (UE)	Cantidad de Sitios de Tierra Controlados Dentro (CSTCD)	Cantidad de Tiraderos a Cielo Abierto Fuera (CTCAF)
Densidad Poblacional (DP)	Población en Pobreza (% , PP)	Cantidad de Tiraderos a Cielo Abierto Dentro (CTCAD)	Cantidad de Sitios de Disposición Final Fuera (CSDFF)
Proyección Población 2030	Pobreza Extrema (% , PE)	Cantidad de Sitios de Disposición Final Dentro (CSDFD)	Cantidad de Sitios de Disposición Final Totales (CSDFT)

Los datos se describieron mediante: Parámetro descartado, Parámetro correlacionado y su correspondiente Correlación. A los parámetros no descartados se les determinó los datos extremos con un Análisis de Cajas.

Se efectuaron los Análisis de Clúster (Jerárquico y K-medias) para agrupar los municipios con características semejantes y finalmente se aplicó el método de Ponderación Lineal o Puntaje (Score), para seleccionar los municipios representativos. Los puntajes específicos para cada parámetro se obtuvieron consultando a expertos en RSU de la Red Iberoamericana de Gestión y Aprovechamiento de Residuos (REDISA, 2017) y de la Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología Aplicada a Residuos Sólidos Urbanos (SOMMERS, 2017).

2.3 CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Una vez seleccionados los municipios, se llevó a cabo la gestión para la visita a los SDF donde se asignó un área de trabajo para realizar el método de cuarteo descrito en la NMX-AA-015-1985 (DOF, 1985a).

Se localizaron cinco puntos aleatorios en dirección de los puntos cardinales y uno en el centro del sitio, de cada uno se extrajo 20 kg de muestra y se realizaron los estudios correspondientes de composición de subproductos adaptados de la NMX-AA-022-1985 (DOF, 1985b). Para ello se contó el apoyo de personal y autoridades locales.

2.4 DISEÑO DE UN RELLENO INTERMUNICIPAL SUSTENTABLE

Para esta etapa se empleó información de uno de los municipios seleccionados y de aquellos cercanos con los que se podría establecer un RESA Intermunicipal Sustentable. La información se organizó en hojas de cálculo y para el diseño y simulación se utilizó el software Moduelo 4.0 (López *et al.*, 2013).

2.4.1 Dimensionamiento de Celdas

Con la información del número de habitantes, la generación y composición de los RSU, de uno de los municipios seleccionados y aquellos colindantes que pudieran trabajar bajo el esquema de intermunicipalidad, se dimensionó una celda para contener los RSU generados en dos años a una densidad de compactación de 850 kg/m³. Además, considerando la información de dos celdas tipo o base (vasos, bancos y coronas) denominadas celdas A y B (CA y CB) de un RESA del centro del EdoMex, el cual por razones de confidencialidad será llamado RESA X, se estimó su tiempo de vida útil o tiempo en que se completaría su llenado. En la tabla 2.2 se presentan las dimensiones de las CA y CB.

El modelo morfológico para CA y CB fue dividido en “miniceldas” cúbicas (área y altura específica), acomodadas en los periodos en que se realiza el vertido de los RSU, de acuerdo con el funcionamiento de Moduelo 4.0 (Tabla 2.3).

Tabla 2.2 Dimensiones de los modelos morfológicos

CELDA TIPO / DIMENSIONES DE LOS VASOS DE VERTIDO	A (m)	B (m)
^{a)} h Noreste	27	18
h Noroeste	24	10
h Sureste	19	17
h Suroeste	18	18
^{b)} LS Norte	60.36	39.44
LS Sur	70.34	82.82
LS Este	90.13	167.72
LS Oeste	90.13	107.68d
^{c)} LI Norte	50.96	33.69
LI Sur	63.53	76.82
LI Este	81.62	160.47
LI Oeste	82.43	102.88

^{a)} h: Altura, ^{b)} LS: Longitud superior, ^{c)} LI: Longitud inferior

2.3 Características morfológicas de las celdas tipo

CELDA TIPO /CARACTERÍSTICA DE MODELOS MORFOLÓGICOS	A	B
Área de celda (m ²)	4	25
Altura de celda (m)	2	2
Celdas totales	22 477	8 418
Peso Volumétrico (T/m ³)	0.85	0.85
^{a)} Cantidad de RSU (T)	174 727	408 816
^{b)} Volumen (m ³)	179 816	420 900






^{a)} Incluye bancos y corona; ^{b)} Incluye material de cobertura y pozos

Para ambos modelos morfológicos, se asignaron propiedades específicas que corresponden al funcionamiento de las miniceldas en la simulación, las cuales se presentan en la tabla 2.4.

Las miniceldas de disposición corresponden a los RSU contenidos en el vaso, RSU con una capa de material de cobertura que alcanzan el nivel del suelo (llenado del vaso) y, por último, aquellos RSU que se disponen encima de la primera capa de cobertura, es decir, aquellos que forman los bancos y corona; las de recolección corresponden a las miniceldas asignadas a la ubicación de pozos de inyección lixiviado y las de clausura contienen 1.4 m de altura de RSU y 0.60 m de material

final de cobertura (sellado). Cabe mencionar que las miniceldas que corresponden a RSU con cobertura contienen 1.85 m de RSU para la CA y 1.80m para CB, es decir, 0.15m y 0.20m de material de cobertura respectivamente, el cual cubre el vaso de llenado.

2.4 Características de las celdas en los modelos morfológicos

TIPO DE CELDA EN Modulo 4.0	MINICELDA	SÍMBOLO
	RSU sin cobertura	
Celdas de disposición	RSU con cobertura	
	RSU superficiales	
Celdas de recolección	Conducto de Gas	
	Conducto de Lixiviado	
Celdas de clausura de sitio de disposición	Material final de Sellado	

2.4.2 Modelo meteorológico

Corresponde a ocho variables meteorológicas: Humedad relativa media diaria (HR), Temperatura media diaria (TP), velocidad media diaria del viento (VPV), Insolación(I), precipitación horaria (PH), precipitación diaria media (PD), temperatura máxima (TM) y mínima (Tm) (ANEXO B).

Al cargar los datos meteorológicos que corresponden al periodo de 2010 a 2050, Moduelo 4.0 calculó la evaporación, evapotranspiración, cantidad de agua en la superficie de la matriz de RSU correspondiente al periodo de operación y clausura, así como la humedad y generación de lixiviado.

2.4.3 Constantes y calibración

Con los datos proporcionados por el RESA X, se calibraron las constantes de infiltración superficial, evapotranspiración superficial, escorrentía, flujo preferencial, humedad residual y las tasas de degradación. Los valores de las constantes se presentan en la tabla 2.5 los cuales fueron empleados en las diferentes miniceldas que corresponden a los RSU dispuestos y materiales de cobertura.

Tabla 2.5 Constantes empleadas en Moduelo 4.0

CONSTANTE/MINICELDA	SIN COBERTURA	CON COBERTURA	SUPERFICIALES	SELLADO
Infiltración mínima (mm/h)	3.81	3.81	3.81	10
Infiltración máxima (mm/h)	76.2	76.2	76.2	150
Parámetro de Horton (1/h)	4.14	4.14	4.14	4.14
Profundidad de evaporación (m)	0.1	0.1	0.1	0.1
Punto de marchitez (%)	100	100	100	100
Acumulación superficial máxima (m)	0.2	0.05	0.05	0.05
Canales preferenciales (%)	35	35	45	45
Humedad residual mínima (%Hbh)	5	5	5	5
Carga de humedad residual (kg/m ²)	4536	4536	4536	4536

Tabla 2.5 Constantes empleadas en Moduelo 4.0 (continuación)

CONSTANTE/MINICELDA	SIN COBERTURA	CON COBERTURA	SUPERFICIALES	SELLADO
Tasa de hidrólisis rápida (1/d)	0.1	0.1	0.1	0.1
Tasa de hidrólisis lenta (1/d)	0.01	0.01	0.01	0.01
Tasa de acetogénesis (1/d)	0.1	0.1	0.1	0.1
Tasa de metanogénesis acetoclástica (1/d)	0.7	0.7	0.7	0.7
Tasa de metanogénesis hidrogenofílica (1/d)	500	500	500	500

En la figura 2.2 a) se presenta la cantidad de lixiviado acumulado en un periodo de operación de 30 años donde la línea punteada (azul) es la cantidad real y la línea continua (amarillo) corresponde a la cantidad simulada por Moduelo 4.0. La dinámica de lixiviado acumulado simulado presenta una tendencia ascendente y distante, mostrando al año 15 el valor más alejado, sin embargo, el valor acumulado al final del periodo de operación es próximo al real. De igual manera se consideró Demanda Química de Oxígeno (DQO, mg/L) como un parámetro de calibración para la degradación de RSU y su dinámica (línea azul) muestra mayor proximidad durante el periodo de operación que el lixiviado acumulado.

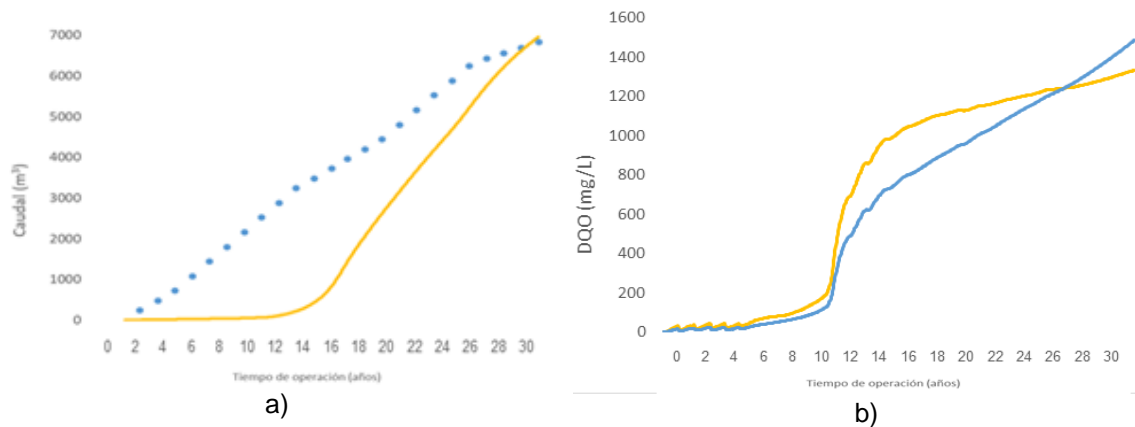


Figura 2.2 Calibración de constantes en Moduelo 4.0; a) Lixiviado acumulado en RESA X, b) DQO en lixiviados

2.4.4 Modelo de generación de residuos sólidos urbanos

En este modelo se emplearon dos tipos de composiciones, una que corresponde al RESA X y en la otra se utilizaron los datos recabados en el SDF del área en estudio, la cual se denominó “Tejupilco”. Además, se generaron simulaciones adicionales considerando la misma composición de RSU correspondiente a cada caso, con la condición de sustraer el 80% de los materiales inorgánicos (Cartón, Goma y Cuero, Metal, Papel, Plástico, Tetrapack, Textil y Vidrio) que son susceptibles a ser valorizados.

Se emplearon en todos los casos el modelo de generación mensual por componentes con un factor de accesibilidad de 0.65 y de arrastre de 0.20, por un periodo de 30 años.

2.4.5 Modelo de almacenamiento de lixiviado

Modulo 4.0 permitió simular depósitos de almacenamiento de lixiviado para su colección, que posteriormente se emplearon en los casos de recirculación Superficial (RS) y en Pozos (RP). En la tabla 2.6 se presentan las características empleadas para todos los casos.

Tabla 2.6 Propiedades de los depósitos de almacenamiento

PARÁMETRO	VALOR
Promedio de velocidad de evaporación	Cálculo automático del simulador
Tasa de sedimentación (1/d)	0.10
Fracción sedimentable (%)	1
Velocidad de degradación a los 10° o más (1/d)	0.10
Coefficiente de Arrhenius	0.10

2.4.6 Estimación de biogás y lixiviados mediante simulación

Una vez obtenidos el modelo morfológico (dimensión y elevación del terreno), el modelo meteorológico, el modelo de almacenamiento, el modelo de generación de RSU y la calibración de las constantes de CA y CB, se llevaron a cabo las simulaciones en un periodo comprendido del 2020 al 2050 (30 años).

Las celdas tipo CA y CB simularon mediante Modulo 4.0 bajo diferentes escenarios, que incluyen la operación tradicional (sin recirculación, SR o tumba seca) y la biodegradación acelerada con recirculación de lixiviados en superficie (RS) y pozos verticales (RP) (Tabla 2.7). Este software simula la interrelación de

procesos hidrológicos, de biodegradación y asentamiento a lo largo del tiempo de manera simplificada, además estima diariamente el contenido de humedad y composición del RESA Sustentable, caudal y contaminación orgánica de lixiviados, flujos a través de contornos y cantidad de biogás generado. Con los resultados de las simulaciones se elaboraron las dinámicas de producción de CH₄ y Contenido de Humedad (%Hbh) para RSU, mientras que para los lixiviados se realizaron dinámicas de DQO, Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) y Nitrógeno Amoniacal (NH₃).

Tabla 2.7 Escenarios de operación y simulaciones

No	SIMULACIÓN	DESCRIPCIÓN
1	CA Sin Recirculación	Composición: RESA X RSU dispuestos (T)=174727
2	CA Sin Recirculación -80% Valorizables	Composición: RESA X RSU dispuestos (T)=174727
3	CA Recirculación Superficial	Composición: RESA X, RSU dispuestos (T)=174727 Lixiviado Recirculado (m ³ /d) = 2
4	CA Recirculación Superficial -80% Valorizables	Composición: RESA X RSU dispuestos (T)=174727 Lixiviado Recirculado (m ³ /d) = 2
5	CA Recirculación en Pozos	Composición: RESA X RSU dispuestos (T)=174727 Lixiviado Recirculado (m ³ /d) = 2
6	CA Recirculación en Pozos -80% Valorizables	Composición: RESA X RSU dispuestos (T)=174727 Lixiviado Recirculado (m ³ /d) = 2
7	CB Sin Recirculación	Composición: RESA X RSU dispuestos (T)=408816
8	CB Sin Recirculación -80% Valorizables	Composición: RESA X RSU dispuestos (T)=408816
9	CB Recirculación Superficial	Composición: RESA X RSU dispuestos (T)=408816 Lixiviado Recirculado (m ³ /d) = 6
10	CB Recirculación Superficial -80% Valorizables	Composición: RESA X RSU dispuestos (T)=408816 Lixiviado Recirculado (m ³ /d) = 6
11	CB Recirculación en Pozos	Composición: RESA X RSU dispuestos (T)=408816 Lixiviado Recirculado (m ³ /d) = 6

Tabla 2.7 Escenarios de operación y simulaciones (continuación)

No	SIMULACIÓN	DESCRIPCIÓN
12	CB Recirculación en Pozos -80% Valorizables	Composición: RESA X RSU dispuestos (T)=408816 Lixiviado Recirculado (m ³ /d) = 6
13	TCA Sin Recirculación	Composición: Tejupilco RSU dispuestos (T)=174727
14	TCA Sin Recirculación -80% Valorizables	Composición: Tejupilco RSU dispuestos (T)=174727
15	TCA Recirculación Superficial	Composición: Tejupilco RSU dispuestos (T)=174727 Lixiviado Recirculado (m ³ /d) = 2
16	TCA Recirculación Superficial -80% Valorizables	Composición: Tejupilco RSU dispuestos (T)=174727 Lixiviado Recirculado (m ³ /d) = 2
17	TCA Recirculación en Pozos	Composición: Tejupilco RSU dispuestos (T)=174727 Lixiviado Recirculado (m ³ /d) = 2
18	TCA Recirculación en Pozos -80% Valorizables	Composición: Tejupilco RSU dispuestos (T)=174727 Lixiviado Recirculado (m ³ /d) = 2
19	TCB Sin Recirculación	Composición: Tejupilco RSU dispuestos (T) = 408816
20	TCB Sin Recirculación -80% Valorizables	Composición: Tejupilco RSU dispuestos (T) = 408816
21	TCB Recirculación Superficial	Composición: Tejupilco RSU dispuestos (T)= 408816 Lixiviado Recirculado (m ³ /d) = 6
22	TCB Recirculación Superficial -80% Valorizables	Composición: Tejupilco RSU dispuestos (T)= 408816 Lixiviado Recirculado (m ³ /d) = 6
23	TCB Recirculación en Pozos	Composición: Tejupilco RSU dispuestos (T)= 408816 Lixiviado Recirculado (m ³ /d) = 6
24	TCB Recirculación en Pozos -80% Valorizables	Composición: Tejupilco RSU dispuestos (T)= 408816 Lixiviado Recirculado (m ³ /d) = 6

2.4.7 Dimensionamiento de sistemas de aprovechamiento de biogás

De acuerdo con los flujos de lixiviado y biogás generados bajo los diferentes escenarios de recirculación RS y RP, se eligieron para las Celdas A y B aquellos que presentaron las mayores generaciones de Ch_4 con la composición de los municipios seleccionados (denominada Tejupilco), dimensionándose el equipo requerido para la recirculación de lixiviados, así como el equipo necesario para la extracción, conducción y conversión del biogás en energía eléctrica.

Para el aprovechamiento de biogás son necesarios entre otros, equipos para la captación (cabezas de pozos), conducción (tubería), succión (bombas succionadoras), limpieza (condensadores, purificadores, filtros), quemado de excedentes (quemadores de piso o elevado) y dosificación de biogás (eliminadores de humedad). El dimensionamiento de estos equipos se llevó a cabo considerando la regla de seis décimos (Jiménez, 2003) y el Estudio de Factibilidad para el Aprovechamiento del Metano en el Relleno Sanitario Municipal de Saltillo, Coahuila (INCREMI, 2013).

2.5 EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE UN RELLENO INTERMUNICIPAL SUSTENTABLE

La evaluación técnico-económica tuvo por objetivo identificar las ventajas y desventajas asociadas a la inversión, mediante la propuesta de diseño, construcción y operación para el RESA Intermunicipal Sustentable bajo los mejores escenarios.

2.5.1 Selección del sistema de aprovechamiento de biogás

Para las Celdas A y B bajo los escenarios que presentaron las mayores generaciones de biogás, se eligieron los equipos requeridos para su aprovechamiento, considerando los sugeridos en los trabajos de ICREMI, (2013) y de SAGARPA & FIRCO (2007), para una operación de 24 horas los 365 días al año.

2.5.2 Análisis económico del sistema de aprovechamiento de biogás

El análisis económico involucra la estimación de los costos de inversión y operación, por lo que es de suma importancia poder calcular con la mayor exactitud posible el costo de cada proyecto.

a) Para este trabajo se tomaron como base los datos de experiencias semejantes, utilizándose la herramienta que se conoce como Estimación Análoga (Top Down), la cual es menos costosa, requiere menos tiempo que otras técnicas (SEPA, 2004; Ulrich, 1992) y aunque es menos precisa, esto se resuelve cuando se utiliza información de proyectos con similares tecnologías (Sullivan *et al.*, 2004).

En la tabla 2.8 se presentan los costos estimados del sistema de captación y conducción de biogás, así como los quemadores e instalaciones requeridas; en la tabla 2.9 se muestran los costos de inversión para la planta generadora y la conexión a la red eléctrica; mientras que en la tabla 2.10 se listan los costos adicionales para la Puesta en Marcha del proyecto realizado para el RESA de Saltillo, Coahuila (INCREMI, 2013); los cuales fueron utilizados.

También se consideraron los costos de inversión reportados por SAGARPA & FIRCO (2007) para un Motogenerador de 60kW de energía eléctrica que opera con biogás, los cuales incluyendo su instalación fueron de \$244, 500.00 (Doscientos cuarenta y cuatro mil quinientos pesos 00/100 MN) en 2007.

Tabla 2.8 Costos de pozos y tubería de conducción de biogás

CONCEPTO	COSTO
Construcción de 35 pozos de extracción	\$ 3,003,000
Red de conducción de Biogás de polietileno de alta densidad (1,800 m de tubería de 4" y 1,200 m de 8")	\$ 614,348
Dos sopladores con capacidad de 2100 SCFM	\$ 672,795
Dos quemadores	\$ 963,679
Cuarto de control, sala de capacitación y oficinas administrativas	\$ 385,000
Costo total estimado	\$ 5,638,822

“, pulgadas; SCFM, Pies cúbicos por minuto (siglas en inglés cubic feet per minute)
Fuente: SCS Engineers, 2013.

Tabla 2.9 Costos de inversión para la planta generadora y conexión a la red eléctrica

CONCEPTO	COSTO
Equipo de generación (2 motogeneradores de 1.06 MW)	\$14, 245, 200
Subestación transformadora de potencia (MVA)	\$ 2,120,000
Sistema de tierras físicas	\$ 495,000
Interconexión eléctrica con CFE	\$ 1,980,000
TOTAL	\$ 18,840,20

Fuente: SCS Engineers, 2013.

Tabla 2.10 Inversiones y costos adicionales para la Puesta en Marcha

CONCEPTO	COSTO
Adecuación del terreno	\$ 2, 935, 858.76
Equipo de monitoreo y verificación	\$ 550,000
Proyecto ejecutivo	\$ 1,000,000
Supervisión	\$300,000
Manuales y PDD	\$749,000
Contingencias	\$1,540,689
TOTAL	\$7,075,547.76

Fuente: SCS Engineers, 2013.

b) Determinación de costos de operación. Obtenidos los costos de inversión y tomando como base los estudios en Saltillo (INCREMI, 2013), se estimaron los costos de operación anuales. Los gastos de operación y mantenimiento (O/M) del sistema de recolección de biogás y de expansión del sistema se incrementaron a una tasa anual del 2 % como lo recomienda SCS Engineers (2013). Esos costos incluyeron aquéllos asociados a la O/M del sistema de recolección existente, tales como mano de obra, repuestos y equipos de pruebas, mantenimiento de rutina y reparaciones del sistema y reemplazo limitado de los pozos y las tuberías existentes. También se consideraron los costos anuales vinculados con el proceso para obtener reducciones de emisiones, incluyendo los del monitoreo, verificación e inscripción de tales reducciones.

Se tomó en consideración el precio por tonelada de reducciones de emisiones de CO_{2e} a \$20 USD, para calcular los ingresos de ambas tecnologías, tomando el precio de los certificados de reducción de emisiones (CER) de enero de 2013 (INECC, 2012).

2. PARTE EXPERIMENTAL

c) Análisis de sensibilidad. Para obtener la viabilidad económica del proyecto, con las ecuaciones 2.1 a 2.3 se realizaron las estimaciones respectivas de: Retorno de Inversión (RI), Valor Presente Neto (VPN), Rango Costo Beneficio (RCB) (SAGARPA & FIRCO, 2007).

$$RI = \frac{\textit{Utilidad Neta o Ganacia}}{\textit{Inversión}} \cdot 100 \quad (\text{Ec. 2.1})$$

$$VPN = \frac{\textit{Flujo de Efectivo}}{(1+\textit{Tasas de Interés})^{\textit{Periodo}}} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

$$RCB = \frac{\textit{Ingresos}}{\textit{Egresos}} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

3. RESULTADOS

En esta sección se presenta los resultados obtenidos conforme a la metodología descrita en el anterior apartado; comprende la recopilación de la información, el procesamiento y selección de municipios, caracterización de RSU en SDF del área en estudio, el dimensionamiento de las celdas para los RSU de los municipios seleccionados y la simulación de éstas mediante uso de Modulo 4.0, así como la evaluación técnico-económica.

3.1 RECOPIACIÓN Y PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN

Se delimitó el área de estudio de la zona sur del EdoMex y los estados colindantes de Guerrero y Morelos; se logró la capacitación de Mapa Digital de México en línea y escritorio, por el personal del INEGI. Como fuentes de información se recurrió a los Bandos municipales, reportes oficiales entrevistas telefónicas con los encargados del manejo de los RSU de los municipios y la visita al SDF del área seleccionada.

El EdoMex a nivel nacional ocupa el primer lugar en generación de RSU, con un promedio de 15 768 toneladas diarias de RSU, en la actualidad existen 15 RESA; en donde disponen 65 municipios, 35 TCA donde disponen 39 municipios y 21 municipios con SDF intermunicipales o desconocidos, que corresponde el 11.83% de la generación (INEGI, 2017).

En la periferia del EdoMex principalmente en la parte sur y en los estados aledaños (Guerrero y Morelos), se identificaron alrededor de 16 SDF para los 24 municipios ubicados en esta zona, se tiene registro que son TCA, lo cual puede atribuirse a la distribución de la población y a que la mayoría son pequeñas poblaciones.

Se recabó información a través de la plataforma Mapa Digital de México donde se muestran los SDF en el EdoMex, así como en la periferia; en la figura 3.1 se puede apreciar que se encuentran en menor cantidad al sur y donde colinda con los estados de Guerrero y Morelos. Se aprecia en la anterior figura la zona de estudio en colores más claros que el resto de los municipios y con puntos rojos, los SDF.

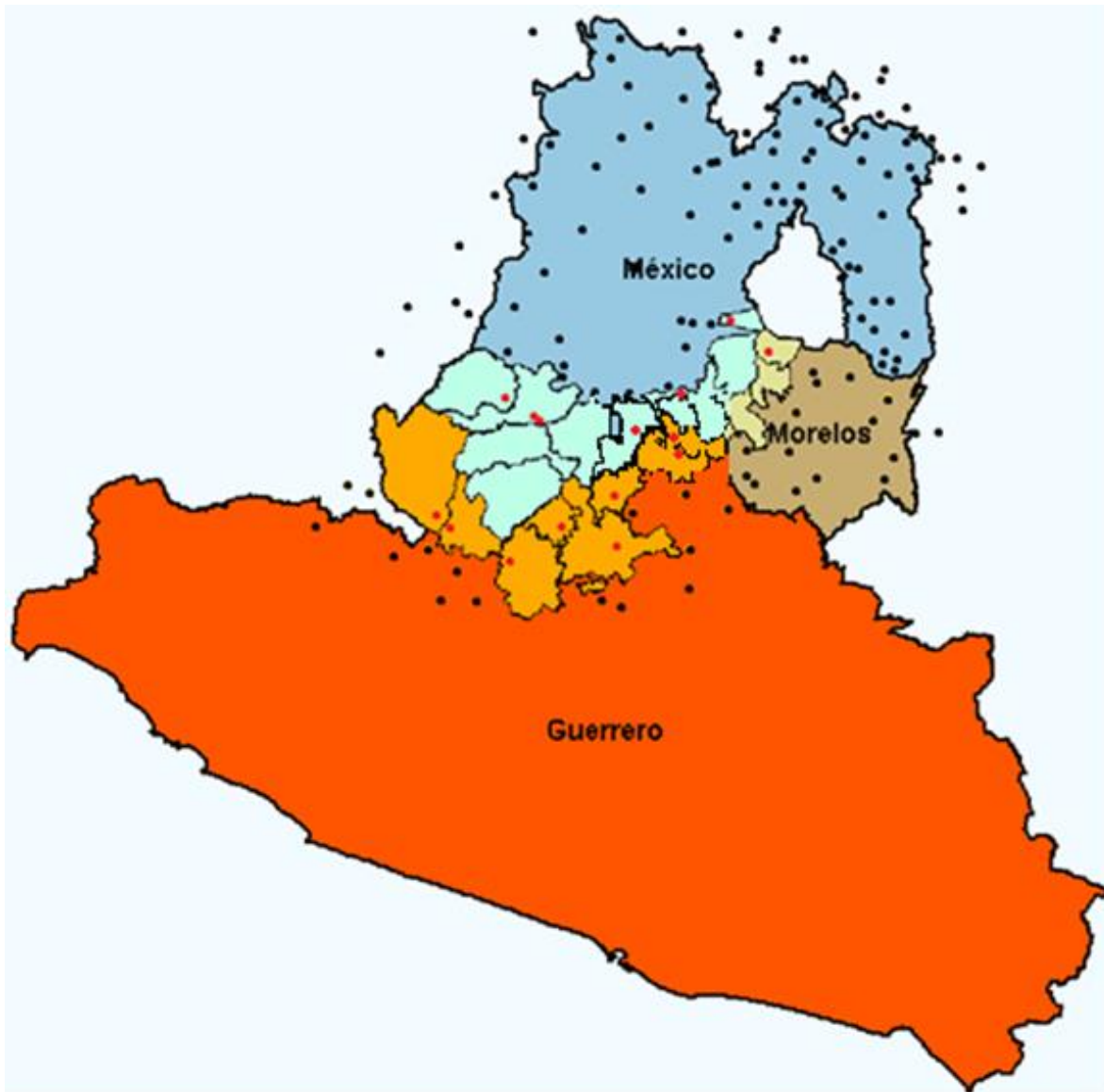


Figura 3.1 Identificación de municipios y SDF

En esta zona la mayoría de municipios de sur del EdoMex y los colindantes de Guerrero y Morelos cuentan con un número reducido de habitantes, cuyas características en materia poblacional se presentan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Categoría poblacional de municipios

CLAVE DE MUNICIPIO	MUNICIPIO	POBLACIÓN TOTAL	DENSIDAD DE POBLACIÓN (hab/Km ²)	GRADO DE MARGINACIÓN	ACTIVIDADES ECONÓMICAS PREDOMINANTES	
15123	Luvianos	27 781	39.42	Alto	Agricultura, ganadería, aprovechamiento forestal, pesca y caza	
15082	Tejupilco	71 077	105.88	Medio		
15008	Amatepec	26 334	41.15	Alto		
15105	Tlatlaya	32 997	41.76	Alto		
15080	Sultepec	25 809	45.61	Muy Alto		
15117	Zacualpan	15 121	53.51	Muy Alto		
15040	Ixtapan de la Sal	33 541	11.232	Medio		
15107	Tonatico	12 099	91.742	Muy Bajo		
15119	Zumpahuacán	16 365	81.21	Alto		
15052	Malinalco	25 624	124.48	Medio		
15063	Ocuilan	31 803	100.48	Medio		
15043	Xalatlaco	26865	229.45	Medio		Servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas
17009	Huitzilac	17 340	91.42	Bajo		Agricultura, ganadería, aprovechamiento forestal, pesca y caza
17007	Cuernavaca	365 168	1823.19	Muy Bajo	Comercio al por menor Otros servicios excepto a actividades de gobierno	
17015	Miacatlán	24 990	115.63	Medio	Agricultura, ganadería, aprovechamiento forestal, pesca y caza	
17005	Coatlán del Río	9 471	113.21	Medio		
12027	Cutzamala de Pinzón	21 388	15.96	Muy alto		
12064	Tlalchapa	11 495	24.28	Alto		
12007	Arcelia	32 181	42.54	Medio		
12031	General Canuto A. Neri	6301	24.15	Muy alto		
12058	Teloloapan	53 769	53.1	Alto		

Tabla 3.1 Categoría poblacional de municipios (continuación)

CLAVE DE MUNICIPIO	MUNICIPIO	POBLACIÓN TOTAL	DENSIDAD DE POBLACIÓN (hab/Km ²)	GRADO DE MARGINACIÓN	ACTIVIDADES ECONÓMICAS PREDOMINANTES
12047	Pedro Ascencio Alquisiras	6 978	23.64	Muy Alto	Agricultura, ganadería, aprovechamiento forestal, pesca y caza
12060	Tetipac	13 128	60.09	Alto	
12049	Pilcaya	11 558	71	Medio	

En la tabla 3.2 se presenta información en materia de RSU para los 24 municipios del área de estudio, el número de SDF y tipo, si se cuenta con Bando Municipal, Plan de Manejo de Gestión de RSU, Centros de Acopio Formales, Reglamentos en Materia de RSU. Se obtuvo el 25% de los municipios cuenta con Bando Municipal, donde se establece las condiciones del manejo de los RSU, sin embargo, estos municipios no lo realizan de manera adecuada, lo cual indica la necesidad de establecer reglamentos y llevar a cabo los programas municipales de gestión de RSU.

Tabla 3.2 Información en materia de RSU

Clave de Municipio	Municipio	Bando Municipal	PMGIRSU	Centros de Acopio	Reglamento RSU	SDF y tipo
15123	Luvianos	Si	No	-	No	1, TCA
15082	Tejupilco	No	No	-	No	1, TCA
15008	Amatepec	Si	No	-	No	1, TCA
15105	Tlatlaya	No	No	-	No	-
15080	Sultepec	No	No	-	No	-
15117	Zacualpan	No	No	-	No	1, TCA
15040	Ixtapan de la Sal	No	No	-	No	1, TCA
15107	Tonatico	No	No	-	No	-
15119	Zumpahuacán	No	No	-	No	-
15052	Malinalco	No	No	2	No	-
15063	Ocuilan	No	No	-	No	-
15043	Xalatlaco	Si	No	10	No	1, TCA

Tabla 3.2 Información en materia de RSU (continuación)

Clave de Municipio	Municipio	Bando Municipal	PMGIRSU	Centros de Acopio	Reglamento RSU	SDF y tipo
17009	Huitzilac	Si	No	40	No	-
17007	Cuernavaca	No	No	41	No	-
17015	Miacatlán	Si	No	40	No	-
17005	Coatlán del Río	No	No	40	No	-
12027	Cutzamala de Pinzón	No	No	-	No	1, TCA
12064	Tlalchapa	No	No	-	No	1, TCA
12007	Arcelia	No	No	-	No	1, TCA
12031	General Canuto A. Neri	No	No	-	No	1, TCA
12058	Teloloapan	No	No	-	No	1, TCA
12047	Pedro Ascencio Alquisiras	Si	No	-	No	1, TCA
12060	Tetipac	No	No	-	No	1, TCA
12049	Pilcaya	No	No	1	No	1, TCA

3.2 MUNICIPIOS SELECCIONADOS

De acuerdo con el análisis de correlación (Anexo C) se descartaron los parámetros altamente relacionados. En la Tabla 3.3 se presentan los parámetros analizados con la correspondiente ponderación lineal asignada por expertos en RSU consultados para la ponderación.

Tabla 3.3 Parámetros analizados y su ponderación

No	INTERVALO DE CADA PARÁMETRO	PONDERACIÓN	No	INTERVALO DE CADA PARÁMETRO	PONDERACIÓN
1	5780≤PTM<14906	6	10	0≤CRESAF<1	4
2	14906≤PTM≤29872	7	11	1≤CRESAF≤6	5
3	29872<PTM≤366321	8	12	0≤CSTCD<1	4
4	34937≤PTM+PTMC<100795	6	13	CSTCD≤1	7
5	100795≤PTM+PTMC≤234182	7	14	0≤CSTCF<1	4
6	234182<PTM+PTMC≤1173659	8	15	CSTCF≤1	7
7	26.5≤PP<65463	5	16	1≤CTCAF<4	7
8	65.463≤PP≤73.352	6	17	4≤CTCAF≤6	8
9	73.352<PP≤84.4	7	18	6≤CTCAF≤10	9

3. RESULTADOS

Mediante el análisis de cajas se determinó que Cuernavaca es un municipio con valores extremos, se identificaron 4 conglomerados con el Análisis Clúster, quedando aislado dicho municipio. En la figura 3.2 se aprecia el clúster 1 de color azul, el 2 de color rojo, el 3 de color verde y el 4 de color morado.

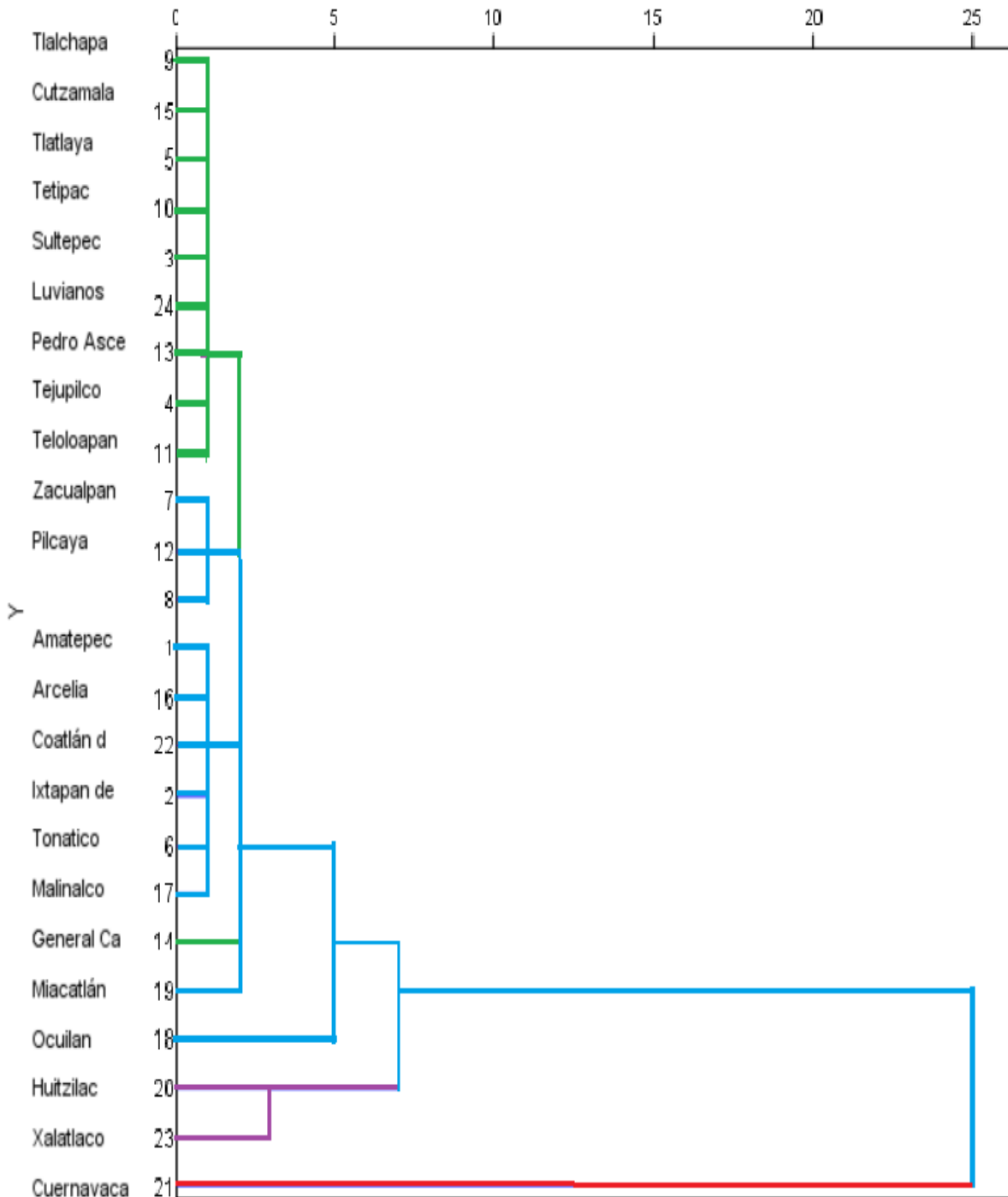


Figura 3.2 Dendrograma presentando cuatro Clúster

Posteriormente con el método de Ponderación lineal se determinaron los municipios con mayor puntaje de acuerdo con los criterios en estudio, se listan en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Clúster y ponderación lineal de municipios

Estado	MUNICIPIO	PTM	PTM+PTMC	PPOBREZA	RESAF	STCD	STCF	TCAF	CLÚSTER	SCORE
EdoMex	Amatepec	26610	194038	66.9	0	0	0	3	1	121
EdoMex	Ixtapan de la Sal	35552	337574	59.6	0	0	1	4	1	121
EdoMex	Tonatico	12324	134504	55.4	1	0	1	4	1	119
EdoMex	Zacualpan	14958	148769	73.1	1	0	1	4	1	114
EdoMex	Zumpahuacán	16927	267873	84.1	2	0	1	4	1	111
Guerrero	Pilcaya	12900	79761	73.3	1	0	1	6	1	111
Guerrero	Arcelia	31306	201746	61	0	0	0	4	1	110
EdoMex	Malinalco	27482	227123	66	1	0	1	1	1	107
EdoMex	Ocuilan	34485	601695	66.2	3	0	2	3	1	107
Morelos	Miacatlán	26713	699585	69	1	0	1	5	1	105
Morelos	Coatlán del Río	9768	88662	58.5	1	0	0	3	1	98
Morelos	Cuernavaca	36632 1	757799	26.5	6	1	2	10	2	140
EdoMex	Sultepec	26832	180251	83.2	0	0	0	8	3	120
EdoMex	Tejupilco	77799	196097	70.1	1	0	0	7	3	120
EdoMex	Tlatlaya	34937	61547	73.6	0	0	0	6	3	120
Guerrero	Tlalchapa	12404	61547	67.1	0	0	0	6	3	120
Guerrero	Tetipac	14658	44209	73.7	1	0	0	5	3	115
Guerrero	Teloloapan	57377	103337	72.8	0	0	0	9	3	114
Guerrero	Pedro Ascencio Alquisiras	6883	41790	79.5	0	0	0	7	3	112
Guerrero	General Canuto A. Neri	5780	34937	84.4	0	0	0	3	3	109
Guerrero	Cutzamala de Pinzón	19746	132269	68.5	0	0	0	6	3	106
EdoMex	Luvianos	27860	162528	81.9	0	0	0	7	3	104
Morelos	Huitzilac	19231	1173659	50.6	1	1	1	4	4	123
EdoMex	Xalatlaco	29572	777358	62.9	3	1	0	2	4	123

De acuerdo con el análisis anterior se seleccionó un municipio representativo de cada uno de los conglomerados 1, 3 y 4 (Color rojo, tabla 3.4). Cabe mencionar que además de un alto puntaje, también se consideró la disponibilidad mostrada por los responsables del MIRSU de cada municipio, de manera que se tuvieron que descartar aquellos municipios con alto puntaje, pero poca disponibilidad, accesibilidad o apoyo. Los municipios seleccionados representativos de cada Clúster se listan en la tabla 3.5 y cuentan con SDF.

Tabla 3.5 Municipios seleccionados

Estado	MUNICIPIO	PTM	PTM+PTMC	PPOBREZA	RESAF	STCD	STCF	TCAF	CLÚSTER	SCOORE
Guerrero	Pilcaya	12900	79761	73.3	1	0	1	6	1	111
EdoMex	Tejupilco	77799	196097	70.1	1	0	0	7	3	120
Morelos	Huitzilac	19231	1173659	50.6	1	1	1	4	4	123

Se elaboraron las proyecciones correspondientes a los municipios seleccionados de cada clúster y a los municipios que colindan con éstos. En el Anexo D se puede apreciar desglosada la generación anual de RSU durante un periodo de 30 años y en la tabla 3.6 se muestra la generación acumulada al último año.

Tabla 3.6 Selección del área en estudio

CLÚSTER	ESTADO	MUNICIPIO	GENERACIÓN DE RSU PERIODO DE 30 AÑOS (T)
1	Guerrero	Pilcaya	109 784.66
	Guerrero	Tetipac	123 925.79
	EdoMex	Ixtapan de la Sal	1 168 530.07
	EdoMex	Tonatico	318 227.56
	EdoMex	Zacualpan	437 777.91
	EdoMex	Zumpahuacán	480 975.17
3	EdoMex	Tejupilco	3 956 437
	EdoMex	Amatepec	676 867.97
	EdoMex	Sultepec	1 011 416.05
	EdoMex	Luvianos	870 896.98
	Guerrero	Cutzamala de Pinzón	256 032.08
4	Morelos	Huitzilac	327 546.39
	EdoMex	Xalatlaco	615 100.74
	EdoMex	Ocuilan	668 673.18

Para el dimensionamiento de una celda de un RESA intermunicipal se eligió el Clúster 3, representado por el municipio de Tejupilco, debido que la generación intermunicipal de RSU diaria promedio justifica el ubicar un sitio de disposición final intermunicipal tipo A, que reciba más de 100T/d de RSU (DOF, 2004).

3.3 ESTUDIOS DE CARACTERIZACIÓN

Se gestionó la visita a los SDF de los municipios de Tejupilco, EdoMex, Huitzilac, Mor. y Pilcaya, Gro.; y bajo la autorización de sus autoridades municipales, se llevó a cabo la caracterización de los RSU. En las caracterizaciones presentadas el término Otros fue integrado por los siguientes subproductos: Residuos fino, electrónicos, medicamentos, hule, pañal desechable, algodón, loza y cerámica, materiales de construcción y varios; mientras que los materiales susceptibles de ser valorizados fueron integrados por Cartón, Goma y Cuero, Metal, Papel, Plástico, Tetrapack, Textil y Vidrio. Cabe mencionar que los subproductos que refiere la NMX-AA-022-1985 (DOF, 1985b) se agruparon en las categorías del documento publicado por INECC-SEMARNAT (2012).

3.3.1 Caracterización Tejupilco

En la figura 3.3 se presenta la caracterización del TCA que pertenece al municipio de Tejupilco, Estado de México. En este sitio predominan los materiales potencialmente valorizables (43.7 %) y se distinguen diferencias respecto a la media nacional en cuanto a la FO del 52.45% frente al 27.66% de este sitio.

Es notable la disminución del vertido de envases de vidrio respecto a la media nacional, caso contrario de la cantidad de plásticos que se ha triplicado lo que indica que el uso de estos materiales ha ido sustituyendo al vidrio.

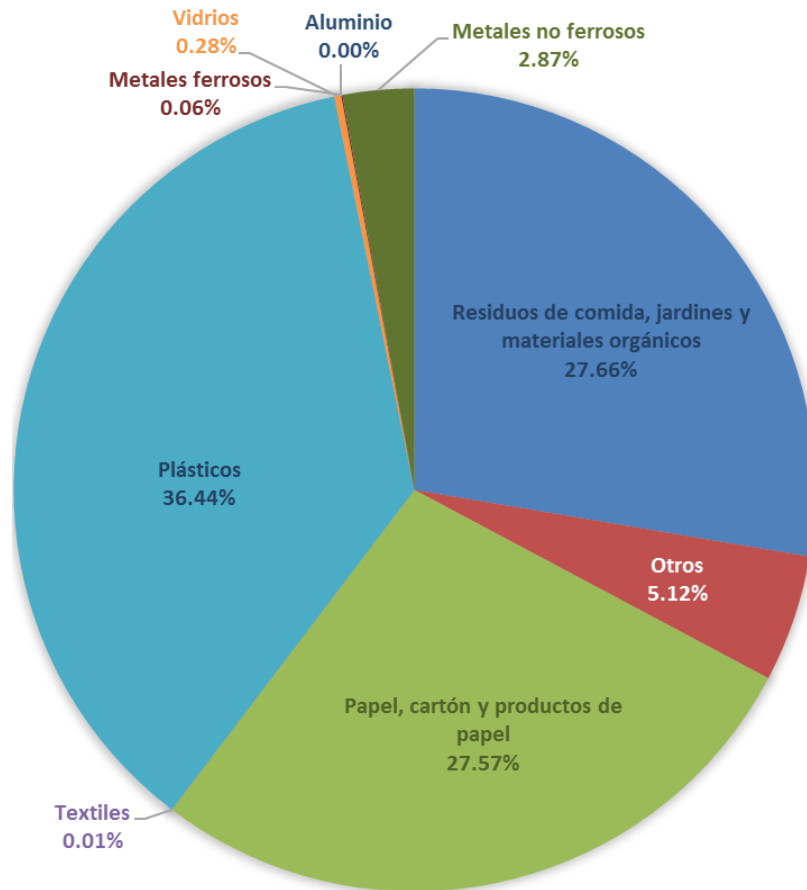


Figura 3.3 Caracterización TCA Tejupilco

3.3.2 Caracterización Huitzilac

Si bien en el TCA de Huitzilac, Morelos prevalece la FO con el mayor porcentaje (38.90%), éste se encuentra 13.55% por debajo de la media nacional. En cuanto a los materiales considerados valorizables, éstos registran el valor más bajo de las tres caracterizaciones con el 25.2%. Cabe mencionar que los textiles superan en 12.48% de la media nacional, lo cual es prueba que los usos y costumbres, así como los patrones de consumo afectan la composición de los RSU (Figura 3.4).

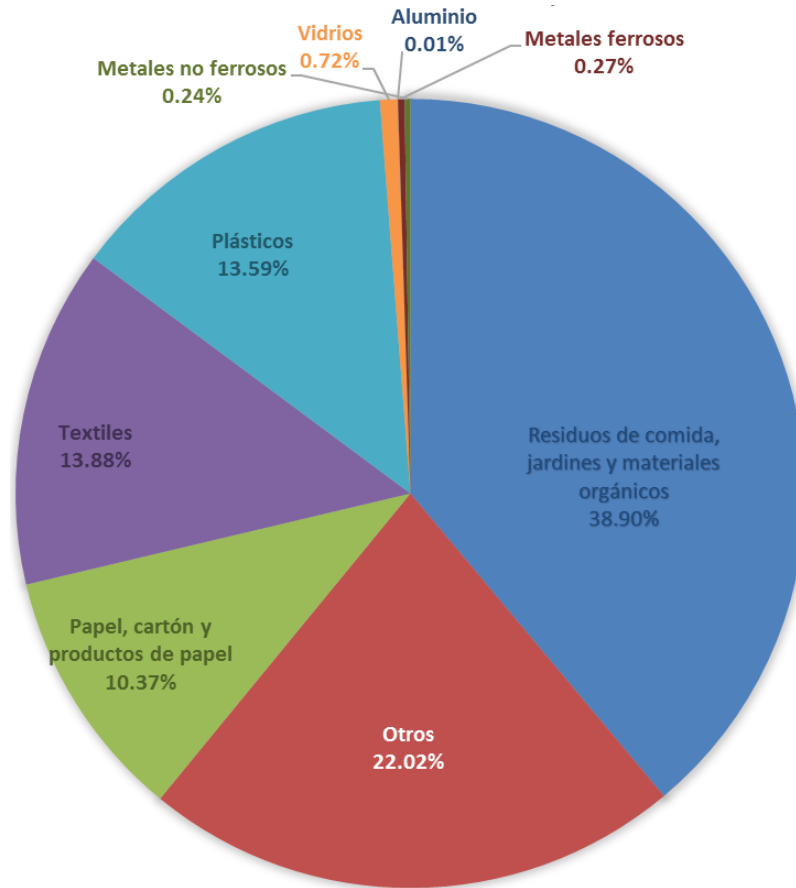


Figura 3.4 Caracterización TCA Huitzilac

3.3.3 Caracterización Pilcaya

La FO determinada en el SDF de Pilcaya, Gro. es menor a la media nacional, no así la categoría de Otros; el cual tiene un valor aproximadamente 20% mayor. En cuanto a materiales potencialmente valorizables representan el 35.3%, lo que puede atribuirse a que la población posee menor poder adquisitivo y desde el origen los RSU son segregados.

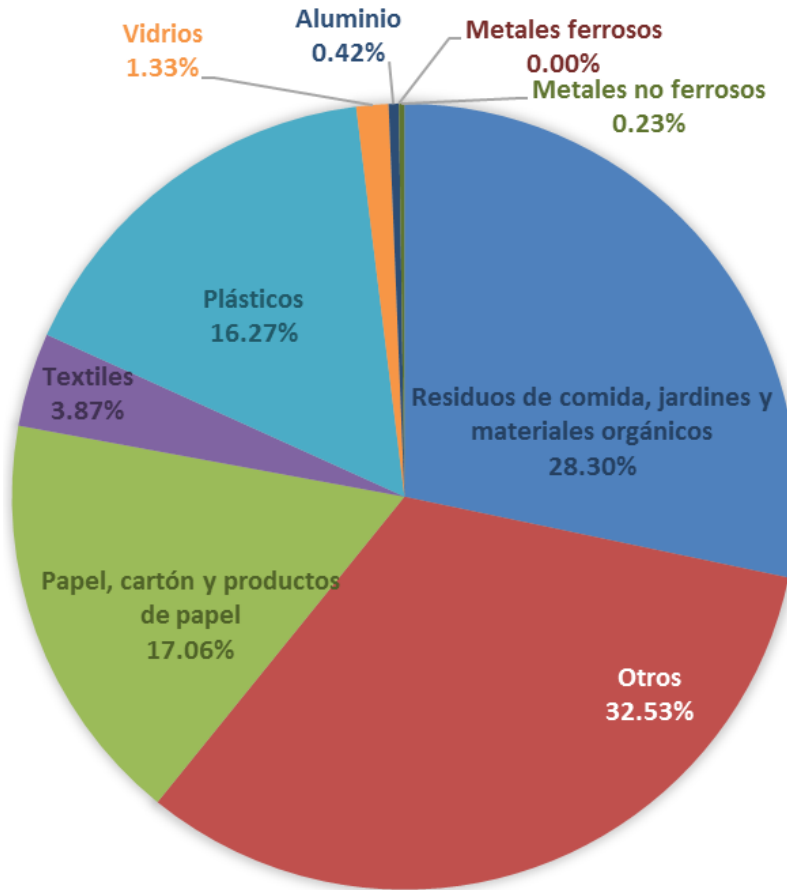


Figura 3.5 Caracterización TCA Pilcaya

3.3.4 Composición de residuos sólidos urbanos en Moduelo 4.0

Para llevar a cabo la simulación de la generación de RSU, se ajustaron las composiciones obtenidas de los estudios de caracterización al formato requerido por Moduelo 4.0. La tabla 3.7 presenta en la columna Tejupilco la composición promedio estimada de las caracterizaciones de Tejupilco, EdoMex, Huitzilac, Mor. y Pilcaya, Gro.; y en la columna Tejupilco-80% Valorizables, los porcentajes determinados si se extrae el 80% de cada residuo valorizable.

La composición CA y CB corresponde a información del RESA X, donde con la finalidad de apreciar los cambios en la dinámica de generación de CH₄ se utilizó el modelo de terreno de éstas, reemplazando la composición de los RSU del RESA X por la composición de Tejupilco y se utilizaron las constantes de calibración presentadas en el apartado 2.4.3. La última columna de la tabla 3.7 contiene la composición del RESA X sin el 80% de sus componentes reciclables.

Tabla 3.7 Composición de RSU para el modelo de generación de residuos

SUBPRODUCTOS/SITIO EN ESTUDIO	TEJUPILCO (%)	TEJUPILCO -80% VALORIZABLES (%)	CA Y CB (%)	CA Y CB -80% VALORIZABLES (%)
Alimentos	21.9	38.9	62.0	82.6
Cartón	9.5	3.4	5.4	1.4
Goma y Cuero	0.0	0.0	0.9	0.2
Inerte	2.5	4.4	0.1	0.2
Madera	1.3	2.4	1.2	1.6
Metal	3.1	1.1	2.0	0.5
Pañal y celulosa	10.1	17.9	5.5	7.4
Papel	2.7	0.9	6.5	1.7
Plástico	27.1	9.6	9.4	2.5
Poda y siega	9.6	17.0	0.0	0.0
Tetrapak	2.5	0.9	2.8	0.7
Textil	4.9	1.8	1.7	0.5
Vidrio	4.7	1.7	2.5	0.7
Total	100.0	100.0	100.0	100.0

3.4 DISEÑO DE UN RELLENO INTERMUNICIPAL SUSTENTABLE

En este apartado se presenta el dimensionamiento de las celdas de un RESA intermunicipal sustentable, el diseño de los modelos y escenarios utilizados en las simulaciones, así como el dimensionamiento de los equipos para los sistemas de lixiviado y de biogás, para las CA y CB que presentaron las mayores generaciones de biogás con la composición Tejupilco de los municipios seleccionados.

3.4.1 Dimensionamiento de celdas

Como se mencionó en el apartado 2.4.1, de acuerdo con la generación de RSU de los municipios del Clúster 3 por dos años que fuera capaz de contenerlos. Para determinar la cantidad de RSU a depositar se realizaron varias proyecciones, de manera que en la tabla 3.8 se presenta la población reportada por CONAPO (2017) para el 2017, con la que se estimó la población para el periodo 2020-2050 (Anexo D). Con base a la población estimada y a la generación de RSU recabada con la CE para el 2017 se calculó la generación per cápita y se proyectó para el periodo de estudio con un incremento anual de 0.01 kg/día (SEMARNAT, 2014).

Tabla 3.8 Generación de RSU proyectada para dos años

MUNICIPIO	No. HABITANTES (miles)			GENERACIÓN DE CE (T/d)	GENERACIÓN PROYECTADA (T/d)	
	2017*	2020	2021	2017	2020	2021
Tejupilco, EdoMex	81.87	85.60	86.85	70.00	75.75	77.73
Amatepec, EdoMex	27.82	28.65	28.95	18.65	25.35	25.91
Sultepec, EdoMex	28.24	29.36	29.76	23.79	25.98	26.63
Luvianos, EdoMex	29.47	30.52	30.90	25.20	27.01	27.66
Cutzamala de Pinzón, Gro.	21.81	21.82	21.92	14.60	19.31	19.53
				Total	173.4	177.46

*Fuente: CONAPO, 2017

Para a contener los RSU generados durante dos años (Tabla 3.9 y Anexo D) se requeriría un volumen de 150 665.98 m³, compactándolos a 0.850 T/m³, como se muestra en la ecuación 3.1 y el RESA intermunicipal sería tipo A (DOF, 2004). Si se separa el 80 % de reciclables las cantidades a depositar en dos años disminuyen (Tabla 3.9), por lo que volumen requerido también (Ecuación 3.2).

$$V_{CELDA} = \frac{128\,066.09\,T}{0.850\frac{T}{m^3}} = 150\,665.08\,m^3 \quad (\text{Ec. 3.1})$$

$$V_{CELDA} = \frac{72\,126.82\,T}{0.850\frac{T}{m^3}} = 84\,855.08\,m^3 \quad (\text{Ec. 3.2})$$

La capacidad volumétrica de la celda considerando el material de cobertura, que generalmente es suelo de la región, se puede calcular como el 15-25% del volumen total de RSU para disposición (DOF, 2004; Bagchi, 2004), por lo que el volumen estimado para la celda para los RSU con y sin el 80% de reciclables es como se muestra en las ecuaciones 3.3 y 3.4 respectivamente.

Dependiendo de la topografía del terreno para la celda, la disponibilidad de material de cobertura y la profundidad del nivel freático, se elige el método constructivo (área, zanja o mixto) y se tendría que proyectar los taludes 3:1 (SEPA, 2004; Bareither, 2010). En el caso de contar con un vaso de 20 m de profundidad y paredes a 90°,

3. RESULTADOS

si se requiere dejar sellada la celda a nivel del suelo con material de cobertura, se requeriría un terreno de superficie cuadrada aproximada de 95x95 m² para el total de los RSU y de 72x72 m² para cuando se han extraído el 80% de reciclables.

$$V_{CELDA} = 150\,665.08\,m^3 * 1.2 = 180\,798.10\,m^3 \text{ (Ec. 3.3)}$$

$$V_{CELDA-80\%} = 84\,855.08\,m^3 * 1.2 = 101\,826\,096\,m^3 \text{ (Ec. 3.4)}$$

El diseño del RESA Intermunicipal Sustentable bajo el esquema de Modulo 4.0, permitió utilizar el modelo del terreno extraído del RESA X correspondiente a las CA y CB (Tabla 2.3); las cuales podrían recibir durante 8 años los RSU de los municipios del Clúster 3 y por 14 años si se extrae el 80% de reciclables (Tabla 3.9), debido a que su capacidad es de 174 727 y 408 816 T de RSU, respectivamente, sumando 583 543 T (Anexo F).

Tabla 3.9 Generación de RSU que ingresaría al RESA intermunicipal sustentable

MUNICIPIOS	DISPOSICIÓN AÑOS 1 + 2 (T)	DISPOSICIÓN AÑOS 1 + 2 (T, -80% VALORIZABLES)	DISPOSICIÓN AÑOS 1 al 8 (T)	DISPOSICIÓN AÑOS 1 al 14 (T -80% VALORIZABLES)
Tejupilco, EdoMex	56 019.63	31 550.25	241 893.07	257 919.63
Amatepec, EdoMex	18 710.24	10 537.61	79 929.53	84 164.16
Sultepec, EdoMex	19 204.84	10 816.16	82 783.15	88 048.61
Luvianos, EdoMex	19 952.60	11 237.31	85 854.88	91 094.47
Cutzamala de Pinzón, Gro.	14 178.78	7 985.49	58 612.07	59 608.62
TOTAL	128 066.09	72 126.82	545 094.00 < 583 543.00	85755.32 < 583 543.00

3.4.2 Diseño de celdas tipo para simulación

El modelo del terreno de CA se presenta en la figura 3.6, el cual está conformado por 13 capas en la parte más alta (Noroeste, color violeta, 26m) y 9 capas en la parte más baja (Sur, color verde, 18m). Al sureste se presenta un banco de piedra que de acuerdo con el terreno real tiene una altura de 4m, mientras que en el suroeste se aprecia el camino utilizado para el descenso de los camiones de vertido, considerando que la operación del llenado se llevó a cabo de norte a sur.

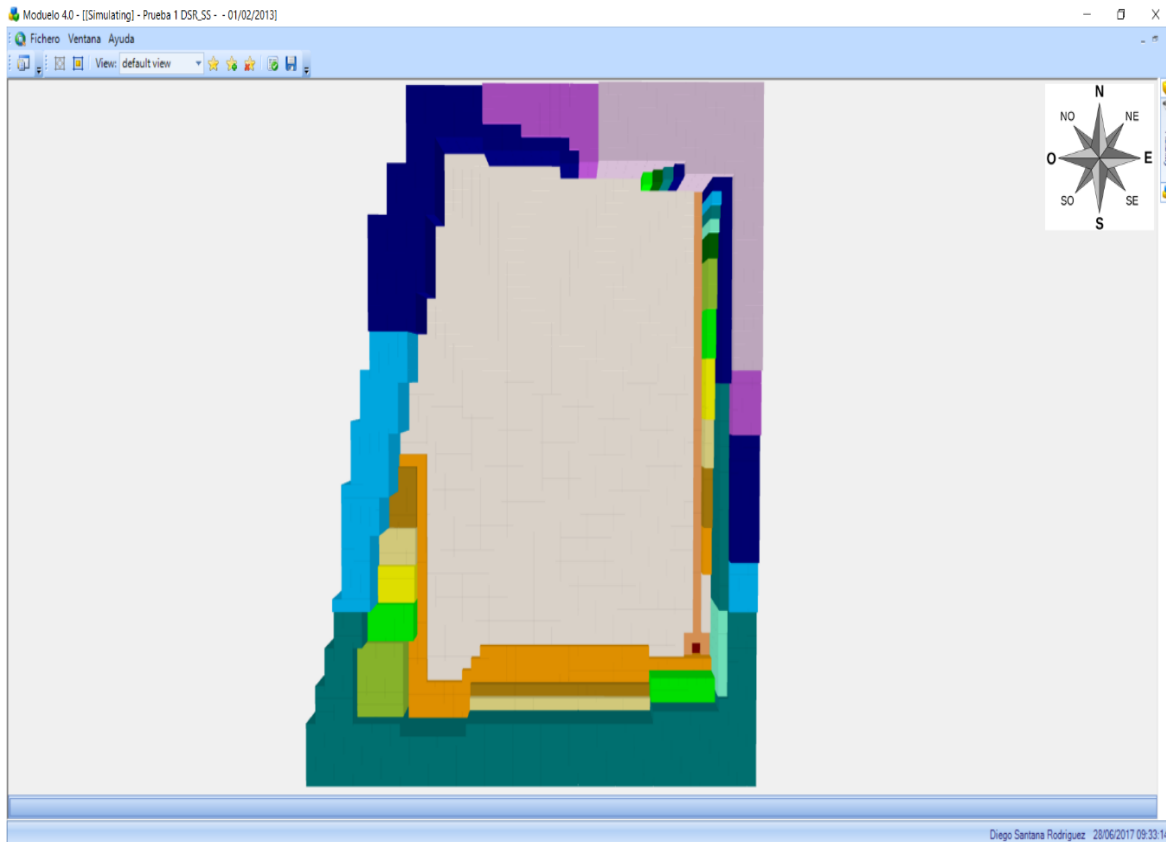


Figura 3.6 Celda tipo A, Modelo morfológico

El modelo del terreno de CB se presenta en la figura 3.7. Está conformado por 12 capas en la parte más alta (Este, color verde agua, 24m) y 9 capas en la parte más baja (Oeste, color verde, 18m). Al sureste se presenta un banco de piedra que de acuerdo con el terreno real tiene una altura de 6m, mientras que en el oeste se aprecia el camino utilizado para el descenso de los camiones de vertido.

La operación del llenado se llevó a cabo de norte a sur hasta el banco y posteriormente de sur a norte, considerando la disposición de la parte más alta a la más baja, es decir, del lado de donde los equipos de compactación trabajaran a favor de la pendiente y nunca hacia arriba por cuestión de consumo de combustible (Bagchi, 2004).

Las miniceldas que conforman los modelos de terreno corresponden a la etapa de disposición de los RSU, llenado del vaso, cobertura del vaso de vertido, disposición por encima del nivel del suelo y para la clausura el material final de cubrimiento (Sellado).

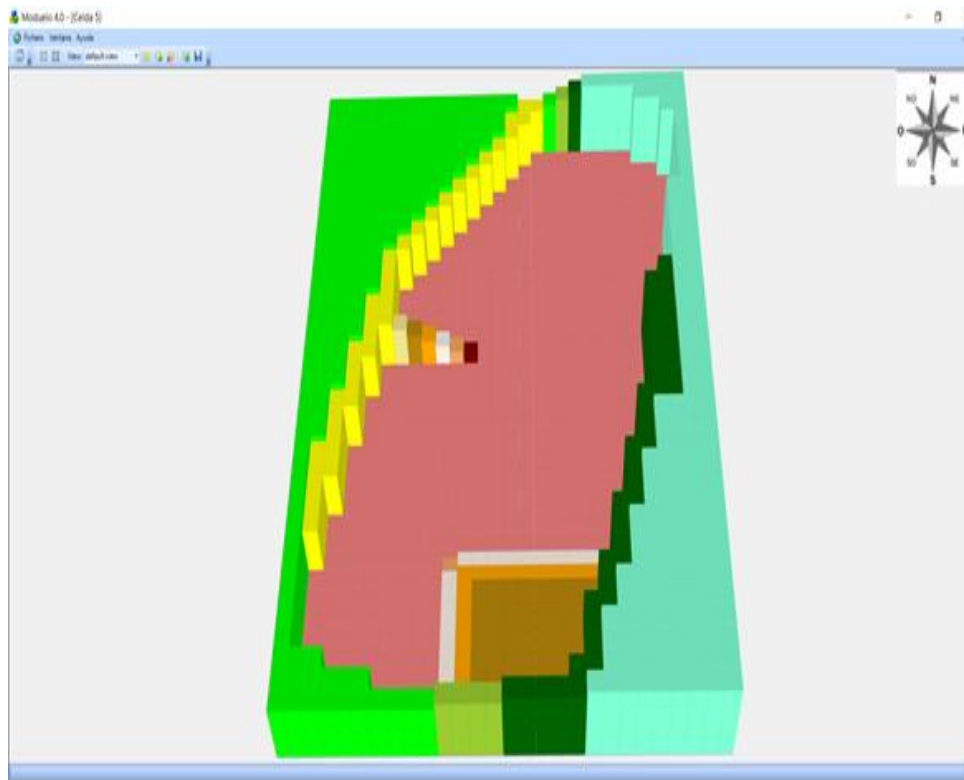


Figura 3.7 Celda tipo B, Modelo morfológico

En la tabla 3.10 se presentan las constantes relacionadas con las diversas propiedades de los RSU en las simulaciones (López *et al.*, 2013; Schroeder, 1994).

3.10 Constantes utilizadas en los distintos escenarios de simulación

	RSU SIN COBERTURA	RSU CON COBERTURA	RSU SUPERFICIALES	SELLADO
PARÁMETROS DE LOS RSU				
Humedad residual inicial (%)	12	12	12	12
Capacidad de campo inicial (%)	25	25	25	25
Humedad de saturación inicial (%)	56.2	56.2	59	59
Conductividad hidráulica vertical (m/s)	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005
Conductividad hidráulica horizontal (m/s)	0.00005	0.00005	0.00005	0.00005
PARÁMETROS DEL MATERIAL DE COBERTURA				
Espesor (m)	0	a)0.15, b)0.20	0	0.6
Humedad inicial (%)	20	20	20	20
Densidad (kg/m ³)	1400	1400	1400	1400
Humedad residual inicial (%)	5	5	5	5
Capacidad de campo inicial (%)	20	20	20	20
Humedad de saturación inicial (%)	25	25	25	25
Conductividad hidráulica vertical (m/s)	0.000002	0.0000001	0.000002	0.0000001
INFILTRACIÓN SUPERFICIAL				
Tasa de infiltración mínima (mm/h)	3.81	3.81	3.81	10
Tasa de infiltración máxima (mm/h)	76.2	76.2	76.2	150
Parámetro de Horton (1/h)	4.14	4.14	4.14	4.14
EVAPOTRANSPIRACIÓN SUPERFICIAL				
Profundidad de evaporación (m)	0.1	0.1	0.1	0.1
Punto de marchitez (%)	100	100	100	100
ESCORRENTÍA				
Acumulación superficial máxima	0.2	0.05	0.05	0.05
FLUJO PREFERENCIAL				
Fracción del volumen afectada por canales preferenciales (%)	35	35	45	45
HUMEDAD RESIDUAL				
Humedad residual mínima del RSU (%Hbh)	5	5	5	5
Influencia de la carga en la humedad residual (kg/m ²)	4536	4536	4536	4536

a) Material de cobertura intermedia de CA, b) Material de cobertura intermedia de CB

3.10 Constantes utilizadas en los distintos escenarios de simulación (continuación)

	RSU SIN COBERTURA	RSU CON COBERTURA	RSU SUPERFICIALES	SELLADO
MODELO DE DEGRADACIÓN				
Tasa de hidrólisis rápida (1/d)	0.1	0.1	0.1	0.1
Tasa de hidrólisis lenta (1/d)	0.01	0.01	0.01	0.01
Tasa de acetogénesis (1/d)	0.1	0.1	0.1	0.1
MODELO DE RSU				
Factor de accesibilidad	0.65	0.65	0.65	0.65
Factor de arrastre	0.2	0.2	0.2	0.2

a) Material de cobertura intermedia de CA, b) Material de cobertura intermedia de CB

Se realizaron 12 simulaciones para cada CA y CB, para determinar las respectivas generaciones de CH₄ con las composiciones de RSU del RESA X y del SDF de Tejupilco, bajo tres escenarios de recirculación de lixiviados: SR, RS y RP. En la tabla 3.11 se muestra las producciones acumuladas de CH₄ al año 30, así como el año en que se tiene la máxima generación para cada escenario simulado.

Tabla 3.11 Escenarios de operación y simulaciones para CA y CB

No.	ESCENARIO	CANTIDAD RSU (T)	TIPO DE RECIRCULA- CIÓN	PRODUCCIÓN DE CH ₄		
				MÁXIMA (m ³ /h)	AÑO	ACUMULADA TOTAL (m ³)
1	CA*-SR	174 727	No	1.0039	3	84 830.7
2	CA*-RS	174 727	2 m ³ /d, Superficial	1.0903	3	92 124.7
3	CA*-RP	174 727	2 m ³ /d, Pozos	1.3207	3	111 593.3
4	CA*-80%V-SR	174 727	No	0.4117	8	92 063.2
5	CA*-80%V-RS	174 727	2 m ³ /d, Superficial	0.5095	8	99 439.8
6	CA*-80%V-RP	174 727	2 m ³ /d, Pozos	0.7668	8	149 647.7
7	CA-Tejupilco-SR	174 727	No	.1360	5	26 972.6
8	CA-Tejupilco-RS	174 727	2 m ³ /d, Superficial	0.2584	30	40 743.0
9	CA-Tejupilco-RP	174 727	2 m ³ /d, Pozos	0.4763	8	92 953.9
10	CA-Tejupilco-80%- SR	174 727	No	0.2202	5	43 695.2
11	CA-Tejupilco-80%- RS	174 727	2 m ³ /d, Superficial	0.6520	30	111 574.8
12	CA-Tejupilco-80%- RP	174 727	2 m ³ /d, Pozos	0.8050	8	157 103.4

*Composición RESA X; SR, Sin recirculación; RS, Recirculación superficial; RP, Recirculación en pozos

Tabla 3.11 Escenarios de operación y simulaciones para CA y CB (Continuación)

No.	ESCENARIO	CANTIDAD RSU (T)	TIPO DE RECIRCULA- CIÓN	PRODUCCIÓN DE CH ₄		
				MÁXIMA (m ³ /h)	AÑO	ACUMULADA TOTAL (m ³)
13	CB*-SR	408 816	No	8.5927	30	1 289 162.4
14	CB*-RS	408 816	6 m ³ /d, Superficial	7.8877	4	1 392 238.6
15	CB*-RP	408 816	6 m ³ /d, Pozos	8.5946	4	1 517 006.9
16	CB*-80%V-SR	408 816	No	14.3366	30	2 150 919.8
17	CB*-80%V-RS	408 816	6 m ³ /d, Superficial	13.3137	4	2 349 973.5
18	CB*-80%V-RP	408 816	6 m ³ /d, Pozos	14.5926	4	2 575 710.8
19	CB-Tejupilco-SR	408 816	No	.1480	30	26 701.1
20	CB-Tejupilco-RS	408 816	6 m ³ /d, Superficial	.7417	30	133 792 .7
21	CB-Tejupilco-RP	408 816	6 m ³ /d, Pozos	1.0303	30	185 851.4
22	CB-Tejupilco-80%- SR	408 816	No	2.5698	12	424 986.6
23	CB-Tejupilco-80%- RS	408 816	6 m ³ /d, Superficial	2.8184	30	508 412.1
24	CB-Tejupilco-80%- RP	408 816	6 m ³ /d, Pozos	4.1957	30	837 515.9

*Composición RESA X; SR, Sin recirculación; RS, Recirculación superficial; RP, Recirculación en pozos

En la tabla 3.11 se puede observar que la mayor tasa de generación de CH₄ corresponde a las recirculaciones en pozo en todos los escenarios, debido a que el lixiviado tuvo mayor contacto con la matriz de RSU y se aceleró la degradación. Por otro lado, existen casos en que la humedad adicionada no es suficiente para biodegradar la FO (Valencia-Vázquez, 2008; Hernández-Berriel, 2010) y la producción de CH₄ tiende a ascender hasta el año 30 donde se registraron valores máximos (Mañón-Salas *et al.*, 2012).

El caso de CA-Tejupilco-80% presentó la mayor tasa de generación de CH₄ en el menor periodo de tiempo sin recirculación (5 años), seguido de recirculación en pozos (8 años) y finalmente con recirculación superficial (30 años); esto se puede atribuir a la permeabilidad, la conductividad hidráulica, la velocidad de flujo lineal y los canales preferenciales los cuales no permitieron una distribución uniforme del lixiviado (Robles-Martínez, 2008; Bareither, 2010; Hernández-Berriel *et al.*, 2013).

CB*-80%V-RP correspondiente al RESA X registró la mayor tasa de generación de CH_4 y su valor máximo en el 4º año (30 922.36 $\text{m}^3/\text{año}$), ya que tiene la mayor cantidad de FO y mejor distribución de lixiviado. En algunos casos se obtuvo hasta el año 30 la tasa máxima, lo que indica que requirió un mayor contenido de humedad para estabilizarse; ésto último apunta a que disminuya drásticamente la emisión de biogás, la producción de lixiviado y el asentamiento de la celda (Oakley & Jiménez, 2012; Hernández-Berriel *et al.*, 2014)

Se realizó el modelo del terreno (modelo morfológico), utilizándose los planos del RESA X y con el apoyo de un software de diseño asistido (*AutoCAD*™), se discretizó y se formó el terreno en Modulo 4.0 a través de un fichero *.dxf* que contiene las curvas de nivel de CA y CB como se aprecia en la figura 3.8.

Al fondo de cada vaso se tiene una pendiente de 0.12 lo cual permite recolectar el lixiviado por gravedad y en el modelo de almacenamiento fue considerado este valor y la posición de la balsa de lixiviados.

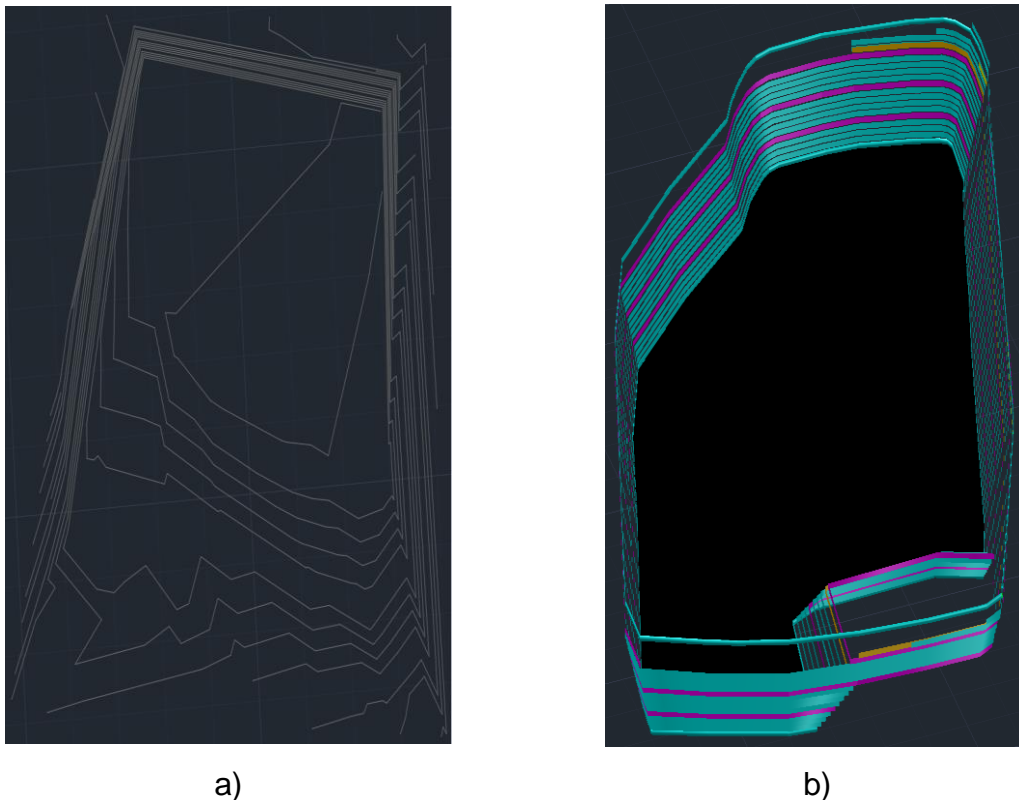


Figura 3.8 Curvas de nivel en fichero *.dxf*; a) Vaso de CA; b) Vaso de CB

Una vez que se obtuvo el modelo del terreno se procedió a realizar el orden de llenado de los RSU como se muestra en la figura 3.9. El orden de CA fue de N-S mientras que de CB se fue intercambiando de N-S y viceversa, conforme el terreno brindó las ventajas de operación.

Los taludes tienen pendiente de 18° (3:1). De acuerdo con las características del terreno permite formar los bancos y la corona, ésta última en caso de alguna contingencia sirve como almacén temporal. En caso de colocar otro banco estaría en riesgo la estabilidad de la celda. Se consideraron 2 (color café) y 7 (color azul cielo) pozos de inyección para CA y CB respectivamente, los primeros comprendieron un área de 25 m a la redonda y los segundos están colocados de forma triangular, lo que permite captar la mayor cantidad de CH_4 (Demirekler *et al.*, 2004).

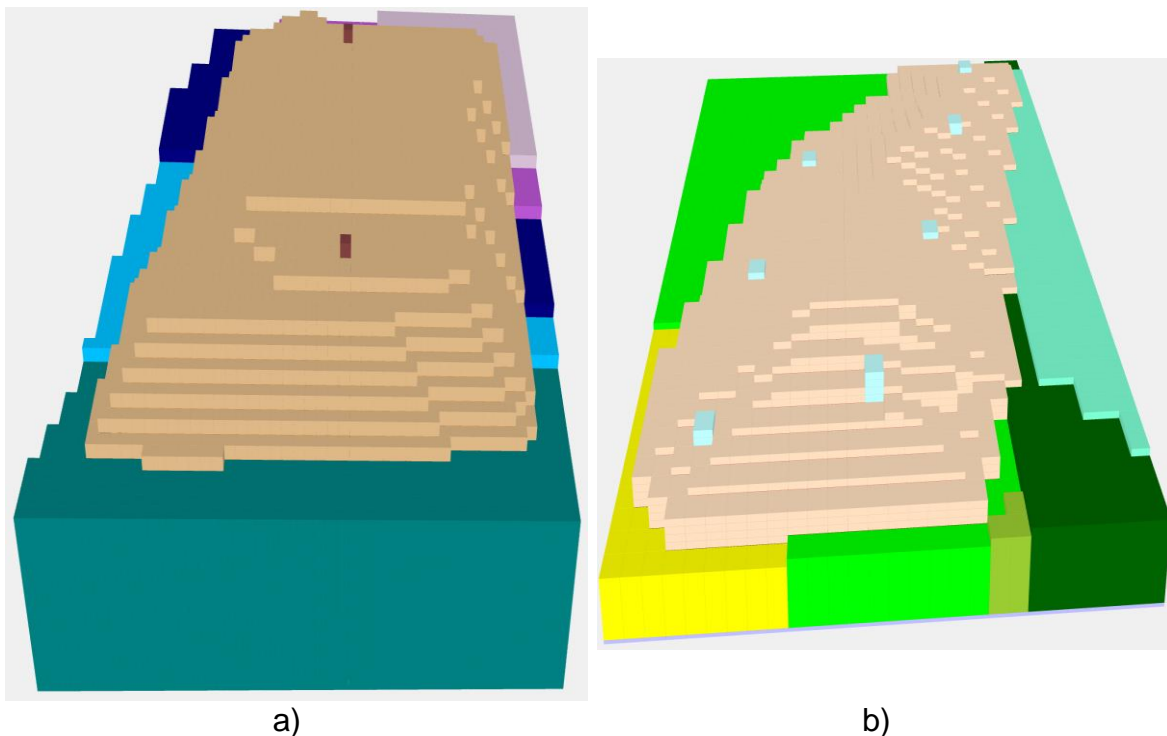


Figura 3.9 Llenado de vasos y pozos de inyección de lixiviado; a) Pozos, bancos y corona de CA; b) Pozos, bancos y corona de CB

3.4.3 Simulación de la operación tradicional de CA y CB

Se simularon las CA y CB tipo bajo las mismas condiciones de operación, es decir, con igual densidad de compactación, contenido de humedad, arreglo de miniceldas y otros parámetros que se presentan en la Tabla 3.10. A ninguna se le recirculó lixiviado y en principio, para la composición del RESA X las CA y CB solo difirieron en la cantidad de RSU depositados (174 727 y 408 816 Ton), requiriendo más tiempo la CB (6 meses); enseguida se simularon dichas celdas variando la composición cuando se extrajeron el 80% de reciclables, se utilizó la composición Tejupilco y finalmente a ésta se le extrajeron el 80% de reciclables.

En la figura 3.10 se aprecia el efecto que tuvo la generación de CH₄ en la CA al sustraer los RSU reciclables, con lo que la FO para CA aumentó de 38.9% a 82.6% y para Tejupilco del 21.9% al 38.9% lo cual representó un incremento del 24.9% y del 43.7% respectivamente, por lo que la mayor tasa de generación se presentó en los primeros 6 años y a partir del año 7 la tendencia fue descendente.

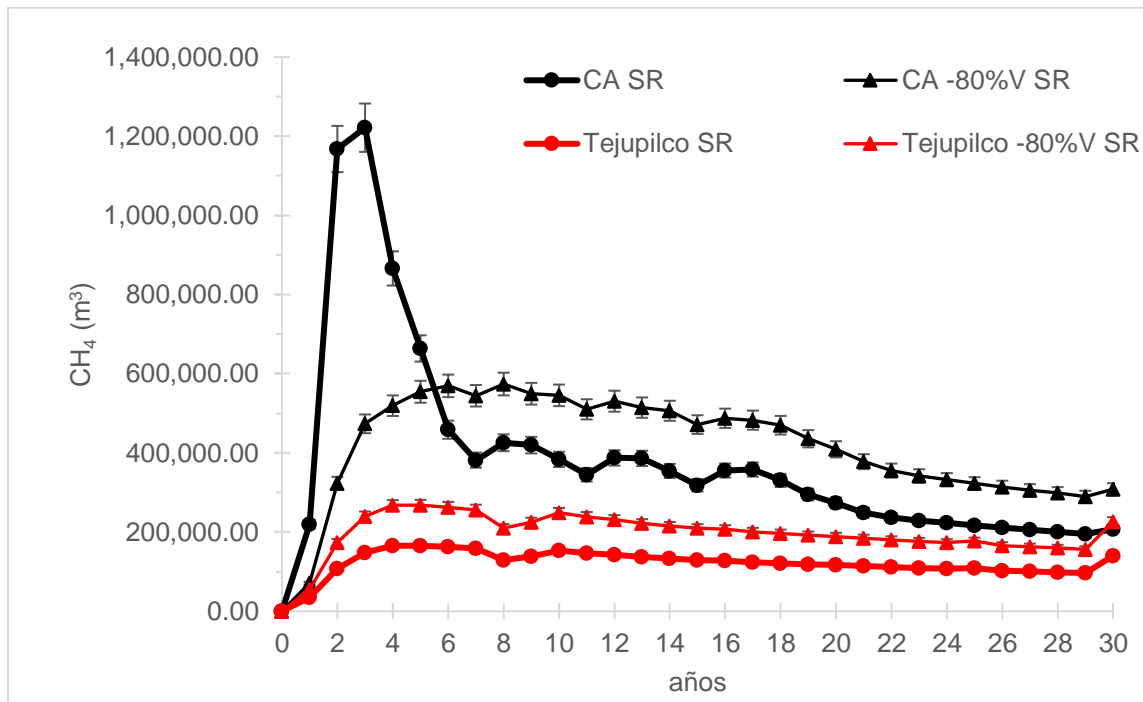


Figura 3.10 Dinámica de CH₄ de la operación SR de la CA

El valor máximo observado de CH₄ fue de 1 221 472.16 m³ en el rango de 2-4 años para CA SR, donde se produjo una mayor tasa de generación con el 100% de RSU dispuestos, sin embargo, para ambos casos, durante el periodo de 30 años la generación acumulada de las simulaciones sin RSU valorizables incrementa el 7.85% para CA y 38.27% para Tejupilco respecto a las simulaciones con disposición total.

A partir del año 22 la tasa de generación de CH₄ se estabiliza para cada una de las simulaciones en CA debido a que la degradación es lenta y así mismo la recuperación de CH₄, debido a que contenido de humedad se mantuvo en el rango de 14-16%Hbh, mientras que la tasa de generación de CH₄ mostró tendencias parecidas a las dinámicas de DQO, DBO y NH₃, donde se presenta en los primeros 6 años los valores máximos y una posterior tendencia descendente (Anexo H).

Por otro lado, la tasa de generación de CH₄ para el caso de la simulación de CB mostró una tendencia ascendente para el RESA X alcanzando como valor máximo en el año 30 17 442 811.21 m³ de CH₄, mientras que para el Clúster 3 se observó la tasa más alta en el año 12 para CB -80% V SR y para el total de RSU dispuestos una tasa máxima de generación de 180 089.58 m³ de CH₄, que comparando los datos generados por el RESA X en la figura 3.11 son pequeños.

En cuanto al contenido de humedad osciló en un periodo del 25-30%Hbh y fue superior a CA. Las dinámicas restantes contenidas en el anexo H, mostraron variaciones en todo el periodo de operación lo que es indicio de que en esta celda los procesos de degradación fueron intermitentes (Foth & Van Dyke, 2004).

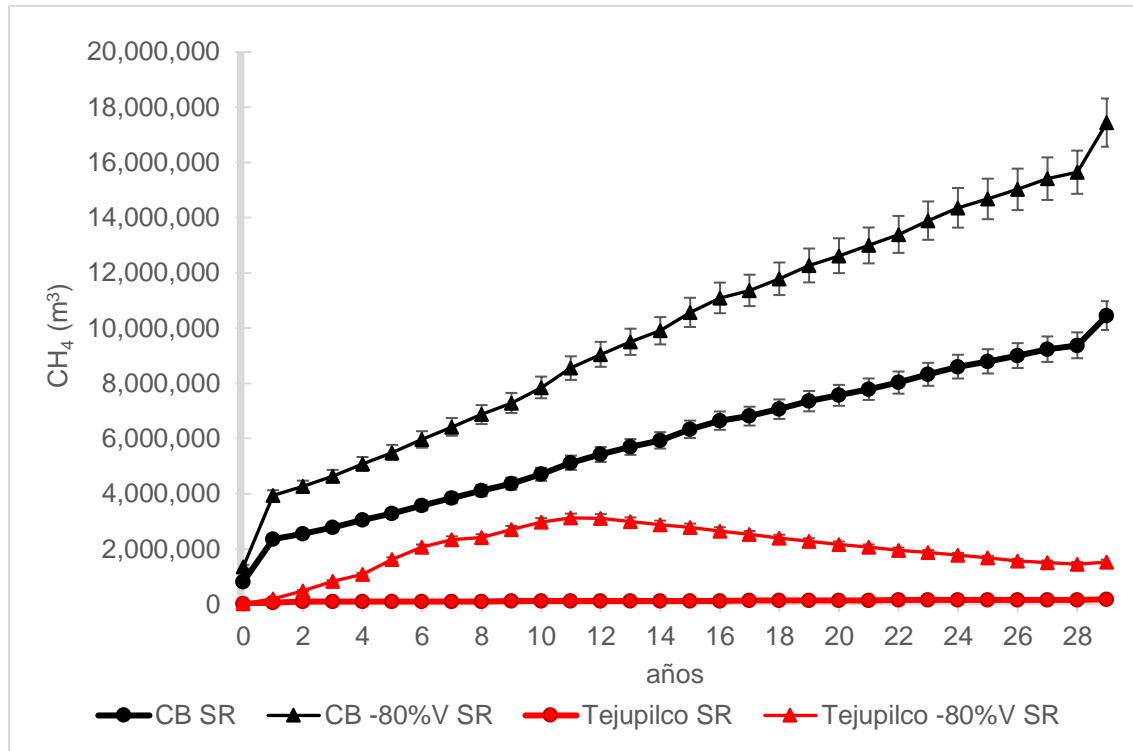


Figura 3.11 Dinámica de CH₄ de la operación SR de la CB

3.4.4 Simulación de la operación con recirculación de lixiviados de CA y CB

Las simulaciones de CA y CB se les recirculó lixiviado con irrigación superficial e inyección vertical (pozos). En la Tabla 3.10 se presentan las constantes utilizadas en Moduelo. 4.0, para ambos casos se realizaron simulaciones con composiciones del RESA X y Tejupilco análogas a la operación tradicional, donde consideró el total de RSU generados, así como el sustraer el 80% de los RSU valorizables.

Las recirculaciones en superficie como en inyección vertical generaron mayores tasas de CH₄ que en los escenarios de operación tradicional, ya que la recirculación actúa como un mecanismo que mejora el rendimiento de la degradación anaerobia (Hérendez-Berriel, 2010), a través de factores que permiten la adecuada distribución de nutrientes (Bereinther *et al.*, 2010).

El contenido de humedad para CA operada bajo el escenario RS presentó una tendencia ascendente, si bien es cierto que no se incrementa significativamente, sí permite mantener una humedad que generó 1 326 498 m³ de CH₄ como valor

máximo para el RESA X y una tendencia ascendente para el Clúster 3, como se observa en la figura 3.12.

En cuanto a DQO, DBO y NH₃ las tendencias son similares con puntos máximos en los primeros cuatro años de disposición que corresponden con 2526.40 mg/L, 1812.72mg/L y 38.7 mg/L respectivamente.

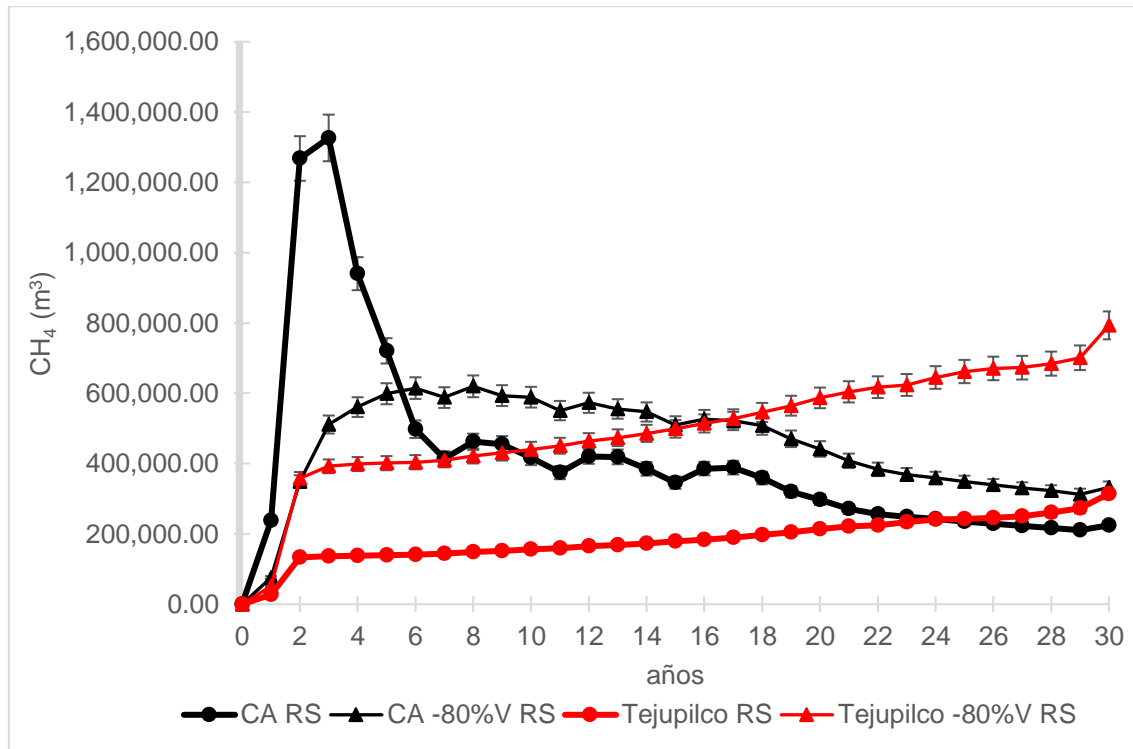


Figura 3.12 Dinámica de CH₄ de la operación de RS de CA

Las tasas de generación de CH₄ aumentan drásticamente en la recirculación en superficie de la CB ya que el contenido de humedad aumenta hasta 36.14% H₂O para el año 30 para Tejupilco y se ve reflejado en la figura 3.13, donde se observó una tendencia ascendente alcanzando una tasa máxima de generación para el Clúster 3 de 3 429 058.76 m³ de CH₄.

Las dinámicas de DQO, DBO y NH₃ para este escenario se apreciaron variables debido a que hubo periodos durante la operación que el contenido de humedad permitió una mayor distribución de nutrientes a través de la matriz de RSU, más sin embargo, de acuerdo a estos procesos de degradación el contenido de humedad se agotaba ya que las bacterias aceleraron su crecimiento siendo este parámetro el

factor limitante para alcanzar mayores tasas de generación de CH₄- Cabe mencionar que la cantidad de lixiviados a adicionar influye directamente en el costo de operación (Bagchi, 2004; Demirekler *et al.*, 2004, Hernández-Berriel, 2010; Mañón-Salas *et al.*, 2012).

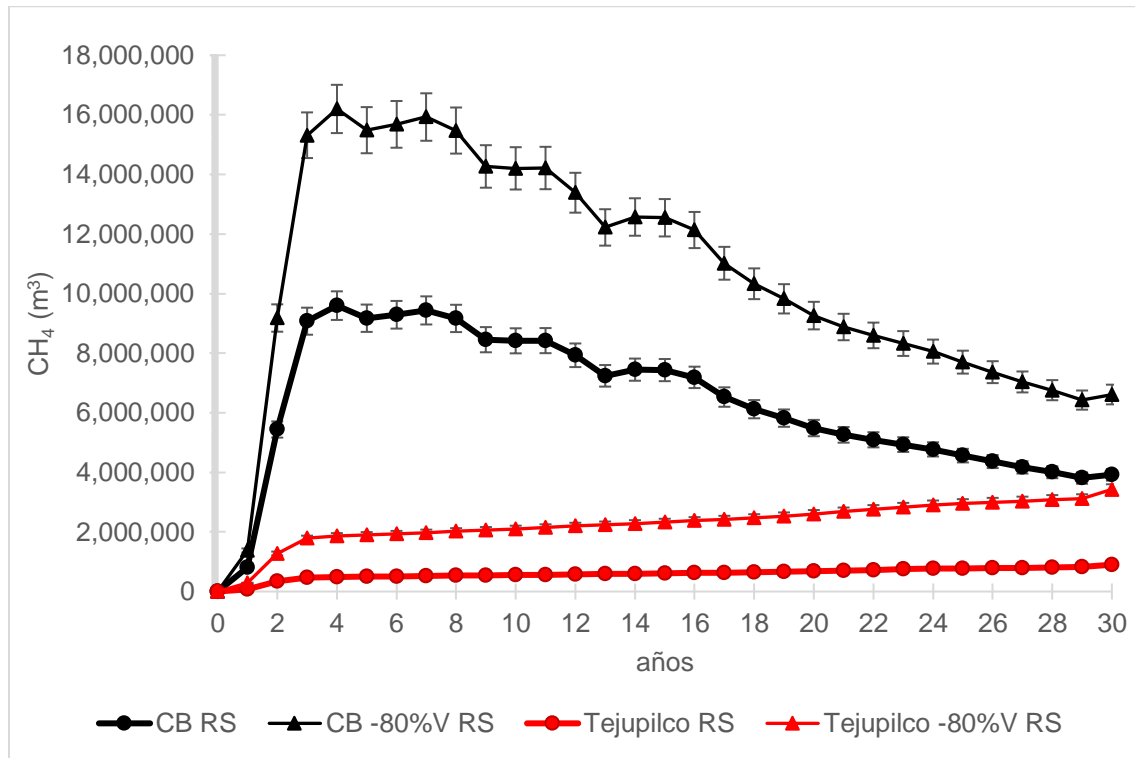


Figura 3.13 Dinámica de CH₄ de la operación de RS de CB

Los escenarios con dinámicas ascendentes de contenido de humedad corresponden a la inyección vertical de lixiviados en pozos. Si bien en el apéndice H se muestra una tendencia ascendente y estabilización para este escenario, se debe a la mejoría en la distribución del lixiviado pues el desplante de los pozos generalmente tiene una profundidad que oscila en los 20-25m, cuya altura y talud de la celda tienen estabilidad geotécnica (Foth & Van Dyke, 2004) Jaramillo, 2012; Oakley & Jiménez, 2012).

Las mayores tasas de generación de CH₄ se apreciaron en la recirculación en pozos, si bien en los anteriores escenarios se mostraron tasas máximas en los

primeros 4 o 6 años, en las figuras 3.14 y 3.15 se tuvieron generaciones de CH₄ con tendencia ascendente, estabilidad y posterior decaimiento, debido al agotamiento de el contenido de humedad, la falta de distribución de los nutrientes por estancamiento o la formación de canales preferenciales (Sánchez-Gómez, 2006; Valencia, 2008)

Las dinámicas referidas a CA presentaron tendencias similares a los anteriores, es decir, el mayor incremento en los primeros años para luego descender conforme el contenido de humedad se estabilizaba.

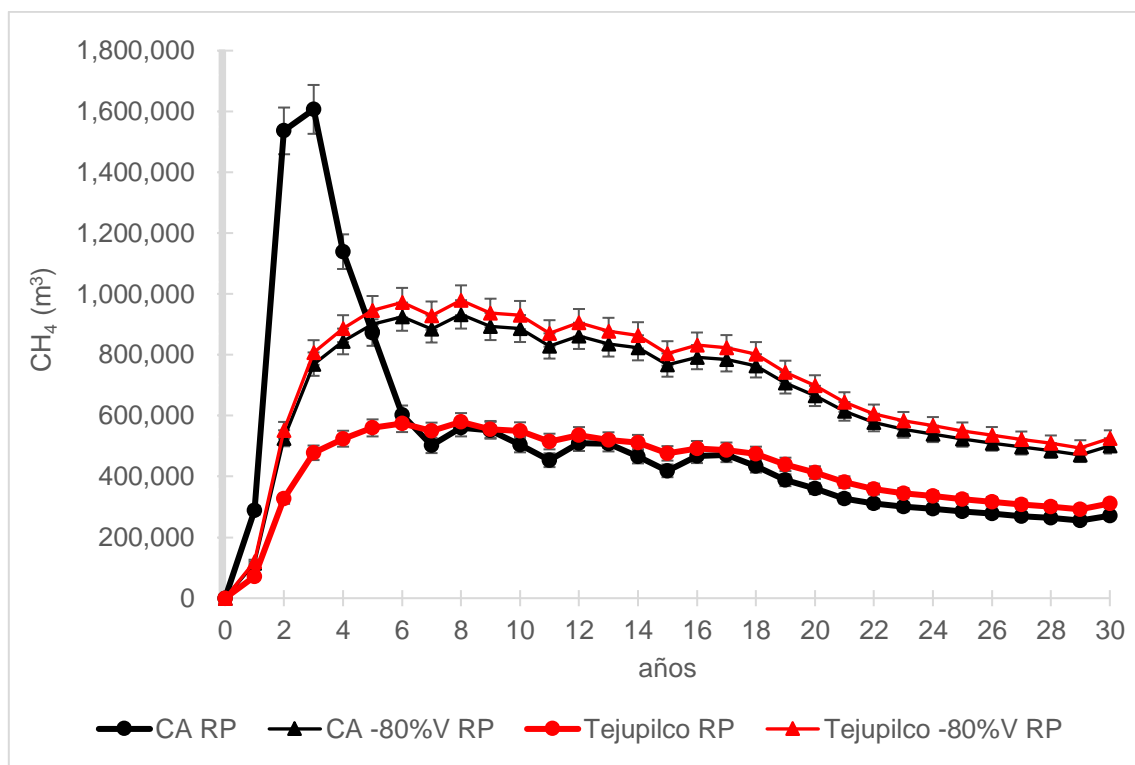


Figura 3.14 Dinámica de CH₄ de la operación de RP de CA

La máxima tasa de generación de CH₄ en las simulaciones corresponde al RESA X debido a la 62% de FO del total de la generación de RSU dispuestos, que al sustraer el 80% de los RSU valorizables el porcentaje aumenta a 82.6% de la FO. Para el caso del Clúster 3, representado por Tejupilco le corresponde el 21% del total de RSU dispuestos a la FO, y una vez sustraídos los RSU reciclables aumenta a 38.9%.

El anexo H también contiene las dinámicas de CB para la recirculación en pozos y se observó la variabilidad de los parámetros a través de la operación de la celda, el contenido máximo de humedad alcanzó el 35%, el cual corresponde al Clúster 3, que de acuerdo a la figura 3.15 en el periodo de los años 4-6 se tuvo la máxima generación de CH₄ y a pesar del agotamiento de la humedad en el año 10, la matriz de RSU de Tejupilco presentó una tendencia ascendente hasta el año 30.

Se tiene un incremento del 40-50% en la tasa de generación de CH₄ cuando se sustrae el 80% de los RSU valorizables respecto a la disposición completa de éstos (SAGARPA & FIRCO, 2007).

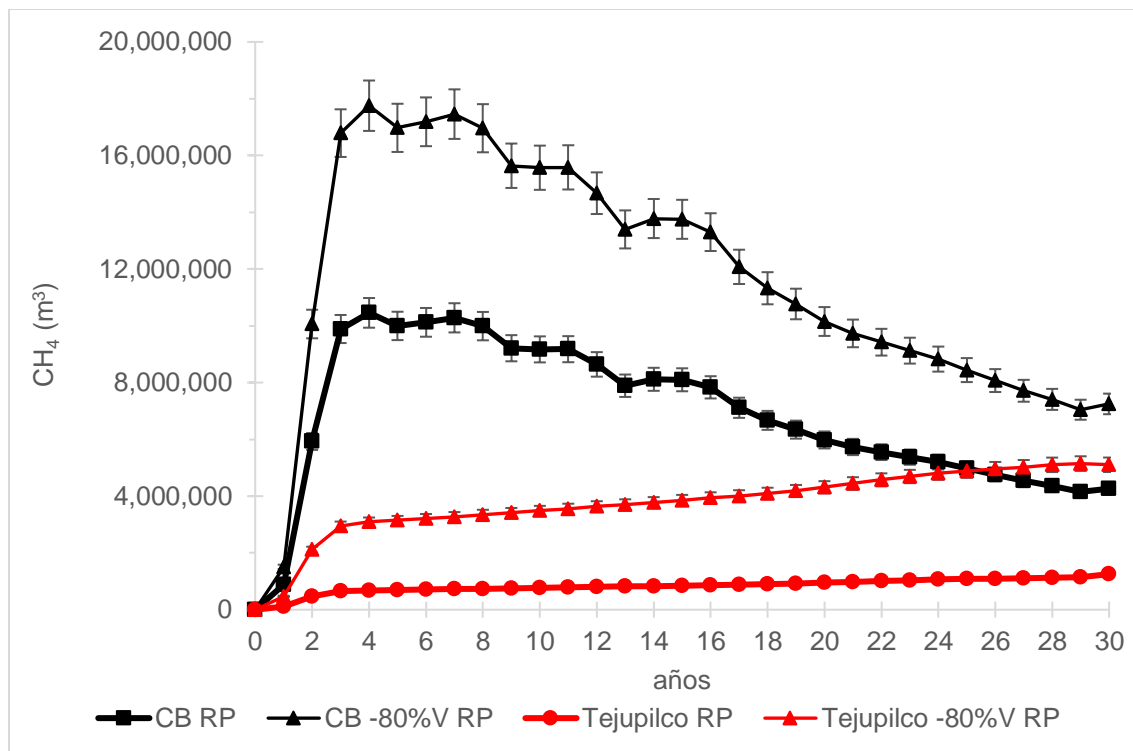


Figura 3.15 Dinámica de CH₄ de la operación de RP de CB

3.4.5 Dimensionamiento del sistema de aprovechamiento de biogás

Los sistemas para el aprovechamiento de biogás se dividen en tres partes: el sistema de captación, el sistema de conducción y el sistema de aprovechamiento y/o un sistema de destrucción. Debido a que la mayor generación de biogás fue

mediante la recirculación de lixiviados en pozos, también se consideró a la recirculación como una cuarta etapa (Bagchi, 2004; INCREMI, 2013):

a) Sistema de captación de biogás. Un pozo de extracción está conformado de tubería de PVC o HDPE, donde los diámetros usualmente encontrados en los sistemas de extracción de biogás de un RESA son de 2", 4" o 6" de diámetro. El tubo tiene un tramo ranurado (orificios alrededor del 60% de su longitud, aunque dicho porcentaje puede ser menor o mayor), el cual permite el paso del gas desde la masa de residuos hacia el sistema de conducción. Cabe mencionar que en México no se cuenta con criterios o regulaciones para el diseño de pozos de extracción de biogás, por lo que se consideran los criterios de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (EPA por sus siglas en inglés), y generalmente se utilizan ranuras verticales y horizontales, con áreas equivalentes que van de 8 a 16 plg²/ft (Schroeder, 1994; SEPA, 2004; Jaramillo, 2012).

En este trabajo se consideró para la CA dos pozos de biogás y la CB siete, colocados como se muestran respectivamente en las figuras 3.16 (INCREMI, 2013) reporta que el radio de influencia de un pozo puede estimarse considerando de 2.25 hasta 2.5 veces la profundidad del pozo, valores que son influenciados por la permeabilidad de los RSU y el sobre posicionamiento de los radios de influencia; esto último se utiliza para asegurar la mayor cobertura del sistema al momento de la extracción del biogás, tomado en cuenta un espacio de 2 a 4 veces la profundidad del pozo.

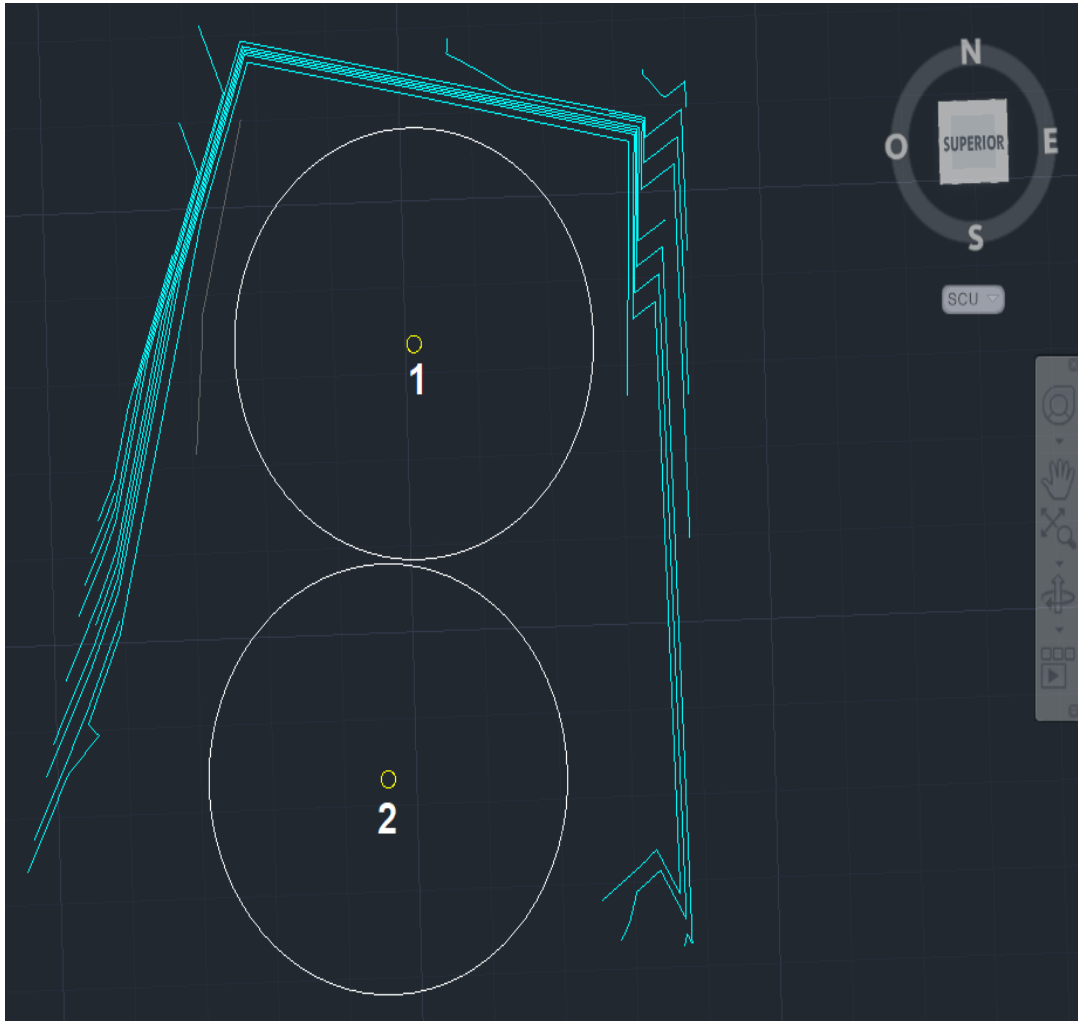


Figura 3.16 Pozos de CA con radio de influencia

Conforme a lo anterior y tomando el valor conservador de 2 veces la profundidad del pozo, los pozos denominados 1 y 2 de la CA (norte a sur), que tiene respectivamente profundidades de 36 y 34 m, tendrán un radio de influencia de 72 y 68 m, lo que significa que existe sobre posición, puesto que la distancia entre estos pozos es de 50 m (Figura 3.16). En cuanto a la CB, sus pozos tienen una profundidad promedio es de 31 m, lo que significa radios de influencia de 61 m; en la figura 3.17 se muestran esquemáticamente los radios de influencia.

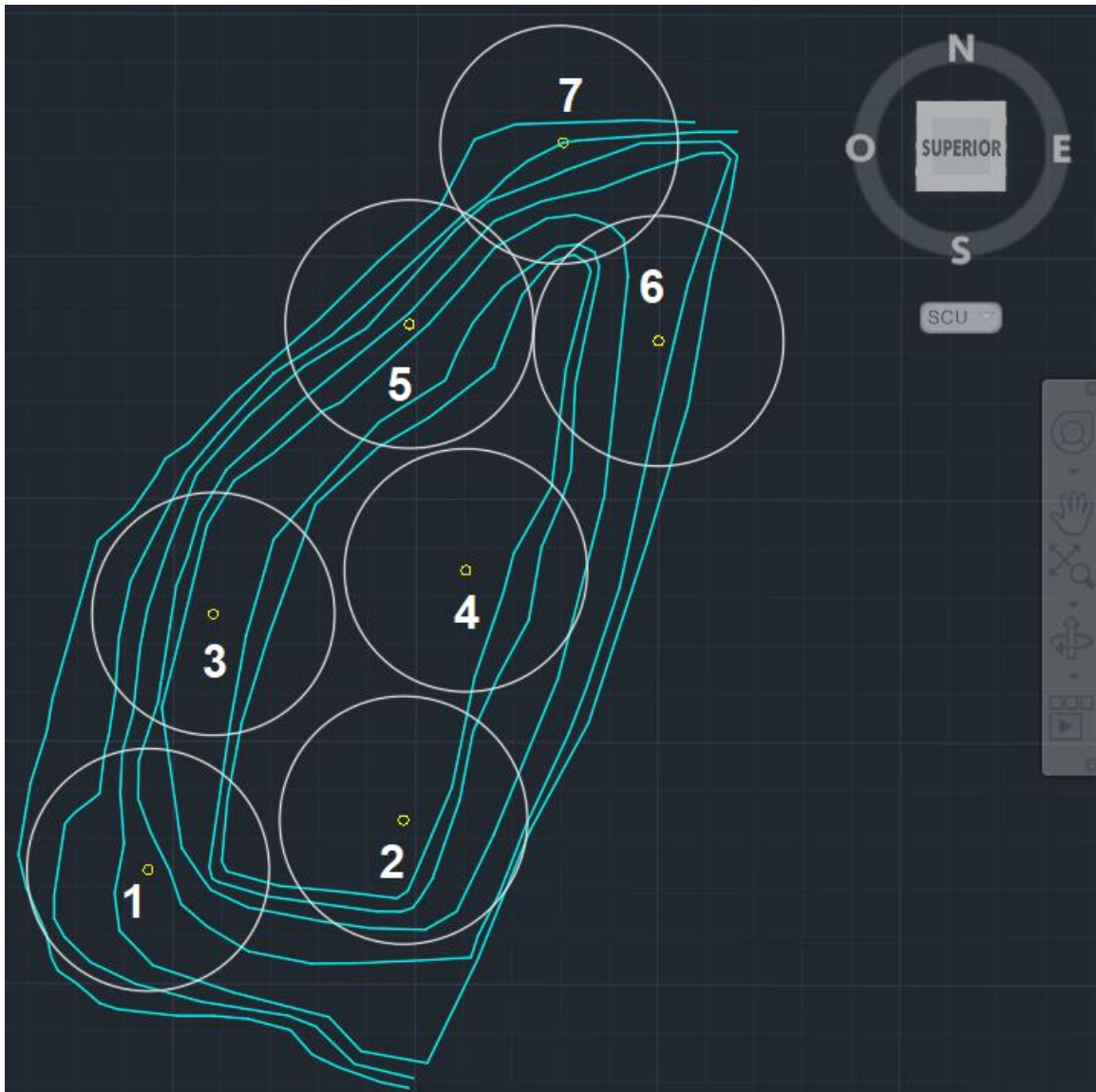


Figura 3.17 Pozos de CB con radio de influencia

- b) Sistema de conducción de biogás. Este sistema está conformado por una red de tubería, por lo regular de polietileno de alta densidad (PEAD o HDPE por sus siglas en inglés High Density Polyethylene) o bien de policloruro de vinilo (PVC por sus siglas en inglés Polyvinyl chloride); que interconecta a los pozos entre sí a una tubería principal, la cual conduce el biogás hacia el sistema de tratamiento (limpieza de Humedad, H_2S , Siloxanos) y posteriormente hacia la dosificación del sistema de destrucción (quemado) o si existe al sistema de aprovechamiento

(generación de energía). Existen varios elementos que conforman al sistema de conducción, en la tabla 3.12 se describen los comúnmente encontrados:

Tabla 3.12 Elementos de un sistema de conducción de biogás de RESA

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
Lateral	Tubería que conecta a un pozo con un subramal.
Sub-ramal	Recibe a los laterales, conectando varios pozos entre sí. Se conecta hacia los ramales o tubería principal.
Tubería principal o ramal principal	Conecta a los sub-ramales del sistema entre sí. Es el último eslabón entre el sistema de conducción y la extracción (bomba).
Trampa de Condensados	Elemento en donde se atrapa el vapor de agua con el que sale el biogás de la masa de residuos. Dicho elemento es muy importante debido a que mantiene la red libre de obstrucción al flujo de gas y por ende en condiciones óptimas de funcionamiento. Dichos elementos se sitúan en los puntos más bajos de la red de manera que, por el efecto de la fuerza de gravedad, se facilite la eliminación de los condensados.

Es importante mencionar que no existe un método o normativa para el diseño de redes de conducción de biogás en RESA, por lo que se puede encontrar una gran variedad de diseños: diámetros de tubería, sistemas de control de flujo, manejo del condensado etc., por lo que el diseño de nuevos proyectos se basa en la experiencia y las observaciones en campo de proyectos en marcha (INCREMI, 2013).

De acuerdo con la colocación de los pozos se presentan las distribuciones de los conductos del sistema de recolección de biogás; de manera que para la CA son solo dos ramales (Figura 3.18) y una línea cabecera principal y para la CB es un arreglo tipo antena, con una línea cabecera principal donde se conectan los siete ramales o piernas de tubería de los pozos (Figura 3.19). Conforme al trazado de los conductos, las distancias de los ramales suman 170 m y de tubería principal 350 m para la CB y CA.

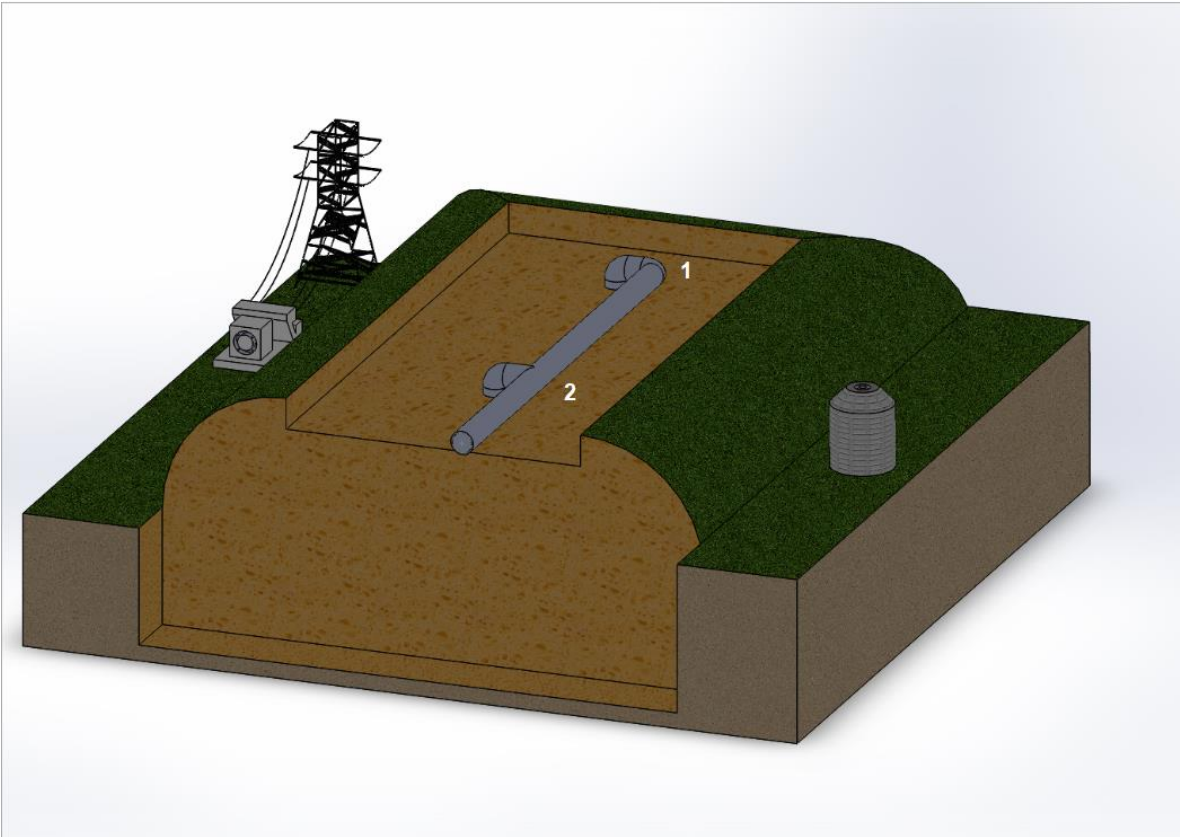


Figura 3.18 Distribución de Pozos de CA

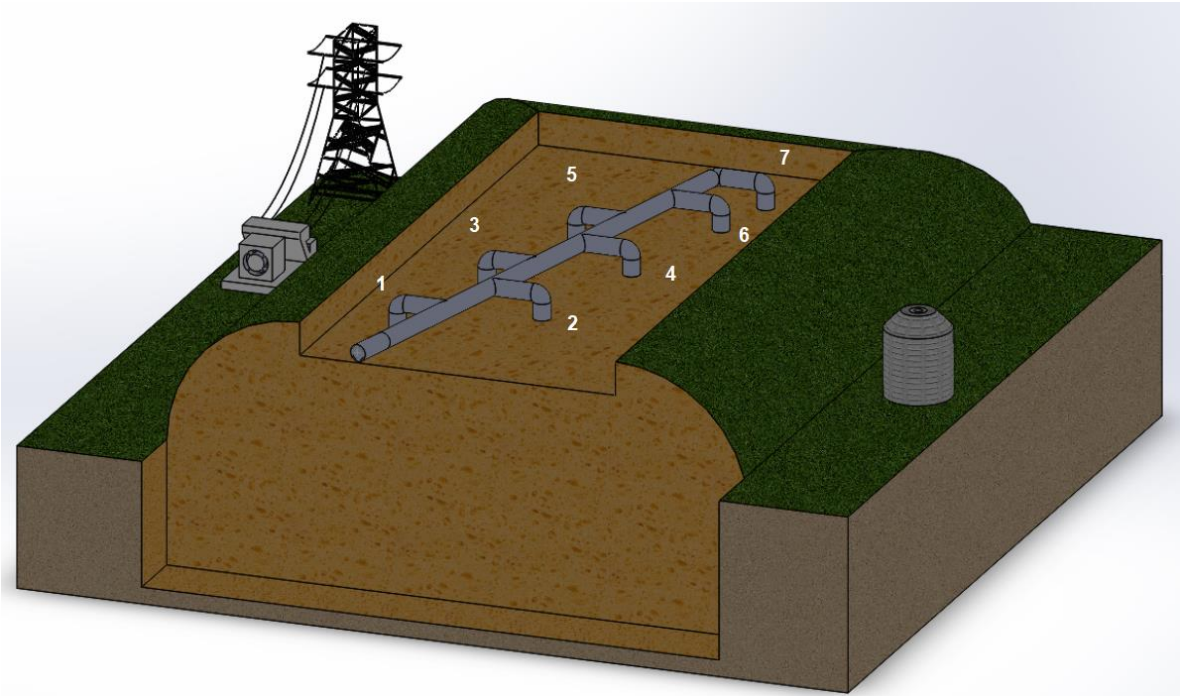


Figura 3.19 Distribución de Pozos de CB

c) Sistema de aprovechamiento y/o destrucción de biogás. El sistema de aprovechamiento comprende principalmente el motogenerador. De acuerdo con la máxima generación de CH₄ para la composición Tejupilco que fue con recirculación en pozos, se tomó como base de flujo medio el alcanzado en el cuarto año (454.14 m³/h, Tabla X) con un 70 % de recuperación (ICREMI, 2013). Con el flujo de 317.90 m³ CH₄ /h se dimensionó el motogenerador requerido para convertirlo a energía eléctrica. La especificación técnica del dimensionamiento de un motogenerador tiene que ver básicamente con la potencia de energía eléctrica que es capaz de generar, para lo cual se utilizaron los criterios que se muestran en la tabla 3.13 y la ecuación 3.1, con un rendimiento térmico medio para la generación eléctrica del 33% (Blanco et al., 2017; FAO, 2011; SENER, 2014).

Tabla 3.13 Criterios para estimación de potencia de metano

PARÁMETROS	VALOR	UNIDAD
Poder calorífico inferior del biogás	5 ^a	Kwh/ m ³
Poder Calorífico de gas natural con 93% de CH ₄	41 041.00 ^b	kJ/m ³
Poder Calorífico CH ₄	44 130.11 ^b	kJ/m ³
	61 291.82 ^b	kJ/kg
Densidad CH ₄	10.00 ^c	Kwh/ m ³
	0.72 ^c	kg/m ³
Flujo CH ₄ (a partir 4º. Año con 75% de recuperación)	3.41	m ³ /h
	2.45	kg/h

Fuente: ^{a)} Blanco *et al.*, 2017; ^{b)} SENER, 2014; ^{c)} FAO, 2011.

$$Potencia\ disponible\ [kW] = \eta t * PCI\ biogás * Q\ biogás \quad (Ec.\ 3.1)$$

Donde:

ηt : Rendimiento térmico de la generación eléctrica (Asume valores de 25, 33, y 40% para los escenarios bajo, medio, y alto, respectivamente)

PCI biogás: Poder calorífico inferior del biogás [kWh/m³]

Q biogás: Caudal de biogás capturado [m³/h] (Escenarios bajo, medio, y alto)

Considerando entonces que el CH₄ recuperado representa el 50% del biogás recuperado, la potencia disponible para generación eléctrica es el rango medio (Figura 3.20) es:

$$Potencia\ disponible\ [kW] = 0.33 * \frac{5kW\ h}{m^3} * \frac{317.90 \frac{m^3}{h}}{0.5} = 1049.06\ kW$$

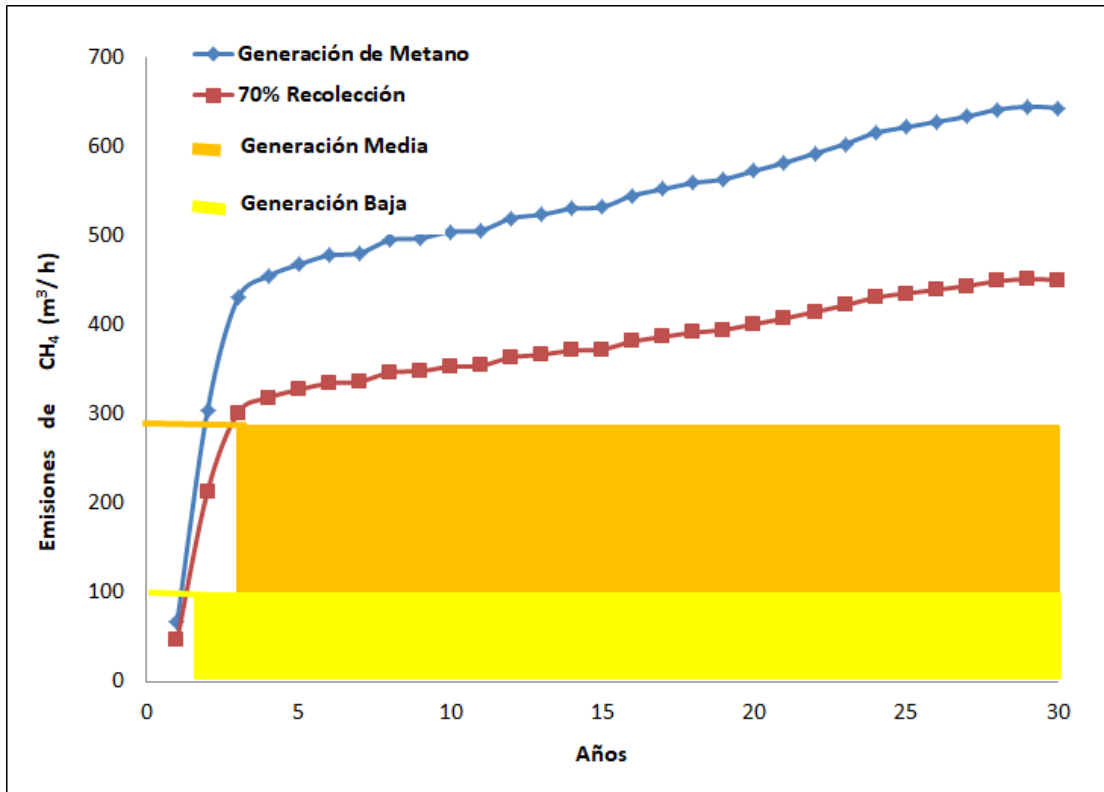


Figura 3.20 Recuperación de emisiones de CH₄ en rangos bajo y medio

El motogenerador requerido con un factor del 20 % de sobre diseño es de 1258.87 kW. La energía eléctrica por generar se estimó en función de la Potencia disponible y un factor de disponibilidad de 85 % por mantenimiento según la ecuación 3.2 (Blanco *et al.*, 2017).

$$Electricidad\ [kW/año] = Potencia\ disponible\ [kW] * 0.85 * 8760 \frac{h}{año} \quad (Ec. 3.2)$$

$$\begin{aligned} Electricidad\ [kW/año] &= 1\ 049.06\ kW * 0.85 * 8760 \frac{h}{año} \\ &= 7\ 811\ 315.31\ kW/año \\ &= 7\ 811.32\ MWh/año \end{aligned}$$

d) Recirculación de lixiviados. Para favorecer la biodegradación acelerada de la fracción orgánica de los RSU dispuestos en las CA y CB se optó por la inyección de lixiviados en los pozos mediante un vehículo con un tanque de al menos 16 m³ denominado Pipa, el cual adicionará con ayuda de una manguera 14 y 42 m³/semana (2 y 6 m³/d, Tabla 2.7) en los pozos de las CA y CB respectivamente, durante el periodo de 30 años.

En la tabla 3.14 se presenta la generación de lixiviados obtenida con Moduelo 4.0 para CA y CB, ya que se definió una fosa de captación para cada una.

Tabla 3.14 Generación de Lixiviado en Moduelo 4.0 de CA RP

AÑO	Caudal generado (m3/mes)	Caudal Recirculado m3/mes	Caudal por almacenar (m3)
1	0	-----	0
2	0	-----	0
3	9.033681401		108.4041768
4	197.2969268	64	305.7011036
5	187.414133	64	123.414133
6	308.4338508	64	244.4338508
7	300.3023631	64	236.3023631
8	296.5507717	64	232.5507717
9	307.5231802	64	243.5231802
10	321.529554	64	257.529554
11	318.6537177	64	254.6537177
12	314.608349	64	250.608349
13	313.3487871	64	249.3487871
14	312.5797158	64	248.5797158
15	312.2610304	64	248.2610304
16	312.9863906	64	248.9863906
17	306.11107	64	242.11107
18	249.7458583	64	185.7458583
19	245.240842	64	181.240842
20	243.9705106	64	179.9705106
21	239.957403	64	175.957403
22	238.5554789	64	174.5554789
23	237.1742359	64	173.1742359
24	235.2466958	64	171.2466958
25	222.0241613	64	158.0241613
26	189.2294594	64	125.2294594

Tabla 3.14 Generación de Lixiviado en Modulo 4.0 de CA RP (continuación)

AÑO	CAUDAL PRODUCIDO (m ³ /mes)	CAUDAL RECIRCULADO (m ³ /mes)	CAUDAL POR ALMACENAR (m ³)
27	121.4463697	64	57.44636971
28	76.03801561	64	12.03801561
29	67.94170859	64	3.941708591
30	71.66030916	64	7.660309162

Se observa en la tabla anterior, que el caudal del año 4 es el mayor, de acuerdo con la Ec. 3.3, el volumen de la Fosa A fue:

$$\text{Volumen de Fosa A (m}^3\text{)} = \text{Volumen máximo acumulado (m}^3\text{)} * \text{Factor de Seguridad (Ec. 3.3)}$$

$$\text{Volumen de Fosa A (m}^3\text{)} = 305.7 \text{ (m}^3\text{)} * 1.2 = 366.8 \text{ (m}^3\text{)}$$

Considerando una altura de h_A y dos lados de magnitud L_1 y L_2 se dimensionó la Fosa A considerando un prisma rectangular y se procedió a calcular el volumen deseado, como se muestra en la tabla 3.15.

Tabla 3.15 Dimensionamiento de la Fosa A

Fosa A				
h_A (m)	L_1 (m)	L_2 (m)	Área (m ²)	Volumen (m ³)
3.0	15.5	7.89	$L_1 \text{ (m)} * L_2 \text{ (m)}$	366.9

Para la Fosa B se procedió a su dimensionamiento del mismo modo que a la Fosa A y en la tabla 3.16 se presenta el lixiviado generado durante el periodo de operación de 30 años.

Tabla 3.16 Generación de Lixiviado en Moduelo 4.0 de CB RP

AÑO	Caudal generado (m3/mes)	Caudal Recirculado m3/mes	Caudal por almacenar (m3)
1	7.9296525		95.15583
2	12.521201		245.410242
3	21.212842		499.964346
4	462.657777	192	962.622123
5	439.484246	192	247.484246
6	723.254619	192	531.254619
7	704.187682	192	512.187682
8	695.39093	192	503.39093
9	721.119253	192	529.119253
10	753.961785	192	561.961785
11	747.218444	192	555.218444
12	737.732836	192	545.732836
13	734.779297	192	542.779297
14	732.975957	192	540.975957
15	732.228695	192	540.228695
16	733.929623	192	541.929623
17	717.808098	192	525.808098
18	585.641395	192	393.641395
19	575.077908	192	383.077908
20	572.099284	192	380.099284
21	562.689155	192	370.689155
22	559.401884	192	367.401884
23	556.163108	192	364.163108
24	551.643442	192	359.643442
25	520.638795	192	328.638795
26	443.740873	192	251.740873
27	284.801215	192	92.8012146
28	178.326537	---	178.326537
29	159.342009		159.342009
30	168.06432		168.06432

El caudal del año 4 es el mayor conforme a la tabla 3.21 y de acuerdo con la Ec. 3.34, el volumen de la Fosa B fue:

$$\text{Volumen de Fosa A (m}^3\text{)} = \text{Volumen máximo acumulado (m}^3\text{)} * \text{Factor de Seguridad (Ec. 3.4)}$$

$$\text{Volumen de Fosa A (m}^3\text{)} = 962.6 \text{ (m}^3\text{)} * 1.2 = 1155.1 \text{ (m}^3\text{)}$$

Considerando una altura de h_B y dos lados de magnitud L_3 y L_4 , se dimensionó la Fosa B preservando lo considerado en la Fosa A y se procedió a calcular el volumen deseado, como se muestra en la tabla 3.17.

Tabla 3.17 Dimensionamiento de la Fosa B

Fosa B				
h_A (m)	L_1 (m)	L_2 (m)	Área (m^2)	Volumen (m^3)
5.0	16.7	13.88	L_1 (m) * L_2 (m)	1 155.9

Ambas Fosas no deben desbordarse ni secarse; ésto último es porque deben ser recubiertas con geomembrana de HPDE para evitar la infiltración de lixiviados al subsuelo. Con la finalidad de facilitar el trabajo de excavación de las fosas, se consideraron a éstas trapezoidales que permitieran una construcción estable y de que son de uso común, diseñadas de manera invertida y de superficie cuadrada, fueron dimensionadas en función del volumen calculado en las tablas 3.20 y 3.22 para Fosa A y Fosa B la cuales se muestran en las figuras 3.21 a) y 3.21 b).

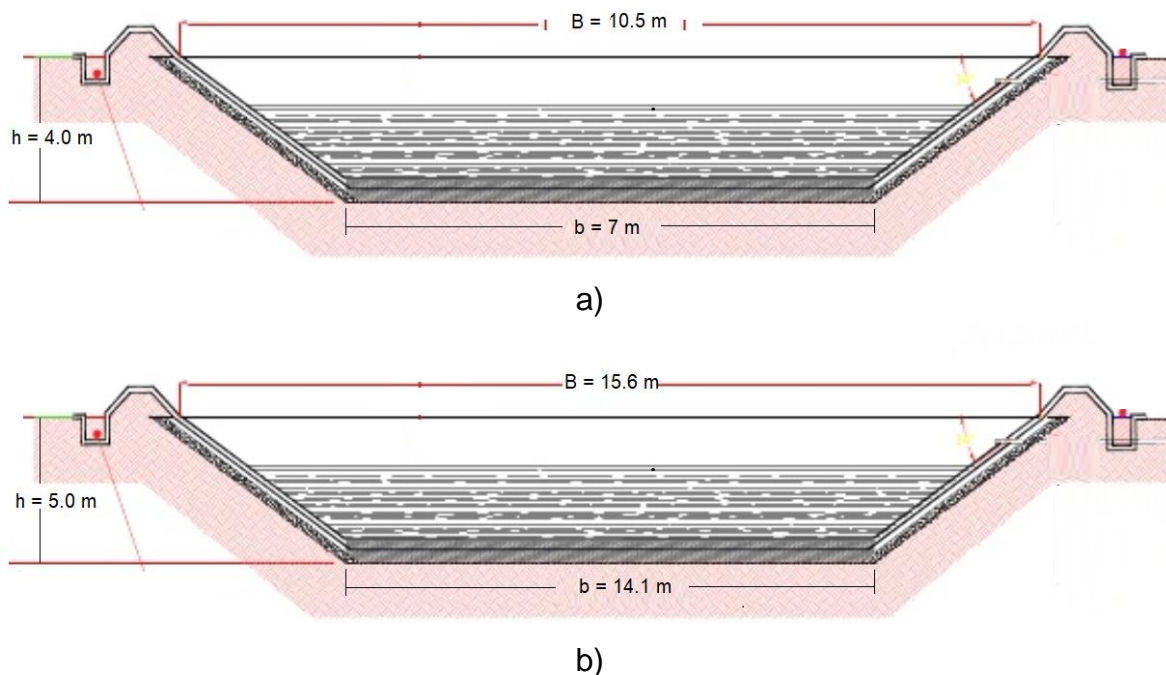


Figura 3.21 Fosas trapezoidales; a) Fosa A; b) Fosa B

En la tabla 3.18 se presentan las dimensiones de las fosas trapezoidales A y B, donde los volúmenes requeridos se obtuvieron del dimensionamiento de un prisma rectangular como caso ideal.

Tabla 3.18 Dimensiones de Fosas A y B

FOSA/DIMENSIONES	h (m)	B (m)	b (m)	VOLUMEN (m ³)	VOLUMEN REQUERIDO (m ³)
A	4.0	10.5	7.0	367.5	366.9
B	5.0	15.6	14.1	1 158.3	1 155.9

3.5 EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE UN RELLENO SANITARIO INTERMUNICIPAL SUSTENTABLE

De acuerdo con el dimensionamiento de los principales componentes de un sistema de aprovechamiento de biogás para los mejores escenarios de las CA y CB del RESA intermunicipal, se realizó la evaluación técnico-económica de la propuesta de diseño.

3.5.1 Selección del sistema de aprovechamiento de biogás

Para la selección de los equipos se hizo uso de los trabajos de INCREMI, (2013), SCS, (2013) y de SAGARPA & FIRCO, (2007), para una operación de 24 horas los 365 días al año.

a) Sistema de captación de biogás. Se seleccionó tubo de PVC de 6" de diámetro para los pozos de extracción del biogás con ranuras verticales. Debido a que por diseño se recomienda que un 20 % de los pozos cuenten con bombas de extracción de lixiviados, se requerirá con un equipo de extracción dual, es decir una bomba para la CA y otra para la CB, que darán servicio a los dos y siete pozos de cada celda. Cada tres pozos se tendrá un cabezal con puntos de muestreo y válvula de control, además de tres trampas de condensados en el sistema, las cuales pueden

contar con un cárcamo de bombeo, para drenarse instantáneamente. Como las celdas tipo son independiente, entonces la CA tendrá un cabezal y una trampa de condensados, mientras que la CB contará con dos.

b) Sistema de conducción de biogás. Se eligió tubería de HDPE para la red de conducción del biogás que estará sobre el suelo, la cual conforme a la colocación de los pozos y al trazado de los conductos, para las CA y CB (Figura 3.22), requiere 170 m de tubería de 4" para ramales y 350 m de tubería principal de 6", además de otros elementos que integran un sistema de recolección.

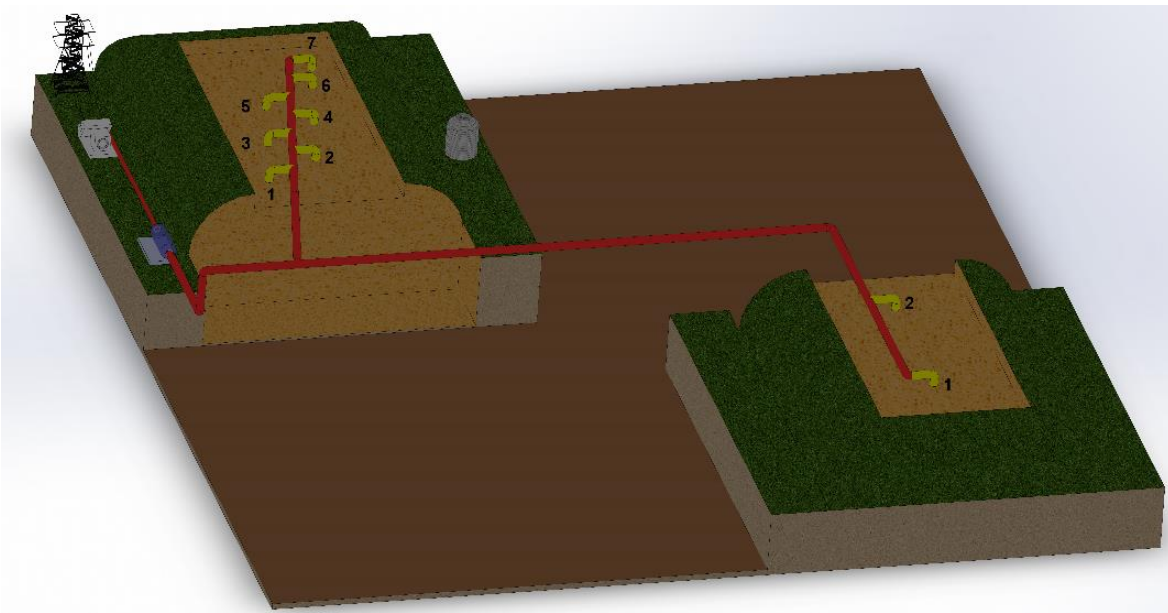


Figura 3.22 Sistema de Conducción de Biogás

c) Sistema de aprovechamiento y/o destrucción de biogás. Este sistema es tan importante como los sistemas de captación y conducción; el cual además del motogenerador dimensionado para una Potencia disponible de 1258.87 kW (1260 kW por redondeo) requiere del siguiente equipo, que puede adquirirse en unidades de paquete:

- Bombas Centrífugas o Sopladores (equipo de extracción de biogás dual). Algunas de las marcas en el mercado son EG&ROTRON y Continental industries.

- Sistema de Purificación o Tratamiento (Remoción de Condensados, H₂S, y Siloxanos).
- Compresión y Dosificación.
- Sistema de Destrucción (quemado en antorcha)
- Subestación Eléctrica.

d) Recirculación de lixiviados. Esta operación puede realizarse con un sistema de bombeo hasta los pozos destinados para la inyección de lixiviados, o bien con un vehículo tipo Pipa marca FAMSA, motor Mercedes Diesel de 170 HP, que incluye un tanque de 16 m³ de capacidad; el cual puede también utilizarse para regar los caminos, ayudar a la compactación de los materiales para terraplenes, coberturas y para una emergencia el traslado de lixiviados de la fosa hacia donde se indique. Dado que se estableció la recirculación en la CA de 2m³/día y en la CB de 6.00 m³/día, y no es operativamente viable hacerlo diariamente, se planteó que para la CA la Pipa en un día inyectaría lo equivalente a una semana (14.00 m³/semana) y, para la CB que se requieren 42 m³/semana, lo haría en tres días.

3.5.2 Análisis económico del sistema de aprovechamiento de biogás

Para estimar los costos de inversión de los principales equipos y componentes del sistema de aprovechamiento de biogás se consideraron experiencias semejantes, usando la herramienta conocida como Estimación Análoga (Top Down), la cual emplea la Regla de los seis décimos que muestra la ecuación 3.5 (Jiménez, 2003; Ulrich et al, 1992).

$$I_2 = I_1 \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^{0.6} \quad (\text{Ec. 3.5})$$

Donde:

I_2 : Inversión del equipo a la capacidad deseada escalada (Q_2)

Q_2 : Capacidad deseada escalada

I_1 : Inversión del equipo a la capacidad reportada (Q_1)

Q_1 : Capacidad reportada

Para el costo de inversión Q_2 escalado es de un año diferente al deseado, se utilizó la ecuación 3.4 con los Índices Anuales reportados en la revista Chemical Engineering para los años 2013 y 2014 (CE, 2016; CE, 2017).

$$I_{2a} = I_{1a} \left(\frac{CE_{año\ 2a}}{CE_{año\ 1a}} \right)^{0.6} \quad (\text{Ec. 3.6})$$

Donde:

I_{2a} : Inversión del equipo al año actual o requerido

$CE_{año\ 2a}$: Índice anual al año presente o año requerido, escalado en el tiempo

I_{1a} : Inversión del equipo reportado (Q_1)

$CE_{año\ 1a}$: Índice anual al año en que se reporta la I_{1a}

Gracias a la información proporcionada por personal del RESA X fue posible estimar los Costos de Inversión para la excavación de los vasos de las CA y CB, los pozos de venteo y el sistema de drenado de lixiviados al año 2017, incluyendo las fosas de lixiviados, los cuales se detallan en la tabla 3.19 y suman \$ \$37,708,982.99 (Treinta y siete millones setecientos ocho mil novecientos ochenta y dos pesos 99/00 MN).

Tabla 3.19 Costo de Inversión de Excavación de Vasos, pozos de venteo y drenado de lixiviados

CONCEPTO	RANGO DE COSTOS	COSTOS RESA X (\$)	UNIDADES	CA		CB	
				CANTIDAD	COSTO	CANTIDAD	COSTO
Topografía	\$ 4.00-5.00 /m ²	4.50	m ²	6300.00	\$ 28,350.00	15124.02	\$ 68,058.09
Estudios Geotécnicos (Completo)	\$ 220 000.00-\$230 000.00	225,000.00	Paquete	1	\$ 225,000.00	1	\$ 225,000.00
Excavación mecánica de vaso	\$32.00-\$38.00/m ³	35.00	m ³	204194.45	\$ 7,146,805.75	314954.82	\$ 11,023,418.70
Acarreo (material extraído)	\$20.00-\$24.00/m ³	22.00	m ³	265452.79	\$ 5,839,961.38	409441.26	\$ 9,007,707.72
Geomembrana (HDP, 5mm)	\$ 85.00-92.00 /m ²	90.00	m ²	12094.91	\$ 1,088,541.90	18904.78	\$ 1,701,430.20
Capa de Cobertura Inicial (suelo)	\$70.00-\$73.00/m ³	73.00	m ³	2661.74	\$ 194,307.02	5571	\$ 406,683.00
Desplante de Pozos	\$9000.00-9200.00 /pozo	9,000.00	Piezas	2	\$ 18,000.00	7	\$ 63,000.00
Piedra Braza pozos	\$700.00-750.00 /m ³	750.00	m ³	70	\$ 52,500.00	218	\$ 163,500.00
Tubo PVC y Malla	\$450.00-500.00 /m lineal	450.00	m	70	\$ 31,500.00	218	\$ 98,100.00
Quemadores	\$6500.00-7000.00 /quemador	6,500.00	Piezas	2	\$ 13,000.00	7	\$ 45,500.00
Tubería HPDE 6"	\$300.00-350.00 tramo de 6 m	58.33	m	90	\$ 5,250.00	100	\$ 5,833.33
Piedra Braza dren lixiviados	\$700.00-750.00 /m ³	750.00	m ³	90	\$ 67,500.00	100	\$ 75,000.00
Excavación mecánica de fosa	\$32.00-\$38.00 /m ³	35.00	m ³	367.50	\$ 12,862.50	1158.30	\$ 40,540.50
Geomembrana de vaso (HDP, 5mm)	\$ 85.00-92.00 /m ²	90.00	m ²	189.00	\$17,010.00	495.81	\$ 44,622.90
Subtotales					\$ 14,740,588.55		\$ 22,968,394.44
TOTAL							\$ 37,708,982.99

En la tabla 3.20 se listan los costos en USD de los equipos y componentes necesarios para el Sistema de aprovechamiento del CH₄ en un RESA a las capacidades reportadas en los trabajos de SCS, (2013) e INCREMI, (2013), así

como el escalamiento a las capacidades requeridas para CA+CB para 2013 en USD (Ec. 3.3) y al año 2017 (Ec. 3.4). La inversión total al 2017 en Pesos Mexicanos (MN), considerando un valor de \$20.00 MN por USD se estimó de \$46 302 122.34 (Cuarenta y seis millones trecientos dos mil ciento veintidós pesos 34/00 MN).

Los Costos de Inversión por la Excavación de los Vasos, el levantamiento de los pozos de venteo y la construcción del drenado de lixiviados, deben tomarse en cuenta cuando menos un año antes de iniciar la disposición de los RSU del Clúster 3, o sea en el 2019. Así mismo, los Costos de Inversión del equipo e infraestructura para el aprovechamiento del biogás deben considerarse al tercer año de su operación (2022) para poder extraer el biogás al año cuatro cuando se clausuren las CA y CB; mientras que, si se disponen los RSU sin el 80% de reciclable, se clausurarán al año 15, por lo que el Sistema de aprovechamiento de biogás deberá adquirirse en el 2033 (Anexo I).

Los costos de operación de un RESA comprenden la Disposición de los RSU en las celdas CA y CB, los cuales engloban la mano de obra (MO) del personal especializado y de operadores, la operación y el mantenimiento de la maquinaria y equipo para esparcir, compactar y cubrir con suelo los RSU, y los Gastos Administrativos. Estos costos son para los años del 2020 a mediados del 2028 para recibir los RSU del Clúster 3 y del 2020 a inicios del 2034 cuando se han extraído el 80% de reciclables. Para el caso de un RESA donde se realiza la recirculación de lixiviados en pozos mediante una Pipa, estos gastos también son de operación e incluyen principalmente el salario del chofer, el mantenimiento y el combustible utilizado. Estos costos se tomaron en cuenta a partir del año en que se clausuran las CA y CB, que es el 9 (2028) y 15 (2034) para los RSU del Clúster 3 con la composición Tejupilco y ésta sin el 80% de reciclables, respectivamente.

Tabla 3.20 Costos de Inversión para Sistemas de aprovechamiento de biogás en RESA

CONCEPTO	UNIDADES	CANCÚN (2013) ^{a)}		SALTILLO (2013) ^{b)}		CA+CB	2013	2017
		CANTIDAD	C/U (DLS)	CANTIDAD	C/U (DLS)	CANTIDAD	C/U (DLS)	PESOS MN
Movilización y gestión	Paquete	1	66,000.00	1	77,000.00	1	77000.00	\$1,540,000.00
Nuevos pozos	Número	11	12,000.00	35	9,000.00	9	3984.26	\$79,685.11
Modificaciones a pozos	Número	30	6,000.00	6	6,218.00	9	7930.59	\$158,611.79
Equipo de extracción dual	Paquete	8	5,000.00	4	5,000.00	2	3298.77	\$65,975.40
Tubería principal	m	1800	70.00	1770	302.00	350	114.20	\$2,283.99
Tubería lateral (ramales)	m	1000	35.00	1197	292.00	170	90.53	\$1,810.61
Trampas de condensado	Número	3	11,000.00	3	10,660.00	3	10660.00	\$213,200.00
Pozos de inspección	Número	1	15,000.00			1	15000.00	\$300,000.00
Válvulas de los cabezales principales	Número	3	2,000.00			3	2000.00	\$40,000.00
Estación de la antorcha	Paquete	1	200,000.00	1	213,200.00	1	213200.00	\$4,264,000.00
Construcción y preparación de la estación de antorcha	Paquete	1	80,000.00	1	310,512.00	1	310512.00	\$6,210,240.00
Motor a biogás	kW	633	1,200.00	2120	1,500.00	1260	1097.77	\$21,955.44
Subestación de la planta	Paquete	1	150,000.00	1	150,000.00	1	150000.00	\$3,000,000.00
Interconexión eléctrica	Paquete	1	150,000.00	1	533,000.00	1	533000.00	\$10,660,000.00
Puesta en marcha	Paquete	1	15,000.00			1	15000.00	\$300,000.00
Prueba de origen o en la fuente	Paquete	2	25,000.00	1	30,000.00	1	30000.00	\$600,000.00
Equipo de medición de biogás	Número	1	35,000.00	1	40,000.00	1	40000.00	\$800,000.00
Costos de ingeniería, contingencias	Paquete	1	152,000.00	1	902,218.00	1	902218.00	\$18,044,360.00
		TOTAL	925,305.00		2,288,902.00		2,315,106.12	\$46,302,122.34

C/U, Costo Unitario DLS USA

Fuente: ^{a)} SCS, 2013; ^{b)} ICREMI, 2013

Debido a que los costos de operación pueden variar según sea la localidad de la República Mexicana, se optó por utilizar los costos proporcionados por el RESA X, los cuales para la Disposición de los RSU en las CA y CB son de \$60.00 a 80.00 por tonelada de RSU dispuesta y \$138,152.00 (Ciento treinta y ocho mil ciento cincuenta y dos pesos 00/00 MN) para la recirculación de lixiviados en pozos en el año 2017 (Tabla 3.21), considerando 56 semanas por año y una inflación anual del 2% (INCREMI, 2013). Estos costos de operación se detallan en el Anexo I.

Tabla 3.21 Gastos para recirculación de lixiviados en 2017

CONCEPTO	RANGO DE COSTOS	COSTO RESA X	UNIDADES	CA		CB	
				CANTIDAD	COSTO (\$/año)	CANTIDAD	COSTO (\$/año)
Salario de chofer por día	\$450.00-500.00 /día	\$500.00 /día	Salario	56	28,000.00	168	84,000.00
Mantenimiento de pipa para RESA	\$350.00-400.00 / semana	\$400.00 /semana	Mantenimiento	28	11,200.00	28	11,200.00
Consumo de gasolina de pipa 15 L /día	\$16.50 - 17.00 / L	16.75	\$/L	56	938.00	168	2,814.00
SUBTOTAL					40,138.00		98,014.00
					TOTAL		138,152.00

Es importante mencionar que para las CA y CB cuando se contempla la disposición de los RSU generados por los municipios del Clúster 3 con la composición Tejupilco sin el 80 % de reciclables, su llenado se completaría a inicios del año 15 (2034), con lo que también se tendrían ingresos del 2020 a inicios del 2034 por la venta de los reciclables (Anexo I). Para la estimación de estos ingresos se consideró el precio promedio de los residuos reciclables que reporta Martínez-Morales (2016) con una inflación del 2% anual, de manera que para el 2017 este precio fue de \$1652.78/Ton y la comercialización del 90% de los reciclables extraídos (80%V).

Otro punto importante son los ingresos por la generación de electricidad y por las reducciones de emisiones de CO₂, las cuales se presentan en el Anexo J. En las tablas 3.22 y 3.23 se concentran los Costos e Ingresos en los años que se

consideraron, así como la sumatoria para inicios del 2050, con el fin de mostrar el panorama general de ambos proyectos para RESA intermunicipal sustentable con los RSU y la composición del Clúster 3.

Tabla 3.22 Costos e ingresos resumidos para RESA con RSU de Clúster 3

CONCEPTO	COSTOS	INGRESOS
Inversión de Excavación de Vasos, pozos de venteo y drenado de lixiviados 2017	\$ 37,708,982.99	
Inversión de Excavación de Vasos, pozos de venteo y drenado de lixiviados 2019*	\$ 39,232,425.91	
Inversión del Sistema de aprovechamiento de biogás 2017	\$ 46,302,122.34	
Inversión del Sistema de aprovechamiento de biogás 2027 (inflación 2% anual) *	\$ 56,442,028.76	
Ingresos por recepción de RSU 2020-2028		\$ 100,419,799.94
Costos por disposición de RSU 2020-2028	\$ 46,862,573.30	
Costos por recirculación de lixiviados 2028-2049	\$ 4,689,273.27	
Ingresos Bonos de Carbono (10 USD) 2028-2049		\$20,876,174.26
Ingresos por Energía Eléctrica (\$3.00/kWh) 2028-2049		\$160,731,414.11
<i>Costos de Inversión total *</i>	<i>\$ 95,674,454.67</i>	
		\$/año
Ingresos por recepción de RSU 2020		10,075,249.98
Ingresos por recepción de RSU 2027 **		13,551,185.69
Ingresos Bonos de Carbono (10 USD) (\$/año) 2028**		133,724.56
Ingresos Bonos de Carbono (10 USD) (\$/año) 2049		1,047,216.54
Ingresos por Energía Eléctrica (\$3.00/kWh) 2028**		1,029,582.18
Ingresos por Energía Eléctrica (\$3.00/kWh) 2049		8,062,808.53
Costos por disposición de RSU 2020	4,701,783.33	
Costos por disposición de RSU 2027**	6,323,886.66	
Costos por recirculación de lixiviados 2028**	171,774.65	
Costos por recirculación de lixiviados 2049	260,353.05	

Tabla 3.23 Costos e ingresos resumidos para RESA con RSU de Clúster 3 sin 80% de valorizables

CONCEPTO	COSTOS	INGRESOS
Inversión de Excavación de Vasos, pozos de venteo y drenado de lixiviados 2017	\$ 37,708,982.99	
Inversión de Excavación de Vasos, pozos de venteo y drenado de lixiviados 2019 **	\$ 39,232,425.91	
Inversión del Sistema de aprovechamiento de biogás 2017	\$46,302,122.34	
Inversión del Sistema de aprovechamiento de biogás 2033 (inflación 2% anual) **	\$63,562,891.66	
Ingresos por recepción de RSU 2020-2034		\$106,841,142.71
Costos por disposición de RSU 2020-2034	\$49,859,199.93	
Costos por recirculación de lixiviados 2034-2049	\$ 4,689,273.27	
Ingresos Bonos de Carbono (10 USD) 2034-2049		\$49,110,269.90
Ingresos por Energía Eléctrica (\$3.00/kWh) 2034-2049		\$378,113,491.06
Ingresos de venta de reciclables 2020-2033		\$833,693,901.94
Costos de Inversión total **	\$102,795,317.57	
		\$/año
Ingresos por recepción de RSU 2020		5,674,380.79
Ingresos por recepción de RSU 2033*		10,049,765.71
Ingresos por venta del 90% Reciclables 2020		44,514,791.89
Ingresos por venta del 90% Reciclables 2033*		78,839,127.22
Ingresos Bonos de Carbono (10 USD) (\$/año) 2034*		450,873.9505
Ingresos Bonos de Carbono (10 USD) (\$/año) 2049		3,648,873.866
Ingresos por Energía Eléctrica (\$3.00/kWh) 2034*		3,471,402.70
Ingresos por Energía Eléctrica (\$3.00/kWh) 2049		28,093,684.66
Costos por disposición de RSU 2020	2,648,044.37	
Costos por disposición de RSU 2033*	4,689,890.66	
Costos por recirculación de lixiviados 2034*	193,446.15	
Costos por recirculación de lixiviados 2049	260,353.05	

Los Costos de operación anual pueden estimarse mediante la ecuación 3.5 (Jiménez, 2003), donde a es un factor que considera gastos anuales como regalías, mantenimiento, etc., los cuales no se conocen a este nivel de diseño preliminar, de

manera que se estimaron como el 10 % del costo de Inversión total. Los otros términos como bMP son costos de materias primas, cE costos de energía, dMO costos de mano de obra; que para este caso están incluidos en los Costos por disposición de RSU y los Costos de recirculación de lixiviados. El término pSP se refiere a la venta de subproductos, lo cual ocurre cuando se considera la venta del 90% de reciclables.

$$C = a I + bMP + cE + dMO - pSP \quad (\text{Ec. 3.7})$$

Para la disposición de los RSU del Clúster 3 en el RESA intermunicipal con y sin el 80% de residuos reciclables, donde su operación es con recirculación en pozos, los costos de operación son los siguientes:

$$C = \left(\frac{0.1}{\text{año}}\right) * \$ 95,674,454.67 + \$6,323,886.66/\text{año} + \$171,774.65/\text{año}$$

$$C = \$16,063,106.78 / \text{año}$$

$$C (-80\%V) = \left(\frac{0.1}{\text{año}}\right) * \$102,795,317.57 + \$ 4,689,890.66 / \text{año}$$

$$+ \$ 193,446.15 / \text{año} - \$ 78,839,127.22/\text{año} = \$ - 63,676,258.65 / \text{año}$$

Donde $C (-80\%V)$ es negativo gracias a la aportación de la venta de reciclables, lo que significa que los costos se cubren y hay ingresos. Una vez obtenidos los Costos de operación se calculó la Utilidad Bruta o Beneficio Bruto (R) con la ecuación 3.6; donde S son las Ventas que se obtienen como ingresos por la recepción de RSU en el RESA, por la Energía Eléctrica producida a rango medio con el biogás en el motogenerador a la que se le consideró un precio de \$3.00/kWh y por los Bonos de Carbono, para los que se consideró un precio de 10 USD/Ton de CO₂.

$$R = S - C \quad (\text{Ec. 3.8})$$

$$R = \$13,551,185.69/\text{año} + \$ 1,029,582.18/\text{año} + \$ 133,724.56/\text{año} - \$ 16,063,106.78/\text{año}$$

$$R = \$ -1,348,614.35 / \text{año}$$

El que R sea negativo indica que hay pérdidas debido a que los costos anuales superan a las ventas, por lo que no es posible proseguir con la estimación de la Ganancia Neta (P). Las opciones son buscar estrategias para reducir costos o buscar mejores precios de los Bonos de carbono y del kWh (Blanco *et al.*, 2017; SENER, 2014).

$$\begin{aligned}
 R(-80\%V) &= \$ 10,049,765.71 / \text{año} + \$ 3,471,402.7 / \text{año} + \$ 450,873.95 / \text{año} \\
 &\quad - \$ - 63,676,258.65 / \text{año} \\
 R - 80\%V &= \$ 77,648,301.01 / \text{año}
 \end{aligned}$$

La $R(-80\%V)$ cuando se recupera el 80% de los reciclables es positiva y rinde un valor interesante, de manera que con la ecuación 3.7 se estimó $P(-80\%V)$.

$$P(-80\%V) = R - eI - t(R - dI) \quad (\text{Ec. 3.9})$$

Donde:

$P(-80\%V)$, es la utilidad neta

e , es el factor de depreciación para fines contables (0.1)

d , es el factor de depreciación para fines de impuestos (0.1)

t , es la tasa de impuesto (0.33)

$$\begin{aligned}
 P(-80\%V) &= \$ 77,648,301.01 / \text{año} - 0.1 * \$ 102,795,317.57 \\
 &\quad - 0.33(\$ 77,648,301.01 / \text{año} - 0.1 * \$ 102,795,317.57)
 \end{aligned}$$

$$P(-80\%V) = \$ 45,137,075.40 / \text{año}$$

Es importante señalar que la operación del RESA intermunicipal cuando recibe los RSU del Clúster 3 sin el 80% de valorizables, además de generar utilidades netas de \$ 45,137,075.40 /año, produce más del doble de electricidad (126,037,830.40 kWh/año) y de reducción de toneladas de CO₂ equivalente (245 551.34 Ton CO_{2e}) en 16 años, que cuando opera con los RSU mezclados.

2.5.3 Análisis de sensibilidad

Para obtener la viabilidad económica del RESA intermunicipal sustentable que recibiría los RSU del Clúster 3 sin 80% de reciclables, se hizo uso de las ecuaciones 2.1 a 2.3, para estimar RI , RCB y VPN con un 8% de tasa de interés (FAO, 2011); así como de las ecuaciones 3.8 y 3.9 para calcular el Beneficio Extra (V) para un Beneficio Mínimo (i_{min}) de 0.4 y el Tiempo de recuperación de capital (TR) (Jiménez, 2003; SAGARPA & FIRCO, 2007).

$$RI = \frac{\$ 45,137,075.40 / \text{año}}{\$ 102,795,317.57} * 100 = 43.91 \%$$

$$RCB = \frac{(10,049,765.71 + 78,839,127.22 + 3,471,402.70 + 450,873.95)}{(4,689,890.66 + 193,446.15)}$$

$$RCB = 6.12$$

$$VPN = \frac{\$45,137,075.40 / \text{año}}{(1+0.08)^{16}} = \$ 13,175,082.04 / \text{año}$$

$$V = P - i_{min} * I \quad (\text{Ec. 3.8})$$

$$V = \$45,137,075.40 / \text{año} - 0.4 * \$ 102,795,317.57 = \$4,018,948.37 / \text{año}$$

$$TR = \frac{I}{P + eI} \quad (\text{Ec. 3.9})$$

$$TR = \frac{\$ 102,795,317.57}{\$45,137,075.40 / \text{año} + 0.1 * 102,795,317.57} = 1.85 \text{ años}$$

De acuerdo a los valores obtenidos, el proyecto es atractivo pues presenta un retorno de la inversión mayor al valor mínimo establecido del 40 % ($RI > i_{min}$) y el Rango Costo Beneficio (RCB) además de ser mayor de uno es amplio (6.12)..

En cuanto al VNP, es positivo, lo que significa que se obtiene la tasa requerida del 8% y una suma como un extra. Como $RI > i_{min}$, entonces $V > 0$, corroborando lo obtenido con el VNP; mientras que el valor de TR (1.85 años) indica que en menos de 2 años los inversionistas recuperarán todo el capital invertido, si el total de las utilidades se les entregan, lo cual es atractivo pero no recomendable, pues el proyecto requerirá que parte de ellas se reinviertan.

4. CONCLUSIONES

- El utilizar los Análisis de Clúster (jerárquico y K-medias) y el método de Ponderación Lineal, el trabajo de campo se redujo, permitiendo identificar aquellos municipios que poseen características similares y así caracterizar un municipio representativo de cada Clúster.
- Se caracterizaron y se calcularon los porcentajes de subproductos los SDF de Tejupilco, Huitzilac y Pilcaya, los cuales difieren significativamente en cuanto a la FO y materiales revalorizables; a pesar de que el sector primario predomina en esta zona, es evidente de que los patrones de consumo son variables y la importancia de conocer los componentes de cada municipio es vital para mejorar la gestión integral de los RSU.
- De acuerdo con la caracterización de RSU en el SDF de Tejupilco, el 43.7% de RSU corresponden a materiales revalorizables y considerando el 80% de la recolección diferenciada, la vida útil del RESA Intermunicipal Sustentable aumenta de 8 a 14 años lo que beneficiaría a la MIRSU en este municipio del EdoMex.
- A través de dos modelos de terreno ya establecidos (CA y CB) y bajo los parámetros de calibración del RESA X, Modulo 4.0 permitió simular 24 diferentes escenarios de disposición de RSU correspondientes al Clúster 3, representado por el municipio de Tejupilco, así como elaborar las dinámicas de generación de CH₄, contenido de humedad, DQO, DBO y NH₃.
- El RESA Intermunicipal diseñado con CA y CB para los RSU con 80% de revalorizables, al operar con recirculación en pozos es viable técnica, económica y ambientalmente, por lo que cumple con el objetivo de ser sustentable.

5. REFERENCIAS

- Aguilar Virgen, Q., Taboada-González, P. A., Ojeda-Benítez, S. (2011). Modelo mexicano para la estimación de la generación de biogás. Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 15, No. 1, 2011, ISSN 1665- 529X. México.
- Andrés A., Fernández P., Natalia P., Mario C., Cintia R., Jorge T., Claudia B. (2012). Revalorización de residuos y recuperación de espacios verdes. Revista electrónica Ext. Vol.2. Núm.2.
- Bagchi, A. (2004). Desing of landfills and integrated waste management. 3rd ed. pp:119-125.
- Bareither, C. A. (2010). Performance of North American Bioreactor Landfills I: Leachate Hydrology and Waste Sttlement. JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING, pp. 824-838.
- Bernache, P. G. (2006). Cuando la basura nos alcance. El impacto de la degradación ambiental.
- Blanco, G., Santalla, E., Córdoba, V., Levy, A. (2017). Generación de electricidad a partir de biogás capturado de residuos sólidos urbanos. Un análisis teórico-práctico. Nota técnica N° IDB-TN-1260. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Energía. <https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/8202/Generacion-de-electricidad-a-partir-de-biogas-capturado-de-residuos-solidos-urbanos-Un-analisis-teorico-practico.PDF?sequence=1>
- Buenrostro-Delgado, O., Mendoza, M., & López-Granados, E. (2005). Análisis comparativo de tres modelos de soporte de decisiones espaciales en la selección de sitios para rellenos sanitarios en la cuenca del lago de Cuitzeo, México. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, 57, 18.

- Buenrostro, D. O., & Oakley, S. (2013). El relleno de tierra controlado como alternativa a los tiraderos a cielo abierto para mejorar la disposición final de los residuos sólidos urbanos en los países en vías de desarrollo. *VSIR-REDISA*, 6.
- Buenrostro, O., & Bocco, G. (2003). Solid waste management in municipalities in Mexico: goals and perspectives. *Resources, Conservation and Recycling*, 39, 251-263.
- CESOP (Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública, Cámara de Diputados LXI Legislatura). (2012). *Residuos Sólidos Urbanos en México*.
- CFE (Comisión Federal de Electricidad). (2012). *Generación de electricidad mediante residuos sólidos urbanos*.
- Chemical Engineering (CE). 2016. *Electronic Journal*, www.chemengonline.com. December 2017 (Fuente electrónica, último acceso 25/nov/2017).
- Chemical Engineering (CE). 2017. *Electronic Journal*, www.chemengonline.com. December 2017 (01/dic/2017).
- Colomer, F.J., Esteban, J., Gallardo, A. (2013) *LABWASTE.12: Calculation Tool for the Design of Solid Waste Landfills with Inert Waste Recovery*. Project Management and Engineering (Select Papers from 17th International Congress on Project Management and Engineering -AEIPRO 2013).
- Consejo Nacional de Población (CONAPO). (2017). www.conapo.com.mx (Fuente electrónica, último acceso 17/sept/2017)
- Cuartas, M. (2012). *Optimización del diseño de vertederos de residuos sólidos basada en modelización*. (Tesis Doctoral), Universidad de Cantabria (Unican), Departamento de Matemática Aplicada y Ciencias de la Computación.
- Demirekler E. Y., K. Ünlü, R.R. Ferry. (2004). "Modelling leachate quality and quantity in municipal solid waste landfills". *Waste Manage Res.* 22(2): 78-92.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). (1985a). *Residuos Sólidos Municipales - Muestreo - Método de Cuarteo* (pp. 4). México.

- DOF (Diario Oficial de la Federación). (1985b). Selección y Cuantificación de Subproductos (pp. 4). México.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). (2004). Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. México.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). (2015). Decreto por el que se reforma el artículo 47 de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. México.
- EPA (Environmental Protect Agency). (2015). LFG Energy Project Development Hadnbook (pp. 94).
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2011). Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables.
- Foth & Van Dyke. (2004). Update Research Report on Bioreactor Landfills, Landfill Leachate Recirculation and Landfills with Methane Recovery. Foth & Van Dike and Associaties, Inc. September 2004. Eagan, Minnesota, USA.
- Gaggero E., Ordoñez M. (2010). Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos. Subsecretaría de educación. Buenos Aires, Argentina.
- GEM, G. d. E. d. M. (2017). *Programa de Protección Civil para basureros 2016*.
- GENL, G. d. E. d. N. L. (2015). Programa Estatal de Gestión Integral de Residuos de Nuevo León 2009-2015. Retrieved from http://www.semarnat.gob.mx/sites/default/files/documentos/gestionresiduos/pepgir_nuevo_leon.pdf.
- Hernández-Berriel M.C. (2010). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Estabilización Acelerada de Residuos Sólidos Urbanos Mediante Humidificación y Recirculación de Lixiviados. (Tesis doctoral) Morelia, Michoacán, México.

- Hernández-Berriel, Ma. C., Delgado-Hernández, M.C., Lugo de la Fuente, J., Buenrostro-Delgado, O., Márquez-Benavides, L. (2013). Efecto del volumen y frecuencia de la recirculación de lixiviados en el contenido de metales pesados en lixiviados y residuos degradados. V Simposio Iberoamericano de Ingeniería en Residuos Sólidos, REDIGIRS-REDISA. ISBN: 978-987-1323-35-7. Realizado del 15 al 16 de Octubre de 2013. Mendoza, Argentina.
- Hernández-Berriel, Ma. C., Mañón-Salas, C., Buenrostro-Delgado O., Sánchez-Yáñez, J.M., Márquez-Benavides, L. (2014). Landfill leachate recirculation. Part I: Solid waste degradation and biogas production. Environmental Engineering and Management Journal. Print ISSN: 1582-9596. ISSN: 1843-3707. 13(10), 2687-2695.
- Hoornweg, D., & Bhada-Tata, P. (2012). What a Waste. A Global Review of Solid Waste Management. www.worldbank.org/urban
- Ingeniería para el Control de Residuos Municipales e Industriales (INCREMI). (2013). Estudio de Factibilidad para el Aprovechamiento del Metano en el Relleno Sanitario Municipal de Saltillo Coahuila.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2012). Cambio Climático en México. El Mercado de "Bonos de Carbono". <http://cambioclimatico.inecc.gob.mx/sectprivcc/mercadobonoscarbono.html>.
- INECC-SEMARNAT. (2012). Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- INEGI. (2017). Anuario Estadístico y Geográfico de los Estados Unidos Mexicanos 2016 (pp. 921).
- Jaramillo, J. (2012). Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales. Una solución para la disposición final de residuos sólidos municipales en pequeñas poblaciones.
- Jiménez, A. (2003). Diseño de procesos en Ingeniería Química. Reverté, ed 1ª, ISBN: 968-6708-51-0, pp:10-30.

- Karak, T., Bhattacharyya, P., & Das, T. (2013). Non-segregated municipal solid waste in an open dumping ground: A potential contaminant in relation to environmental health. . *International Journal of Environmental Science and Technology*, 10.
- Lobo-García, d. C. A., Hernández-Berriel , M. C., & Mañón-Salas, M. C. (2015). Biorrellenos: Perspectivas tras dos décadas de experiencias en el mundo. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*.
- Martinez-Morales, I. (2016). Reingeniería del Relleno Sanitario de Zinacantepec con la Revalorización de Residuos Sólidos Urbanos. Tesis de Grado, Instituto Tecnológico de Toluca, México.
- Mañón-Salas, C., Moreno-Goytia, E. L., Hernández-Berriel, Ma. C., Márquez-Benavides, L. (2012). Estimation of solid waste biomethanization: development of novel methodology and anfis models. *Applied Artificial Intelligence: An International Journal*. ISSN: 0883-9514. 26, 445–465.
- López, A.; Cuartas, M. y Lobo A. (2013). *Moduelo 4.0 Manual de usuario*.
- Oakley S, Jiménez R. (2012). Sustainable sanitary landfills for neglected small cities in developing countries: The semi-mechanized trench method from Villanueva, Honduras. *Waste Management*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2012.07.030>.
- Red Iberoamericana de Gestión y Aprovechamiento de Residuos (REDISA). (2017). <http://www.redisa.net/> (Fuente electrónica, último acceso: 15/dic/2017).
- Red de Investigadores en Gobiernos Locales Mexicanos A.C. (RIGLM). (2010). *Formación de Servidores Públicos Municipales*. México.
- Reinhart D.R., Mc Creanor P.T., Townsend T.G. (2002). The bioreactor landfill: Its status and future. *Waste Manage Res*. 20.172–186.
- RIGLM (Red de Investigadores en Gobiernos Locales Mexicanos A. C). (2010). *Formación de Servidores Públicos Municipales*.

- Ríos, H. A. (2009). Gestión Integral de los residuos sólidos urbanos. (Título de Ingeniería Civil), Instituto Politécnico Nacional IPN.
- Robles-Martínez, F. (2008) Generación de biogás y lixiviados en los rellenos sanitarios (segunda edición). Dirección de Publicaciones del IPN. México. 115 p. Tiraje programado: 2000 ejemplares. ISBN: 978-970-36-0486-9.
- Sáez, A., Urdaneta G., Joheni A. (2014). Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. *Omnia*, 20, 15.
- SAGARPA & FIRCO. (2007), Aprovechamiento de Biogás para la Generación de Energía Eléctrica en el sector Agropecuario.
- Sánchez-Gómez, J. (2006). Bio-rellenos metanogénicos: opción sustentable para la disposición final de los residuos sólidos. Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica.
- Santander Montes AJ, Ruiz Vaquero R. (2004). Relación entre variables cuantitativas. Cuba:[CD].Informática Médica II. Editorial ECIMED;, p.1-30.
- Schroeder, P. (1994). The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model: Engineering Documentation for Version 3., Whashington, DC (USA).
- Scottish Environment Protection Agency (SEPA). (2004). Guidance on the management of landfill gas, Bristol.
- SCS Engineers. (2013) Estudio de Prefactibilidad Utilización de Biogás de Relleno Sanitario .
- Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL). (2012). Manual técnico sobre la generación y recolección de residuos sólidos urbanos.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2008). Curso Gestión integral de residuos sólidos urbanos y residuos de manejo especial. (Documento Web, último acceso 09/mayo/2016). http://aplicaciones.semarnat.gob.mx/residuos/login.php?going_to=index.php.

- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2014). Identificación de intensidades de carbono industriales, para la gestión climática PRE-2020. Colegio de Ingenieros Ambientales A. C.
- Secretaría de Energía (SENER). (2014). Balance Nacional de Energía. México. pp:24.
- Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología Aplicada a Residuos Sólidos Urbanos (SOMMERS). 2017. <http://www.somers-ac.org/> (Fuente electrónica, último acceso: 12/dic/2017).
- Tchobanoglous G., Theisenand H., Vigil S. 1994. Gestión Integral de Residuos Sólidos. McGraw-Hill-Interamericana de España, S.A. México, D.F. Vol. I, pp. 407-409.
- Ulrich G. 1992. Diseño y Economía de los Procesos de Ingeniería Química. McGrawHill-Interamericana de México S.A. de C.V. ed.1ª.
- Valencia-Vázquez, (2008). Enhanced Stabilisation of Municipal Solid Waste in Biorreactor Landfill. PhD Thesis. Wgeningen University and UNESCO-IHE Institute for Water Education. 12 pp.
- Villafuerte, S. I., Flores, O. D., Guadalupe, G. E., & Zea, A. M. (2004). Evaluación ambiental del relleno sanitario para el santuario histórico de machu picchu y pueblos aledaños. Revista del Instituto de Investigación FIGMMG, 7(14), 54-63.
- Yáñez-García, F. J. 2009. Relleno Sanitario Sustentable para los Residuos Sólidos Urbanos de la Región No. 2 del Estado de Morelos (Municipios de Yecapixtla, Atlatlahucan, Ocuituco y Tetela del Volcán) ubicado en el Municipio Yecapixtla. (Tesis de Licenciatura) Escuela superior de ingeniería y arquitectura, Unidad Zacatenco.
- Yáñez, G. F. J. (2010). Relleno Sanitario Sustentable para los Residuos Sólidos Urbanos de la Región No. 2 del Estado de Morelos (Municipio sde Yecapixtla, Atlatlahucan, Ocuituco y Tetela del Volcán) ubicado en el Municipio de Yecapixtla. (Tesis en Ingeniería Civil), Instituto Politécnico Nacional (IPN).

ANEXO B

Tabla B.1 Datos de variables meteorológicas en rangos de 3 años

^{a)} Fecha	HR	TP	VPV	I	^{b)} PH1-PH24	PD	Tm	Tm
2020/01/01	70	8	6	9	0	0	18	-2
2023/01/01	34	14	2	4	0	0	21	9
2026/01/01	37	11	6	4	0	0	19	5
2029/01/01	74	8	4	5	0	0	18	-2
2032/01/01	52	15	6	9	0	3	22	8
2035/01/01	51	15	6	9	0	3	22	8
2038/01/01	51	15	6	9	0	4	22	9
2041/01/01	50	14	7	9	0	4	22	9
2044/01/01	50	17	7	9	0	4	22	9
2047/01/01	49	17	8	9	0	4	22	10
2050/12/31	49	17	8	9	0	4	22	10

a) Los datos fueron introducidos diariamente del 2020/01/01 hasta 2050/12/31; b) La precipitación horaria va desde las 01:00 hr hasta 00:00 hrs

ANEXO C

Tabla C.1 Análisis de Correlación Pearson

Parámetro	PTM	PTM C	PTM_PT M C	DP	PP203 0	IM	UE	%PP	%PE	RRS U	RESA D	CSTC D	CTCA D	CSD F D	CRESA F	CSTC F	CTCA F	CSD F F	CSD F T
PTM	1	.124	.357	.967	.999	.991	.991	-.691	-.393	.987	.952	-.076	.957	.967	.753	.455	.529	.848	.956
PTMC	.124	1	.970	.186	.137	.070	.133	.433	.517	.140	.120	.694	.015	.107	.419	.446	-.243	.114	.116
PTM_PT M C	.357	.970	1	.412	.371	.307	.364	.572	.581	.372	.345	.637	.244	.334	.583	.539	-.115	.307	.337
DP	.967	.186	.412	1	.969	.961	.984	.752	.499	.980	.984	-.026	.946	.972	.806	.537	.400	.794	.933
PP2030	.999	.137	.371	.969	1	.991	.989	.693	.397	.988	.952	-.059	.951	.964	.766	.467	.511	.843	.952
IM	.991	.070	.307	.961	.991	1	.980	.672	.370	.977	.953	-.127	.944	.954	.728	.469	.535	.843	.946
UE	.991	.133	.364	.984	.989	.980	1	.724	.436	.993	.971	-.076	.975	.987	.762	.481	.489	.828	.958
%PP	-.691	-.433	-.572	.752	-.693	.672	.724	1	.905	-.736	-.718	-.232	-.633	-.688	-.631	-.510	-.059	-.453	-.609
%PE	-.393	-.517	-.581	.499	-.397	.370	.436	.905	1	-.453	-.445	-.358	-.321	-.389	-.509	-.489	.196	-.202	-.318
RRSU	.987	.140	.372	.980	.988	.977	.993	-.736	.453	1	.964	-.068	.962	.976	.766	.465	.444	.793	.935
RESAD	.952	.120	.345	.984	.952	.953	.971	.718	.445	.964	1	-.114	.942	.966	.717	.515	.443	.780	.923
CSTCD	-.076	.694	.637	-.026	-.059	.127	.076	.232	.358	-.068	-.114	1	-.175	-.106	.340	.346	-.524	-.153	-.134
CTCAD	.957	.015	.244	.946	.951	.944	.975	.633	.321	.962	.942	-.175	1	.992	.705	.405	.550	.830	.962
CSDFD	.967	.107	.334	.972	.964	.954	.987	.688	.389	.976	.966	-.106	.992	1	.741	.442	.507	.823	.963
CRESAF	.753	.419	.583	.806	.766	.728	.762	.631	.509	.766	.717	.340	.705	.741	1	.684	.085	.684	.748
CSTCF	.455	.446	.539	.537	.467	.469	.481	.510	.489	.465	.515	.346	.405	.442	.684	1	-.074	.487	.484
CTCAF	.529	-.243	-.115	.400	.511	.535	.489	.059	.196	.444	.443	-.524	.550	.507	.085	-.074	1	.767	.655
CSDFF	.848	.114	.307	.794	.843	.843	.828	.453	.202	.793	.780	-.153	.830	.823	.684	.487	.767	1	.946
CSDFT	.956	.116	.337	.933	.952	.946	.958	.609	.318	.935	.923	-.134	.962	.963	.748	.484	.655	.946	1

ANEXO D

Tabla D.1 Proyección de población 2020-2050

MUNICIPIO/AÑO	1	2	4	6	8	10	14	18	22	26	30
Tejupilco, EdoMex	86 847	88 099	90 608	93 102	95 528	97 870	112 262	160 378	285 358	632 363	1 745 315
Amatepec, EdoMex	28 948	29 256	29 888	30 527	31 155	31 763	34 444	42 521	59 759	95 612	174 149
Sultepec, EdoMex	29 758	30 164	30 992	31 832	32 657	33 457	37 484	50 372	81 192	156 969	363 995
Luvianos, EdoMex	30 903	31 303	32 130	32 976	33 808	34 614	38 152	49 136	73 946	130 031	267 180
Cutzamala de Pinzón, Guerrero	21 824	21 820	21 820	21 812	21 798	21 775	21 789	21 825	21 885	21 966	22 071
TOTAL	198 280	200 646	205 438	210 249	214 946	219 479	227 822	236 735	245 648	254 560	263 473

ANEXO E

Tabla E.1 Proyección de generación de RSU (T/d) para el periodo de operación 2020-2050

MUNICIPIO/AÑO	1	2	4	6	8	10	14	18	22	26	30
Tejupilco, EdoMex	77.73	79.73	83.81	87.98	92.18	96.40	115.07	170.80	315.32	724.04	2068.17
Amatepec, EdoMex	25.91	26.48	27.65	28.85	30.06	31.29	35.30	45.28	66.03	109.47	206.36
Sultepec, EdoMex	26.63	27.30	28.67	30.08	31.51	32.95	38.42	53.65	89.72	179.73	431.33
Luvianos, EdoMex	27.66	28.33	29.72	31.16	32.62	34.09	39.11	52.33	81.71	148.88	316.60
Cutzamala de Pinzón, Guerrero	19.53	19.75	20.18	20.61	21.03	21.45	22.53	23.24	24.18	25.15	26.15
TOTAL	177.46	181.59	190.03	198.68	207.4	216.18	250.43	345.3	576.96	1 187.27	3 048.61

ANEXO F

Tabla F.1 Proyección de generación de RSU (T/año) para el periodo de operación 2020-2050

MUNICIPIOS/AÑO	1	2	4	6	10	14	18	25	30
Tejupilco, EdoMex	27 649.43	28 370.20	29 100. 75	31 348.94	34 416.06	39 368.64	55 337.27	169 707.28	754 881.51
Amatepec, EdoMex	9 253.84	9 456.41	9 663. 80	10 309.04	11 196.34	12 353.42	15 345.92	30 539.34	75 322.61
Sultepec, EdoMex	9 483.83	9 721.01	9 963. 73	10 719.93	11 765.02	13 269.54	17 710.86	45 313.74	157 434.61
Luvianos, EdoMex	9 857.56	10 095.04	10 339. 97	11 108.98	12 176.05	13 594.46	17 503.72	39 488.17	115 560.56
Cutzamala de Pinzón, Gro	7 049.56	7 129.22	7 208. 88	7 445.46	7 753.31	8 070.07	8 399.99	9 001.83	9 546.20
TOTAL	63 294.22	64 771.87	66 277. 12	70 932.36	77 306.78	86 656.13	11 4297.76	294 050.35	1 112 745.49

Tabla F.2 Disposición de RSU (T/año) -80% de valorizables para el periodo de operación 2020-2050

MUNICIPIOS/AÑO	1	2	4	6	10	14	18	25	30
Tejupilco, EdoMex	15572. 1595	15978. 0943	16806. 6982	17655. 7241	19383. 1257	22172. 4157	31165. 9488	95579. 138	425149. .268
Amatepec, EdoMex	5211.7 624	5325.8 4746	5561.8 5581	5806.0 5394	6305.7 7913	6957.4 4734	8642.8 2188	17199. 7584	42421. 6918
Sultepec, EdoMex	5341.2 9237	5474.8 711	5751.0 7553	6037.4 6578	6626.0 5867	7473.4 0529	9974.7 5635	25520. 6965	88667. 1714
Luvianos, EdoMex	5551.7 7859	5685.5 2798	5964.9 3519	6256.5 7667	6857.5 4983	7656.3 998	9858.0 9593	22239. 7362	65083. 7068
Cutzamala de Pinzón, Gro	3970.3 1215	4015.1 7531	4104.5 2545	4193.2 8254	4366.6 6486	4545.0 6359	4730.8 7368	5069.8 2855	5376.4 1999

ANEXO G

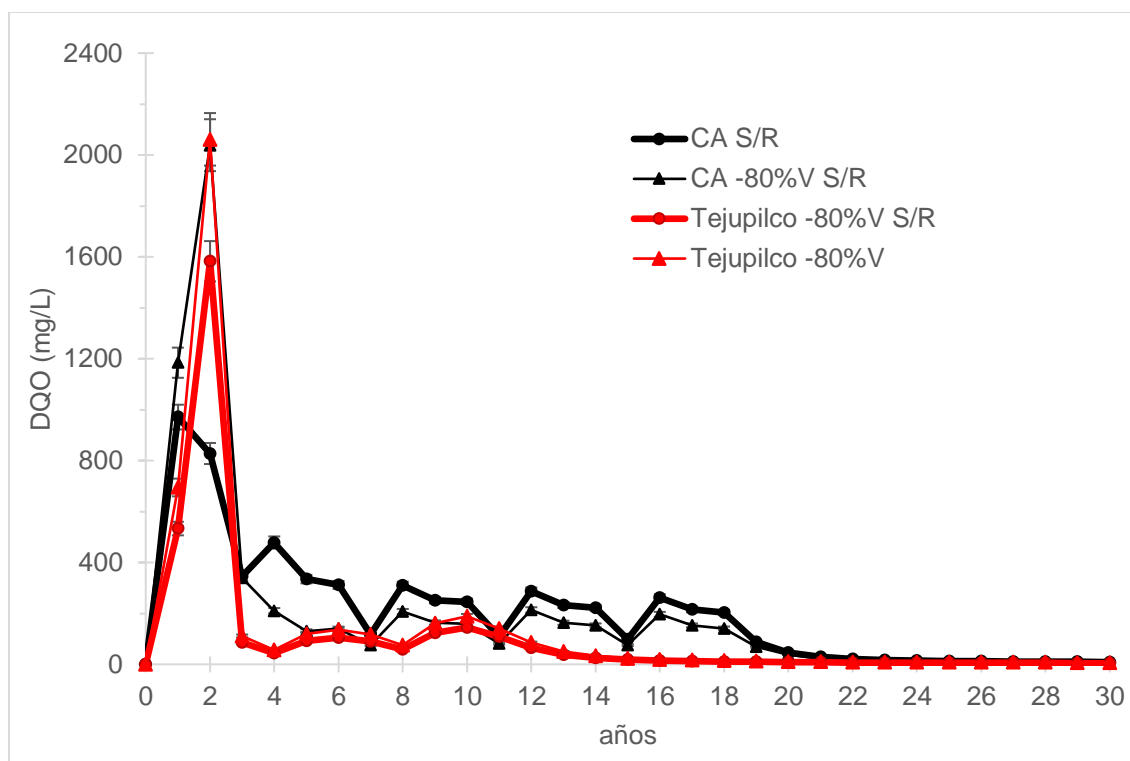


Figura G.1 Dinámica de la DQO de lixiviados en la operación SR de CA

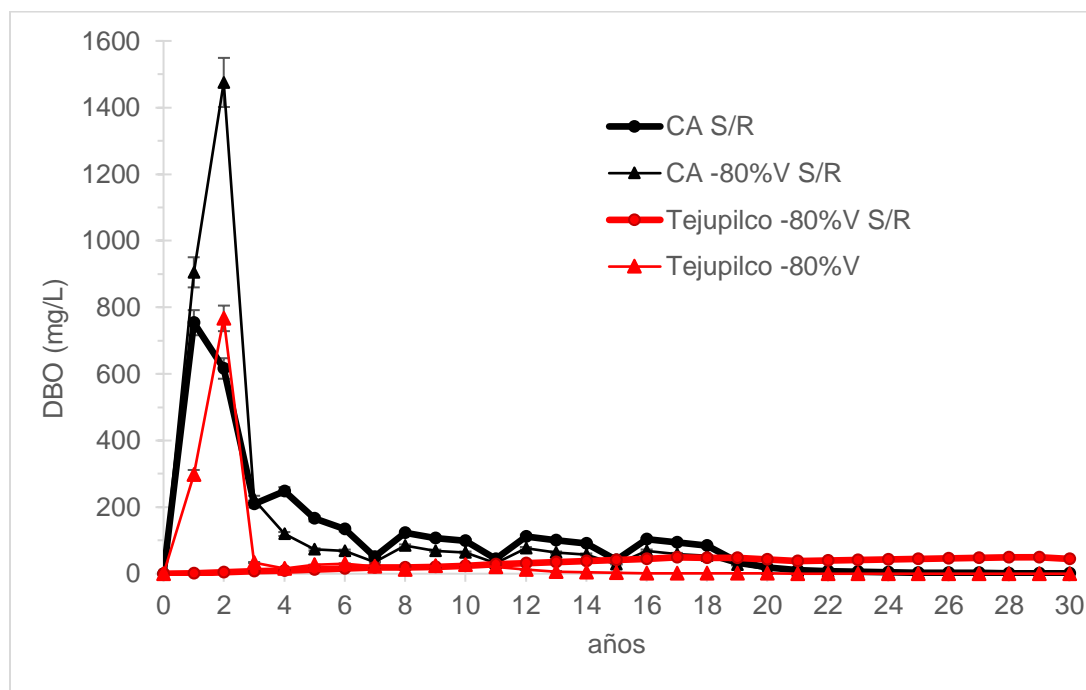


Figura G.2 Dinámica de la DBO de lixiviados en la operación SR de CA

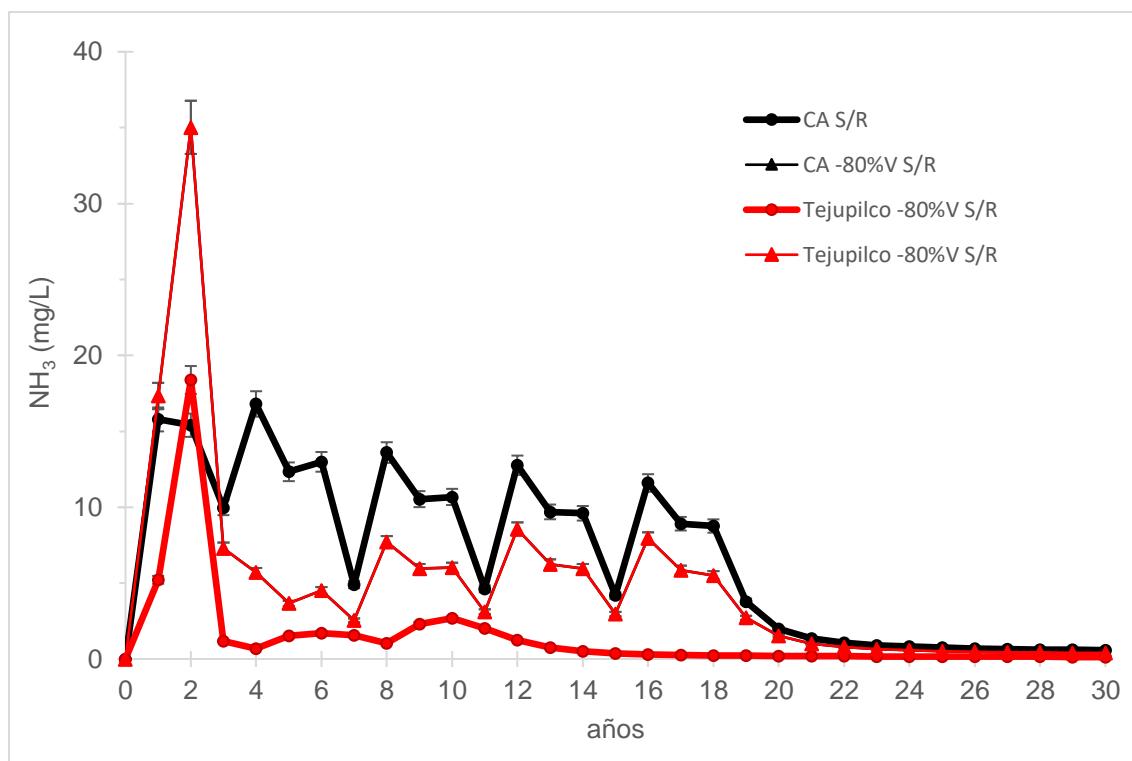


Figura G.3 Dinámica de NH₃ de lixiviados en la operación SR de CA

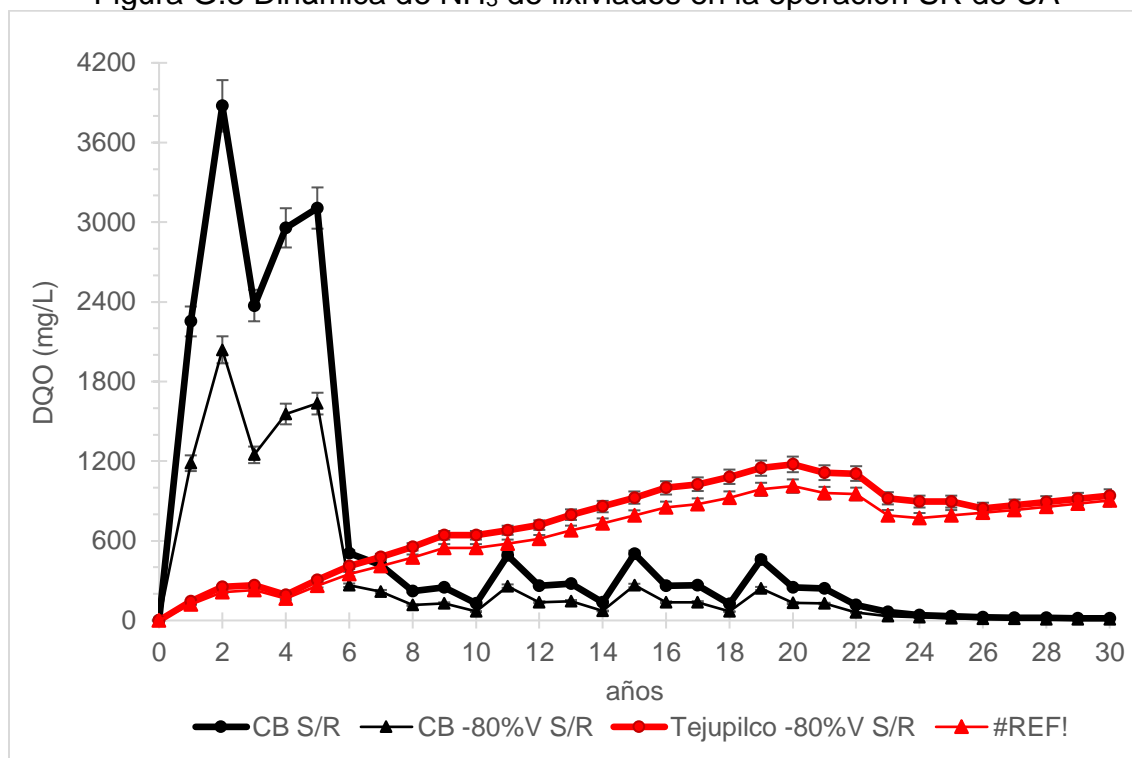


Figura G.4 Dinámica de la DQO de lixiviados en la operación SR de CB

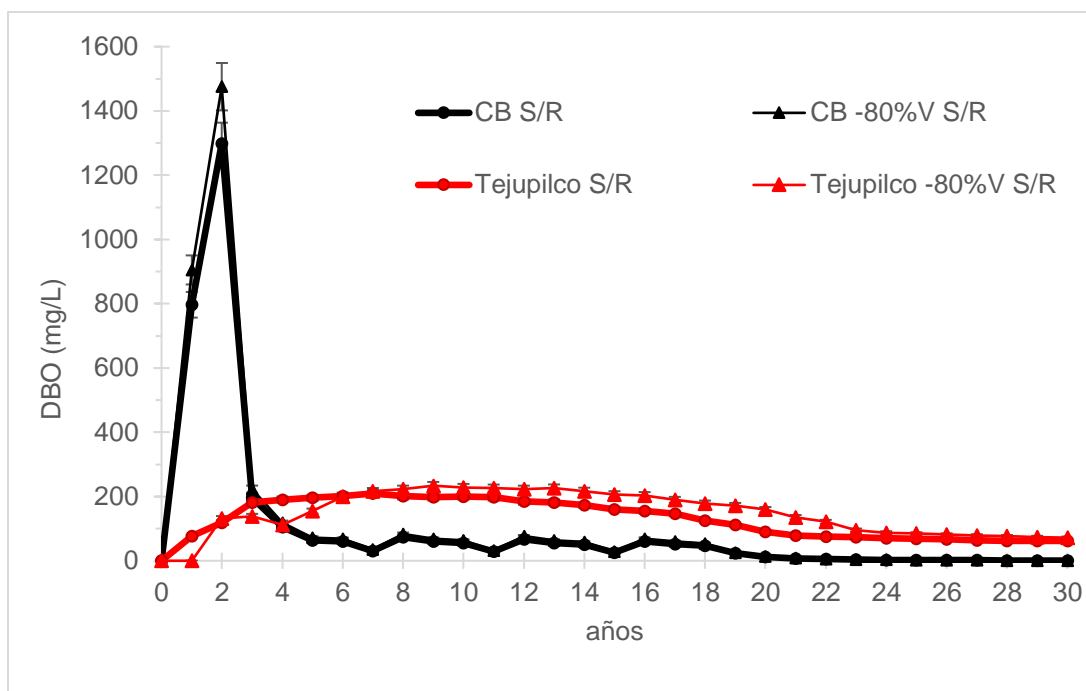


Figura G.5 Dinámica de la DBO de lixiviados en la operación SR de CB

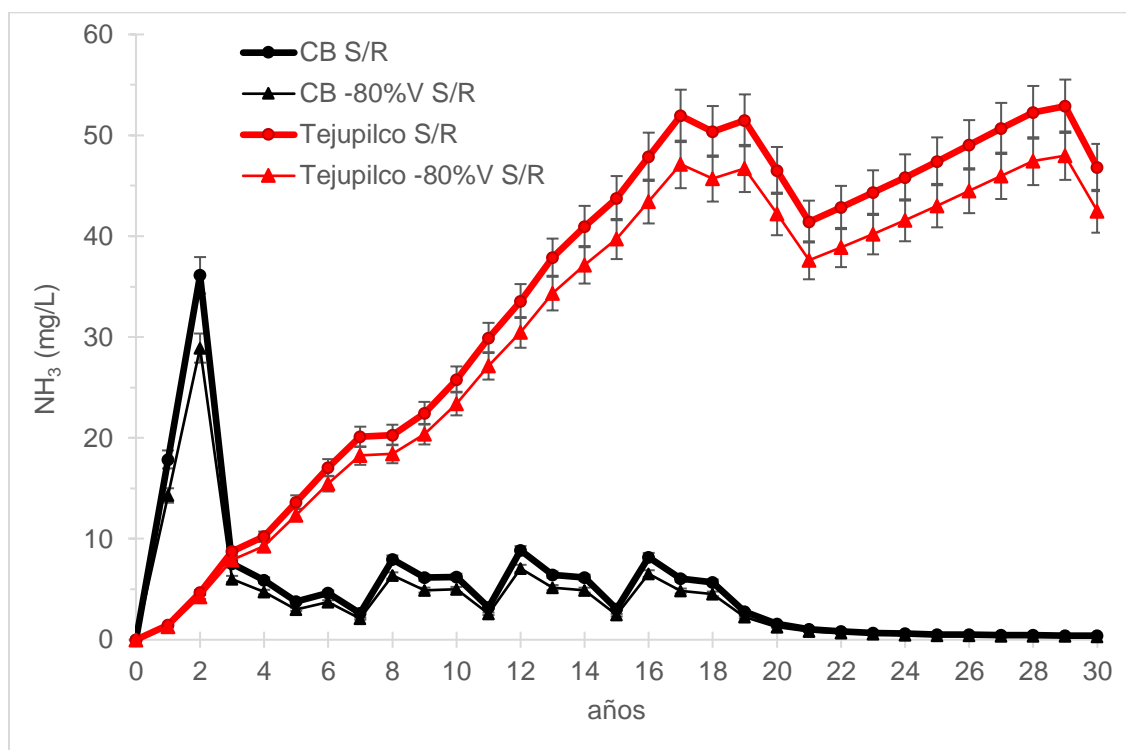


Figura G.6 Dinámica de NH₃ de lixiviados en la operación SR de CB

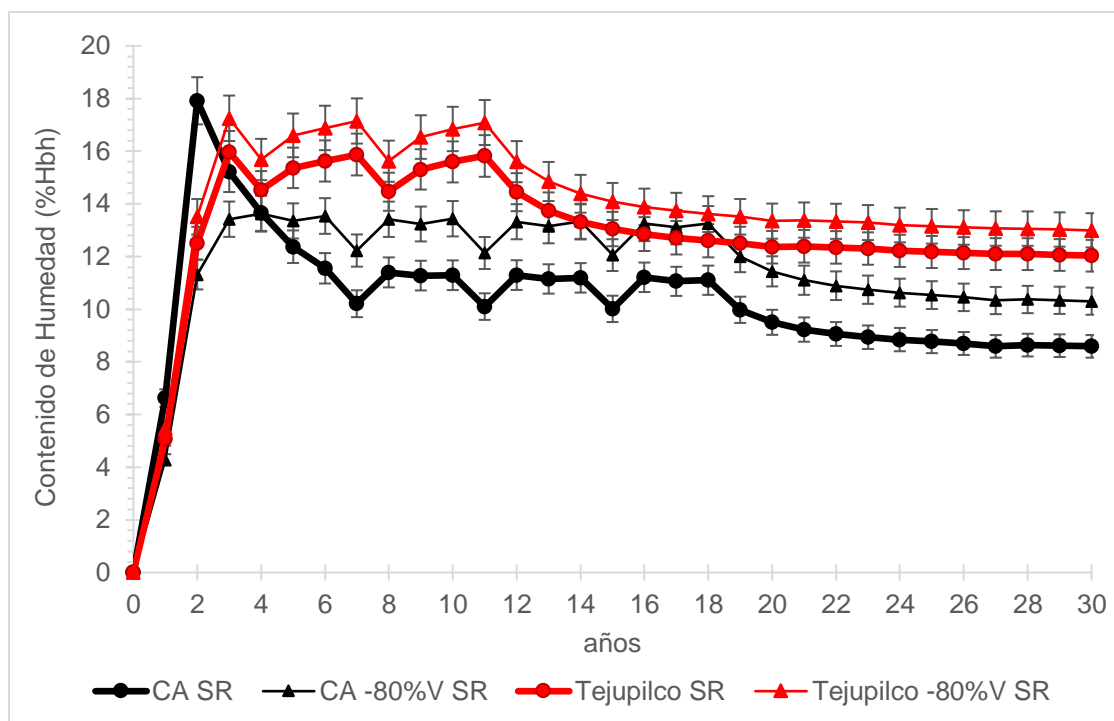


Figura G.7 Dinámica del contenido de humedad de RSU en la operación SR de CA

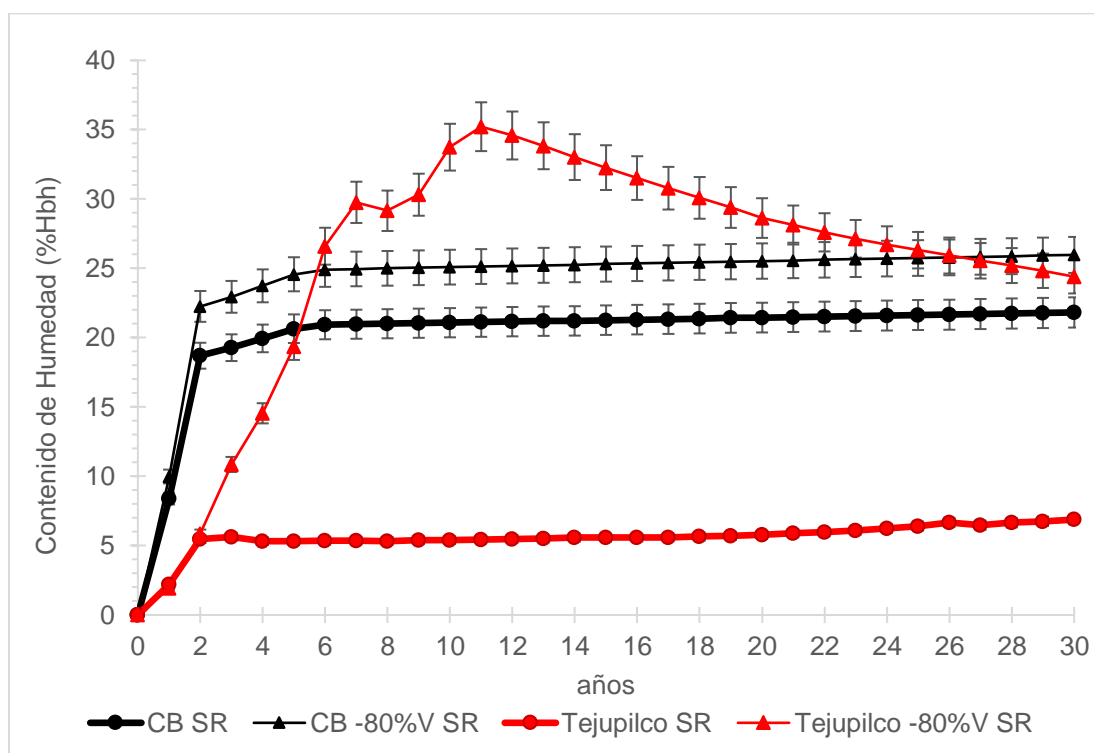


Figura G.8 Dinámica del contenido de humedad de RSU en la operación SR de CB

ANEXO H

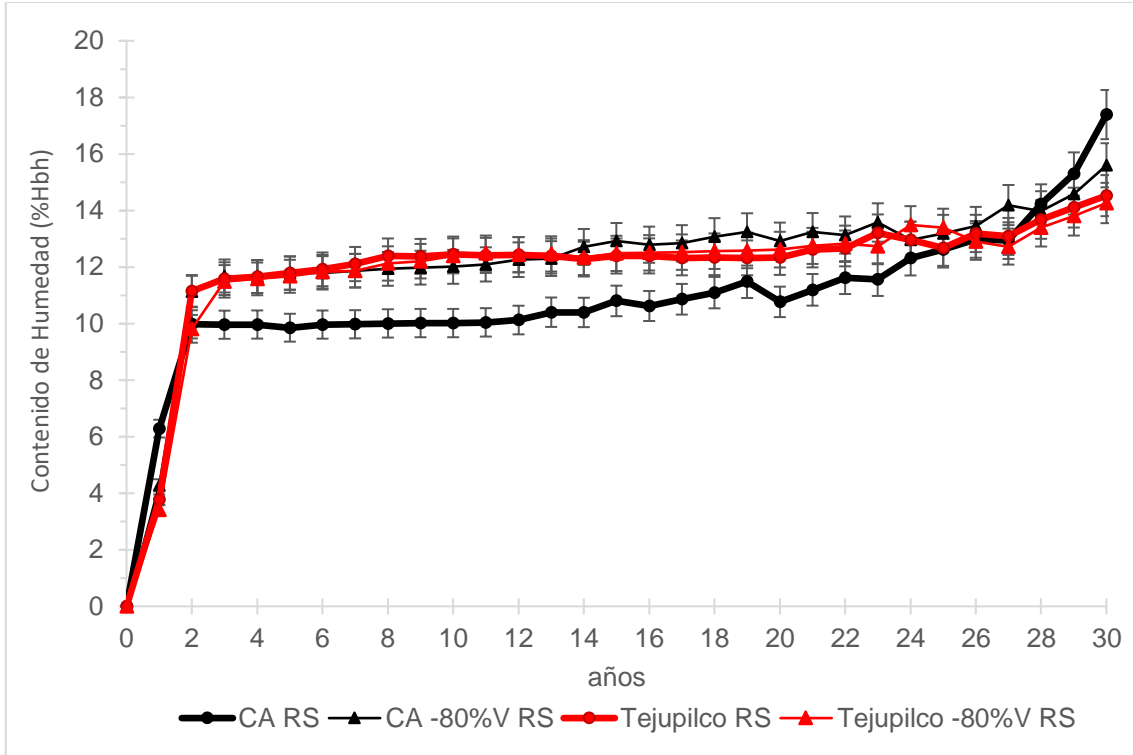


Figura H.1 Dinámica del contenido de humedad de RSU en la operación RS de CA

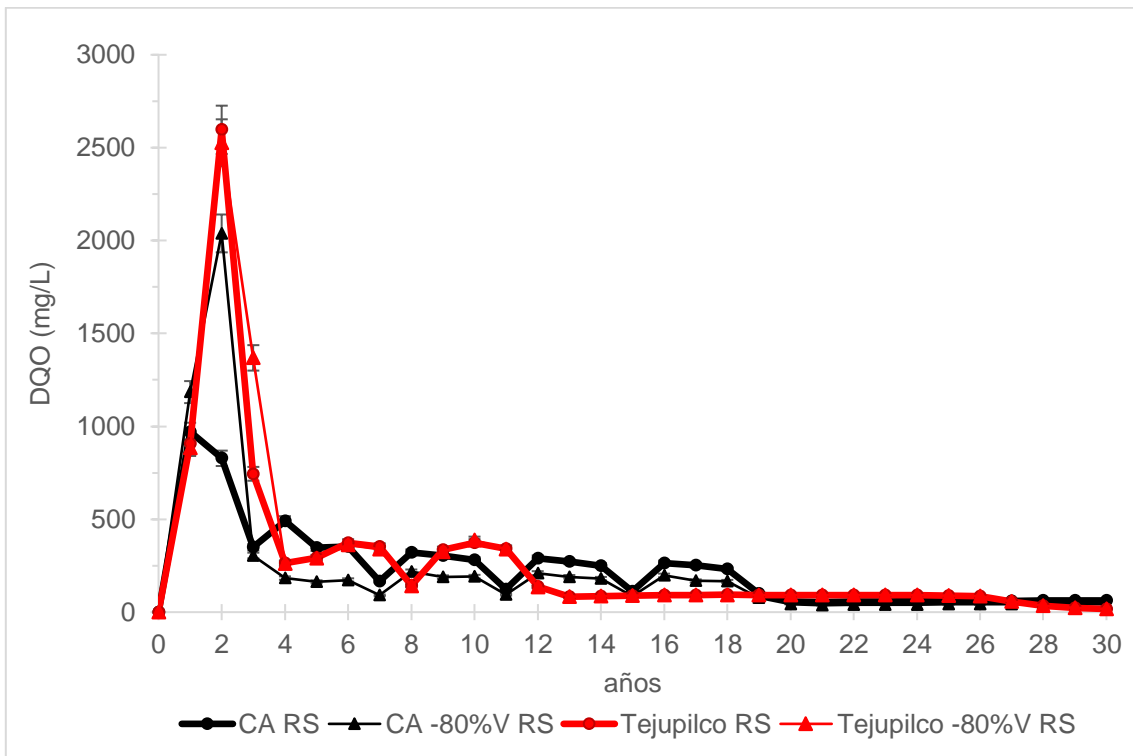


Figura H.2 Dinámica de la DQO de lixiviados en la operación RS de CA

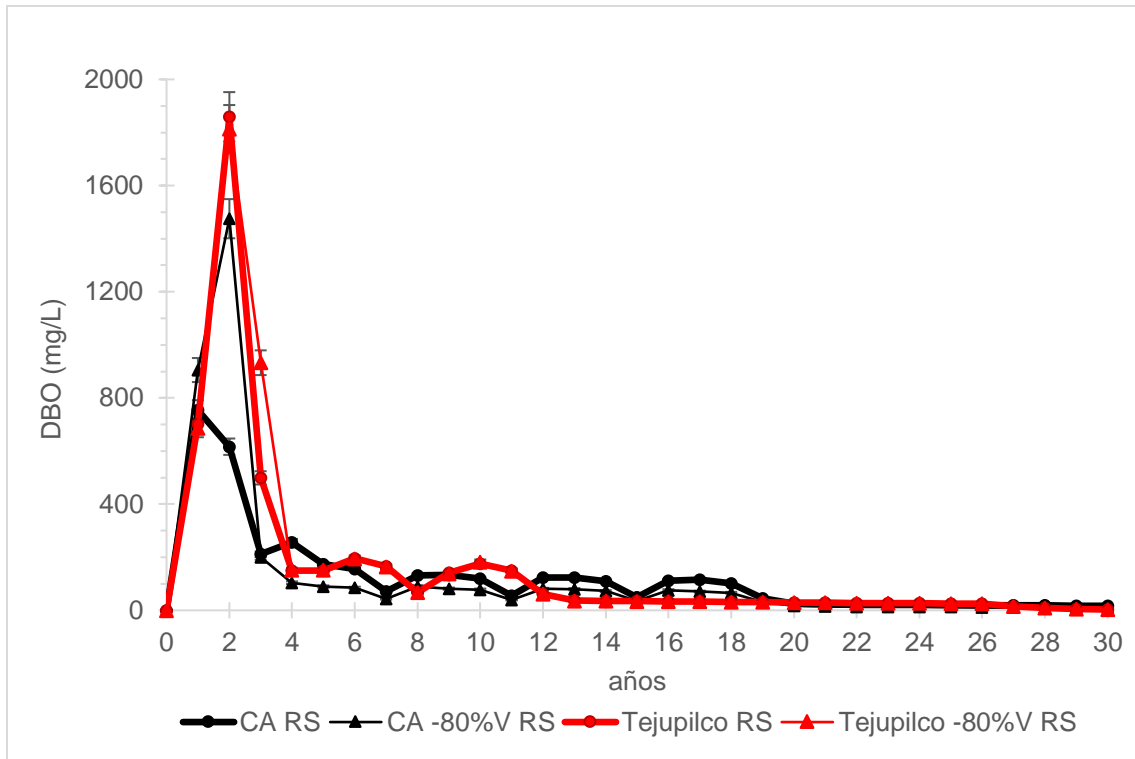


Figura H.3 Dinámica de la DBO de lixiviados en la operación RS de CA

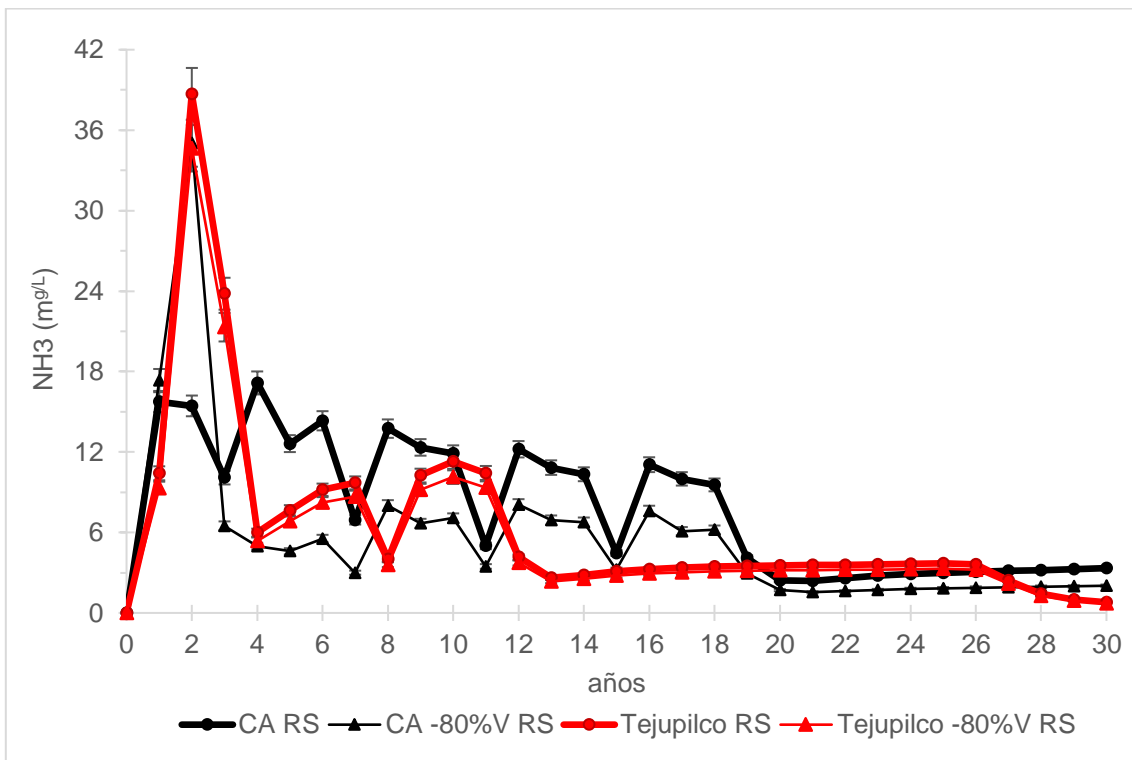


Figura H.4 Dinámica del NH₃ de lixiviados en la operación RS de CA

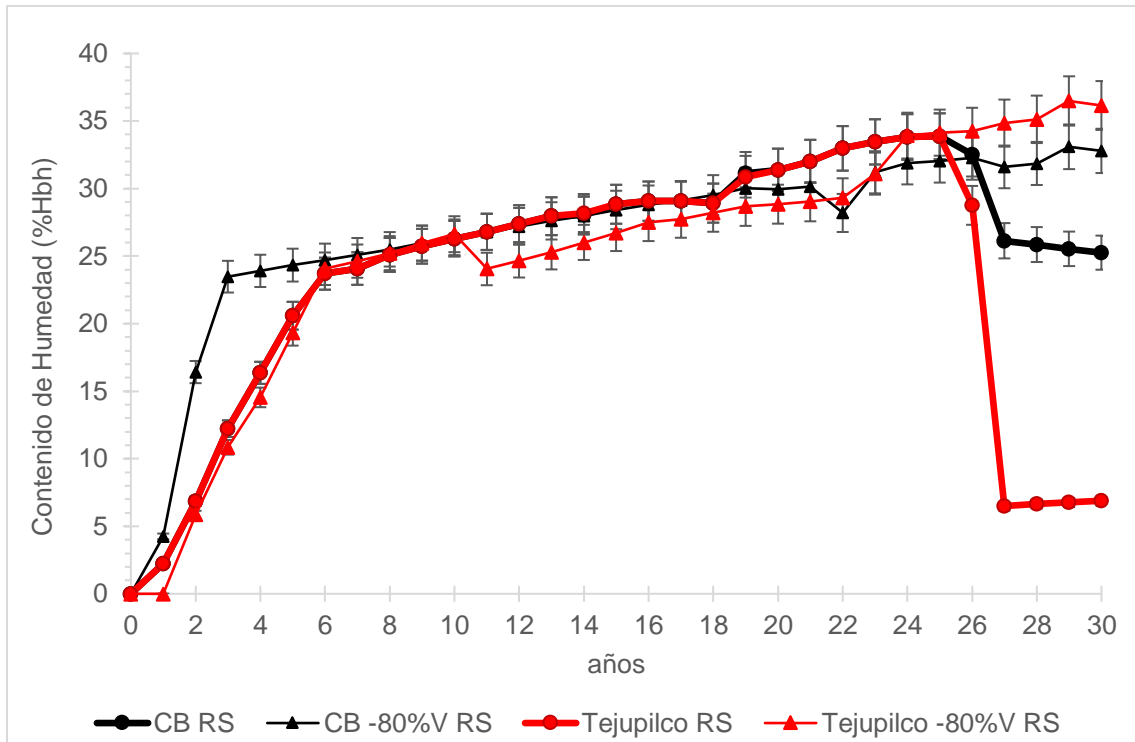


Figura H.5 Dinámica del contenido de humedad de RSU en la operación RS de CB

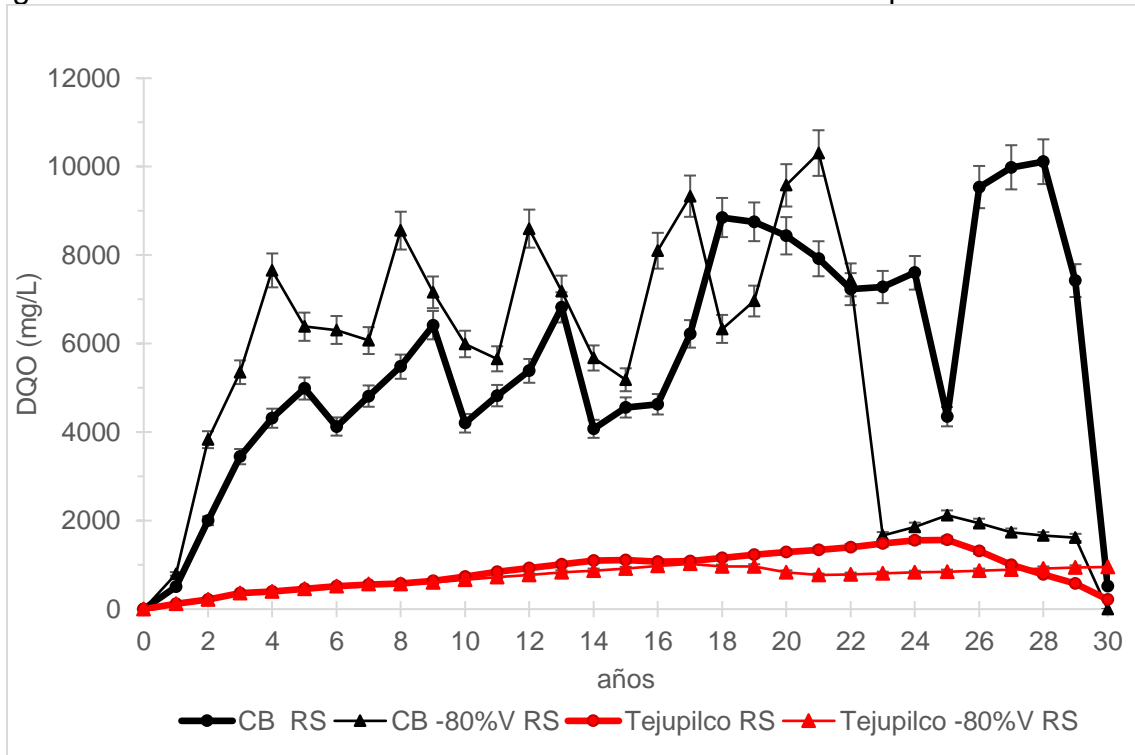


Figura H.5 Dinámica de la DQO de lixiviados en la operación RS de CB

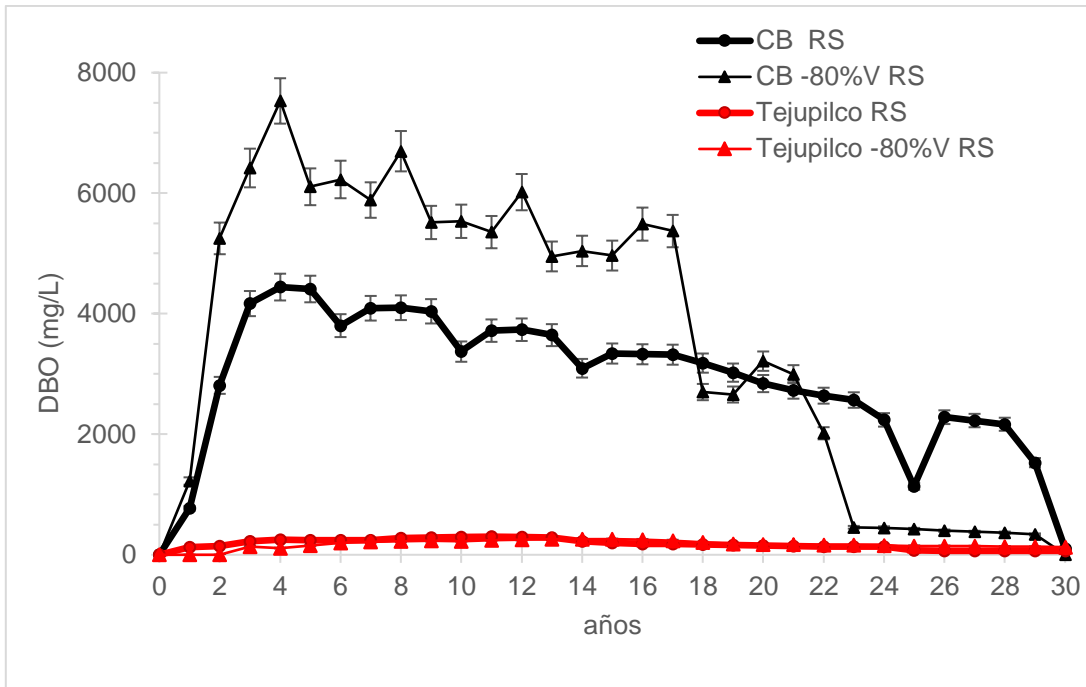


Figura H.6 Dinámica de la DBO de lixiviados en la operación RS de CB

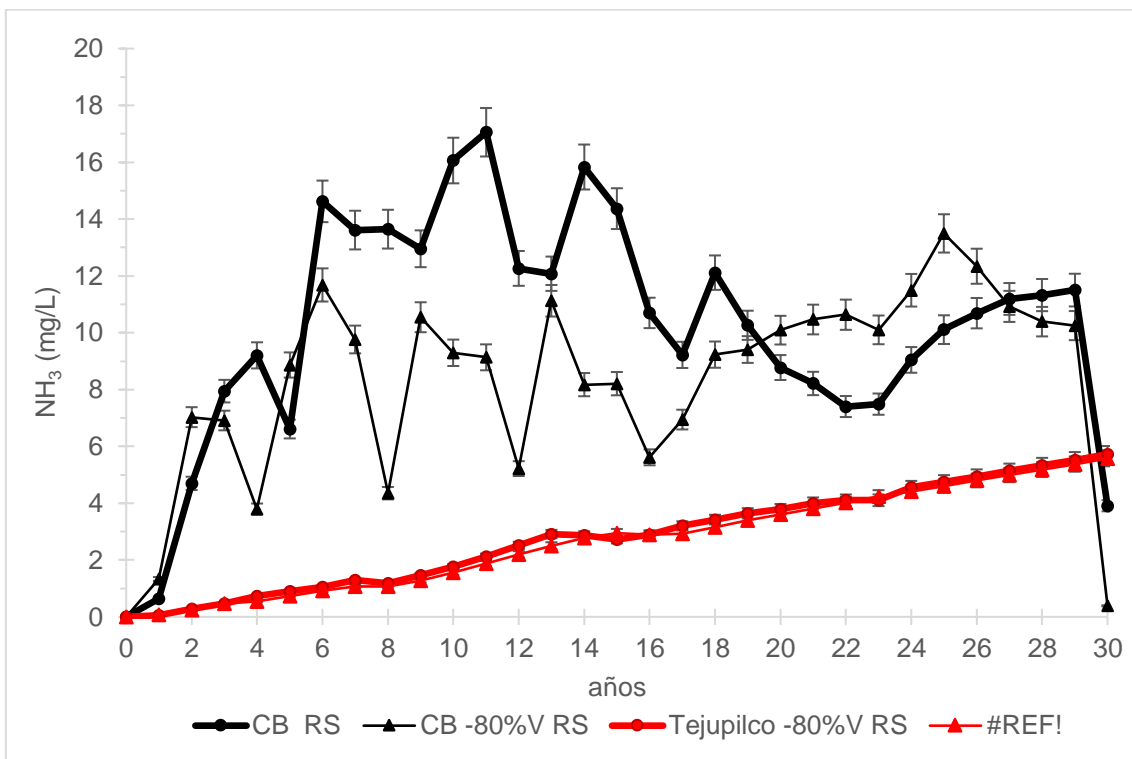


Figura H.7 Dinámica del NH₃ de lixiviados en la operación RS de CB

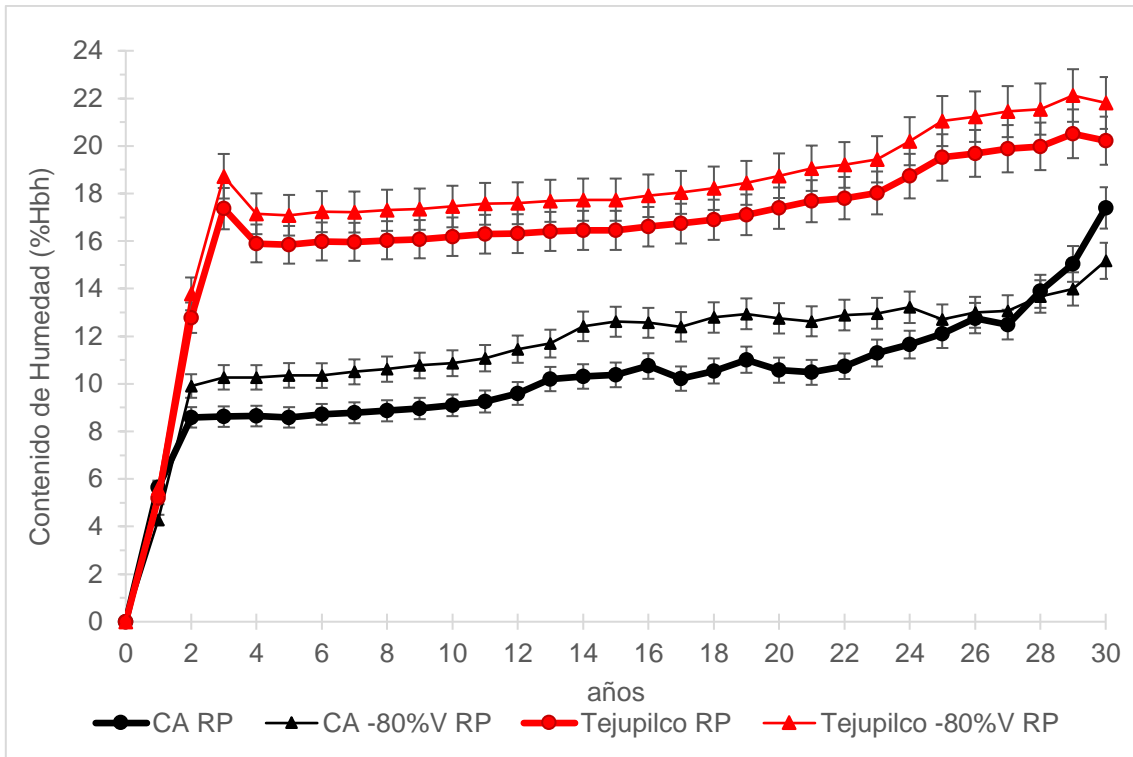


Figura H.8 Dinámica del contenido de humedad de RSU en la operación RP de CA

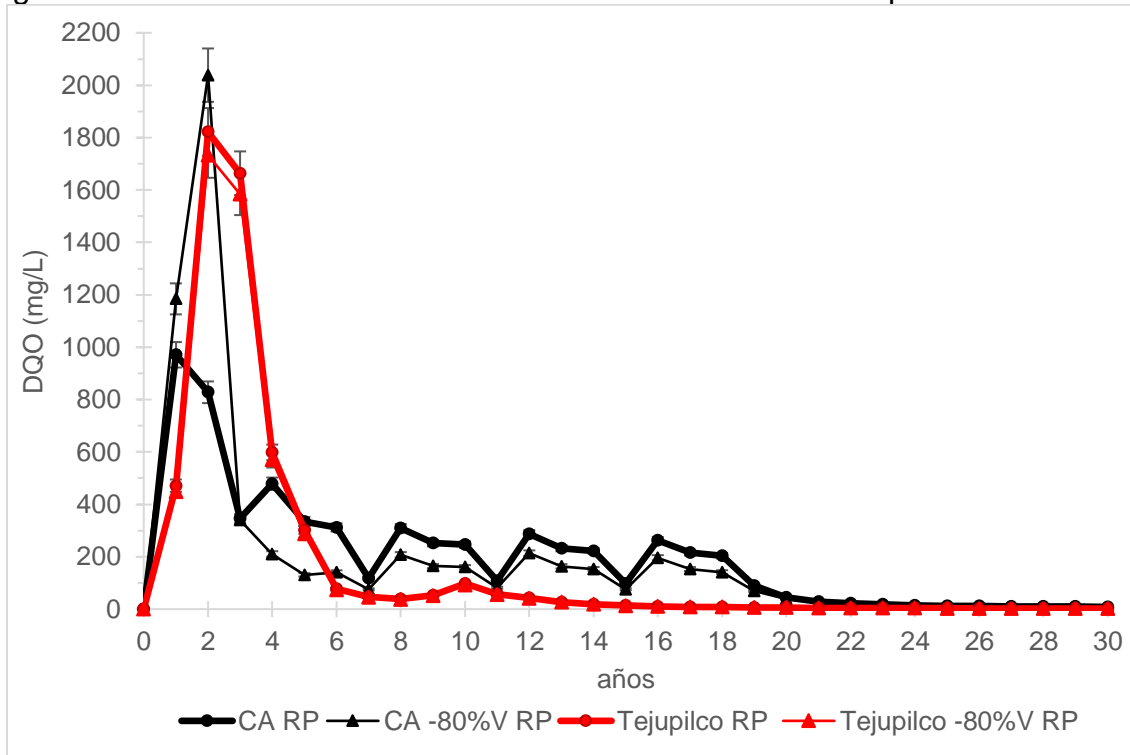


Figura H.9 Dinámica de la DQO de lixiviados en la operación RP de CA

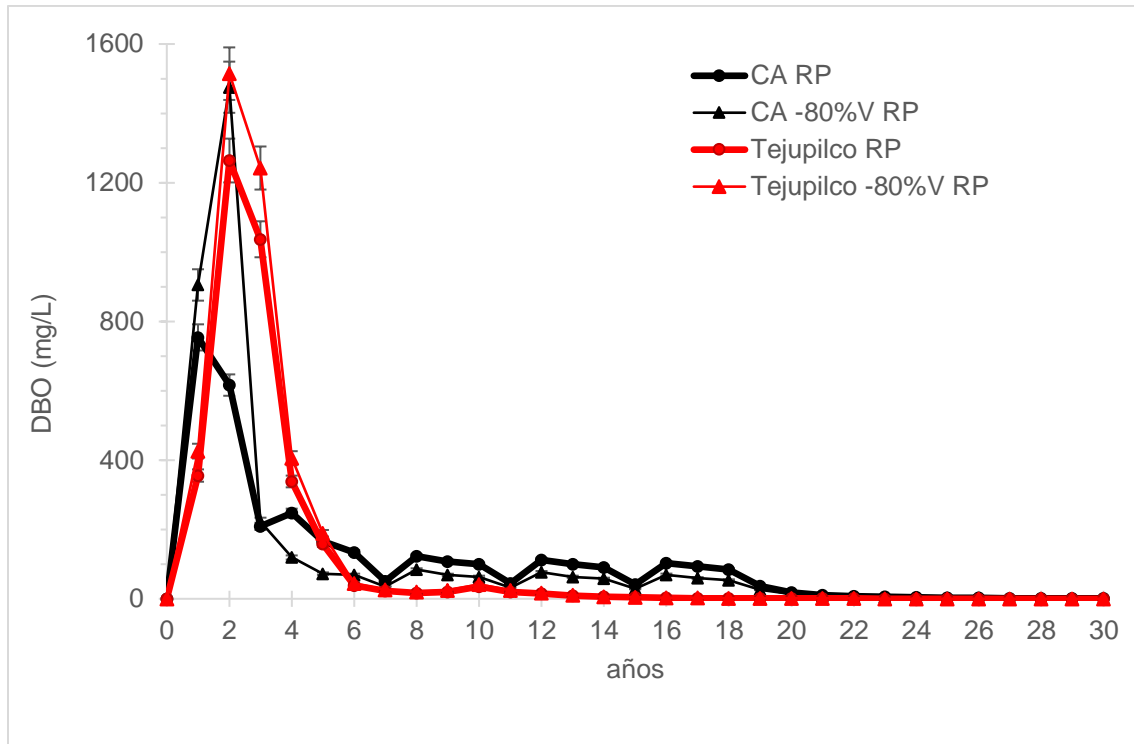


Figura H.10 Dinámica de la DBO de lixiviados en la operación RP de CA

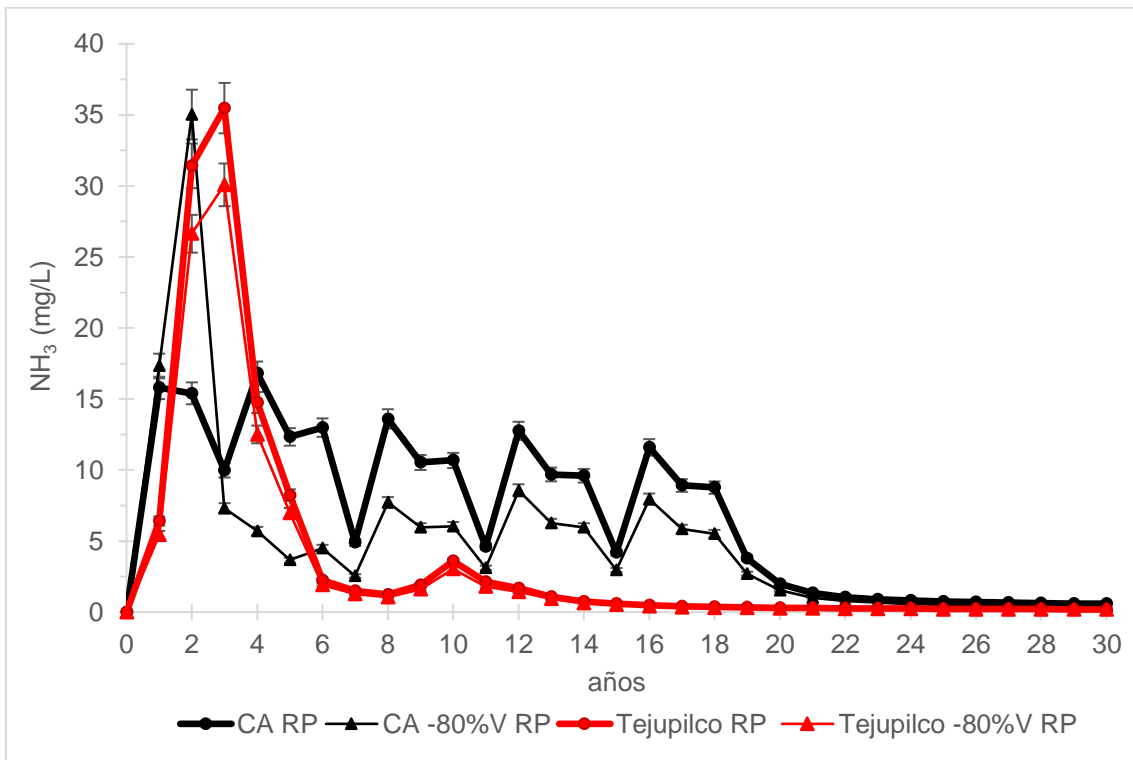


Figura H.11 Dinámica del NH₃ de lixiviados en la operación RP de CA

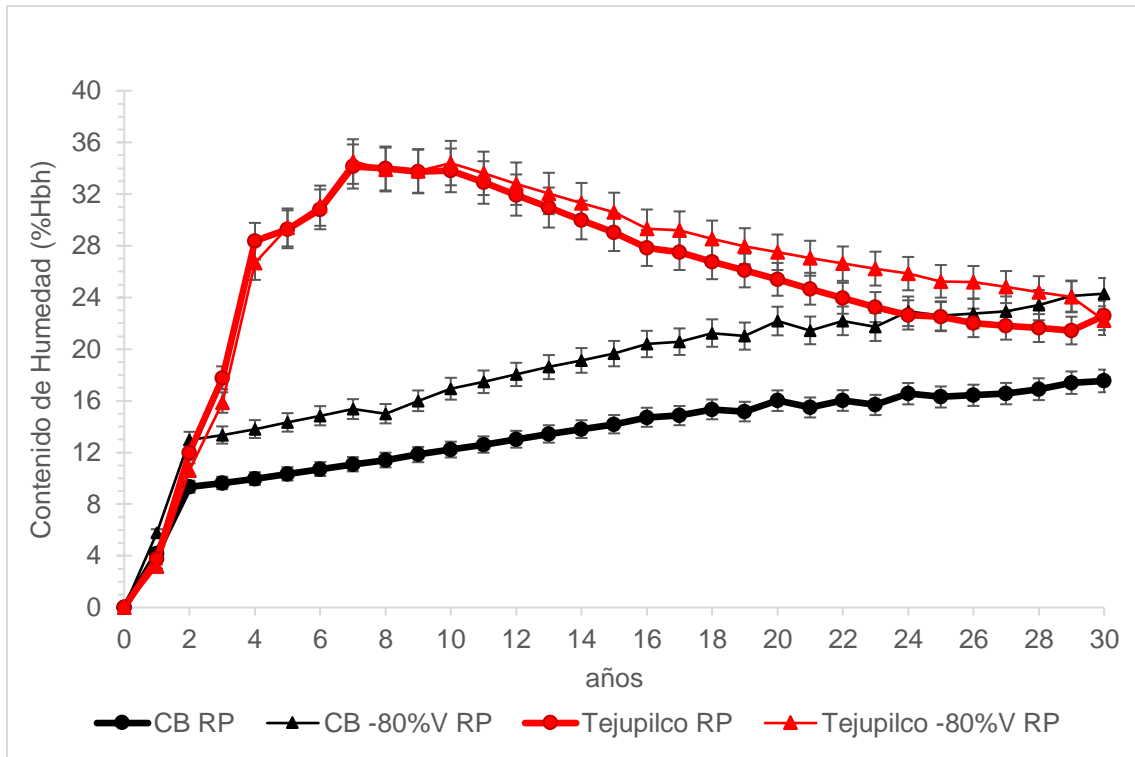


Figura H.12 Dinámica del contenido de humedad de RSU en la operación RP de CB

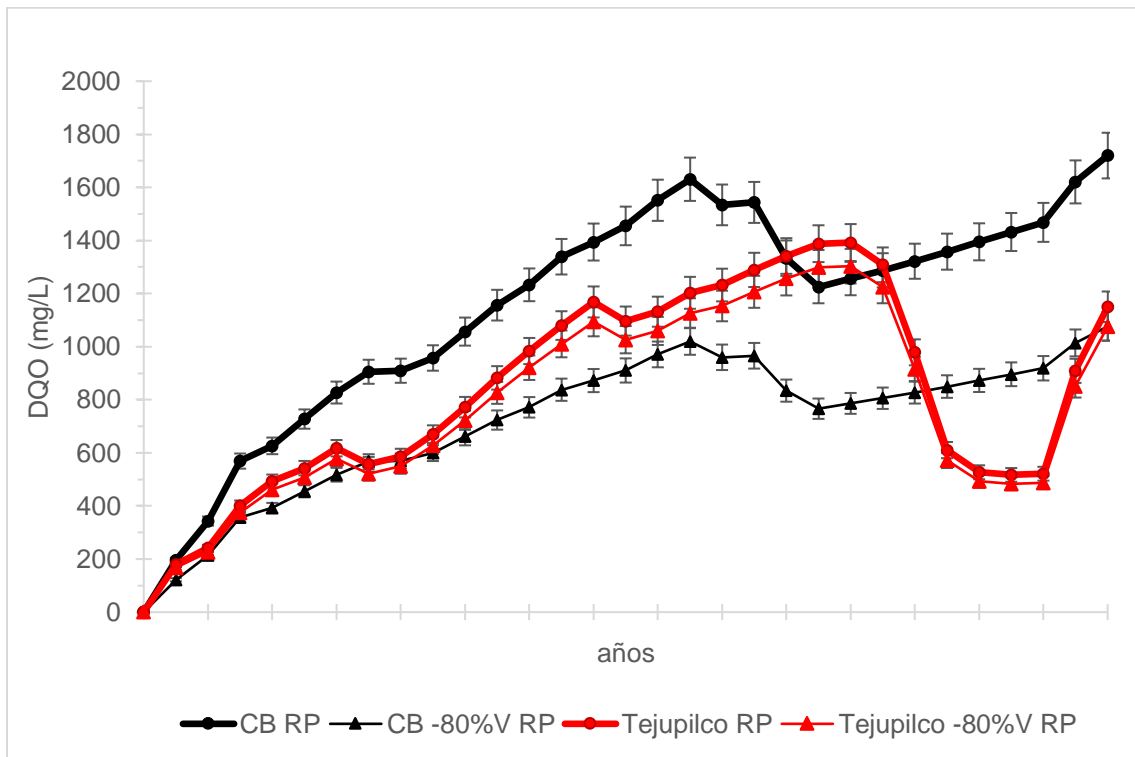


Figura H.13 Dinámica de la DQO de lixiviados en la operación RP de CB

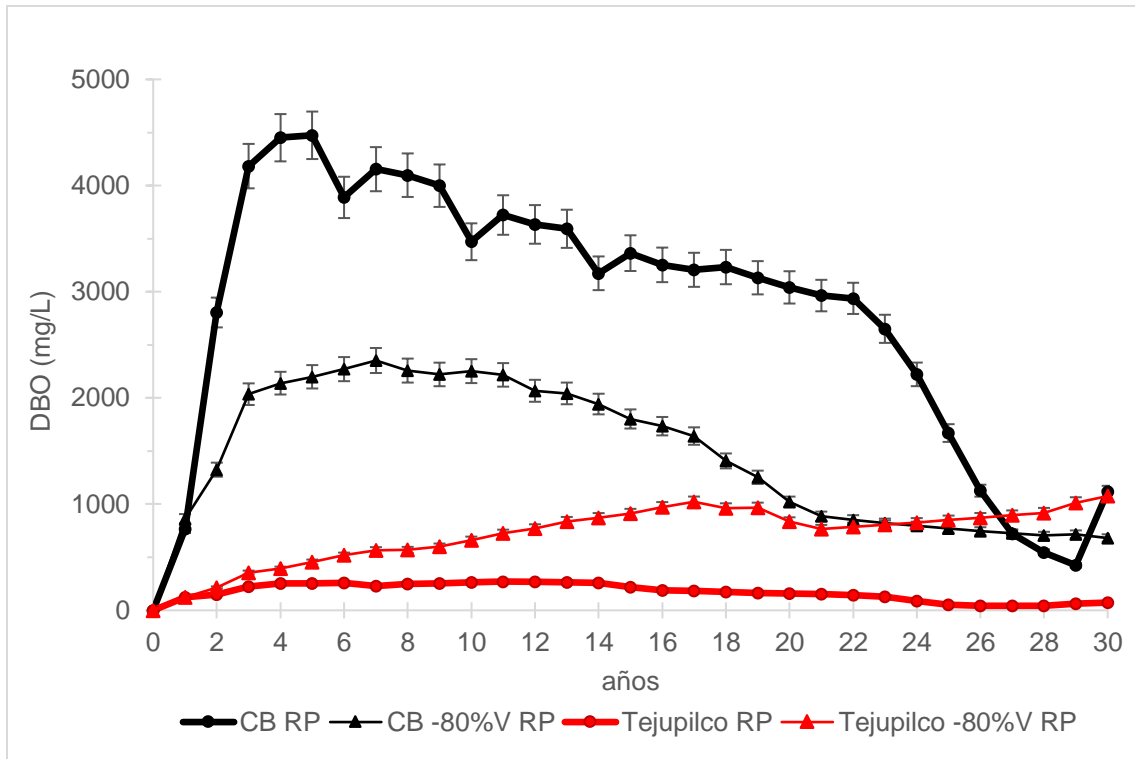


Figura H.14 Dinámica de la DBO de lixiviados en la operación RP de CB

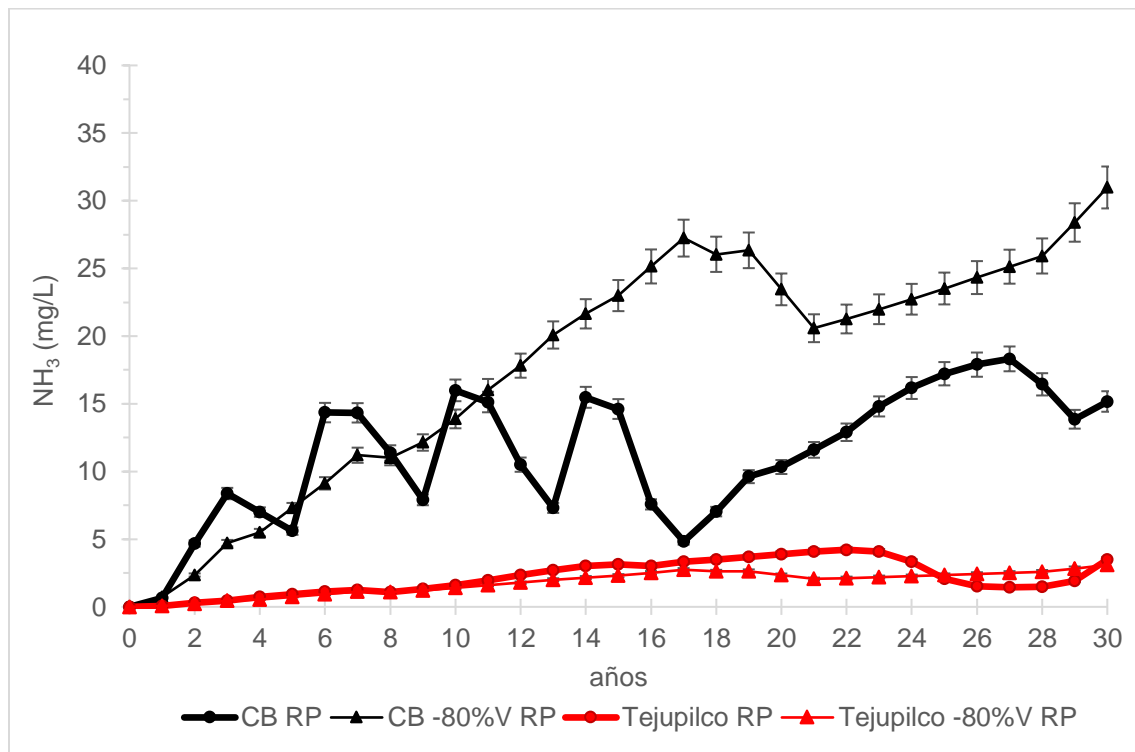


Figura H.7 Dinámica del NH₃ de lixiviados en la operación RP de CB

ANEXO I

Municipio*/AÑO	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
																							11	13	16	21	26	33	43	56	75
	27	28	29	29	30	31	32	32	33	34	35	36	37	39	41	45	49	55	62	71	82	96	50	88	97	03	42	66	46	88	48
Tejupilco	64	37	10	84	59	34	11	87	64	41	18	03	40	36	99	42	79	33	34	19	42	73	90	05	07	37	76	07	26	97	81
	9.4	0.	0.	1.	0.	8.	2.	8.	6.	6.	6.	4.	8.	8.	9.	0.	3.	7.	1.	7.	6.	6.	.2	.8	.2	.6	.2	.8	.3	.5	.5
	3	20	75	44	95	94	62	74	75	06	09	31	96	64	21	17	65	27	98	28	50	78	1	6	8	5	2	4	2	1	1
	92	94	96	98	10	10	10	10	10	11	11	11	11	12	12	13	14	15	16	17	19	21	24	27	30	34	39	46	53	63	75
Amatepec	53.	56	63	75	09	30	52	75	97	19	41	62	93	35	88	54	36	34	52	94	64	67	10	02	53	79	95	25	98	51	32
	83	.4	.8	.4	0.	9.	9.	0.	3.	6.	9.	9.	7.	3.	6.	9.	2.	5.	8.	6.	1.	0.	2.	1.	9.	2.	7.	9.	7.	3.	2.
	94	05	03	54	74	04	33	90	37	34	39	17	95	42	09	80	27	91	84	21	94	97	11	86	34	74	94	76	11	19	60
	81	29	65	22	75	46	29	42	33	08	22	64	95	21	56	72	97	95	37	13	73	51	68	93	38	85	1	05	79	33	61
	94	96	98	10	10	10	10	11	11	11	11	12		12	13	13	14	15	16	17	19	21	23	26	29	34	39	46	54	64	77
	07.	28	57	09	33	59	84	10	37	64	90	17	12	69	07	59	27	13	19	50	10	04	41	29	82	15	48	10	34	67	72
Luvians	78	.0	.5	5.	9.	1.	7.	8.	4.	0.	7.	6.	44	3.	3.	4.	3.	1.	6.	3.	0.	4.	1.	6.	3.	2.	8.	0.	2.	9.	9.
	55	07	61	04	96	14	68	97	03	45	80	04	4.	65	22	45	34	23	04	72	25	37	10	45	77	23	16	64	52	38	49
	77	95	42	26	6	91	86	85	88	15	95	73	38	33	02	99	04	55	81	15	43	62	01	07	87	06	8	74	2	32	3
	94	97	99	10	10	10	10	11	11	11	12	12	12	13	14	14	16		19	21	24	28	32	38	45	54	65	80	99	12	15
	83.	21	63	21	46	71	97	24	50	76	02	28	69	26	02	98	20	17	58	89	75	31	74	30	31	21	60	27	35	43	74
Sultepec	82	.0	.7	1.	3.	9.	9.	0.	2.	5.	8.	9.	8.	9.	3.	8.	1.	71	0.	3.	6.	2.	6.	4.	3.	4.	0.	8.	6.	64	34
	87	06	33	42	47	93	45	29	40	01	41	42	34	54	57	43	29	0.	63	32	84	50	22	07	73	65	34	37	13	.1	.6
	9	93	02	67	85	21	18	46	58	89	69	68	56	06	38	92	77	86	2	38	74	62	92	15	67	86	03	24	72	1	08
Cutzamal	70	71	72	72	73	74	75	76	76	77	78	79	79	80	81	82	83	83	84	85	86	87	88	89	90	90	91	92	93	94	95
	49.	29	08	87	66	45	23	00	77	53	28	08	89	70	51	33	16	99	83	68	53	39	26	13	01	90	80	70	61	53	46
	55	.2	.8	.8	.8	.4	.3	.8	.6	.3	.5	.5	.0	.0	.6	.8	.6	.9	.9	.5	.8	.8	.4	.7	.8	.6	.1	.4	.5	.4	.2

Amatepec	11629.1764	12353.4221	13549.8072	15345.9195	17946.2113	21670.9751	27021.8693	34792.7485	46259.7605	75322.6061
Luvianos	12176.0473	12693.6533	13594.4599	15131.2355	17503.7215	21044.3762	26296.4507	34152.2306	46100.6474	77729.493
Sultepec	12289.4268	13269.5406	14988.4392	17710.86	21893.3238	28312.5062	38304.0715	54214.6586	80278.3724	157434.608
Cutzamala de Pinzón	7908.50704	8070.0703	8233.85534	8399.98878	8568.59924	8739.81748	8913.7766	9090.61221	9270.46256	9546.20027
TOTAL	80037.4668	85755.3222	95786.7275	111925.271	137109.141	176504.459	239342.026	342587.904	518517.084	1074914.42
ACUMULADO	855447.117	1023681.11	1209601.61	1424474.07	1684714.7	2015798.58	2459316.71	3086290.58	4023310.49	6580806.23

ANEXO J

Tabla J.1 Emisiones de CO₂ Tejupilco RP

AÑO	EMISIONES DE CH ₄ (m ³ /año) CA	EMISIONES DE CH ₄ (T/año) CA	EMISIONES DE CH ₄ (m ³ /año) CB	EMISIONES DE CH ₄ (T/año) CB	EMISIONES (CA+C B) de CH ₄ (T/año)	CH ₄ EN TÉRMINOS DE EQ. EMITIDO A LA ATMÓSFERA SIN PROYE CTO (T/año)	CO ₂ EMITIDO A LA ATMÓSFERA SIN PROYE CTO (m ³ /año) CA	CO ₂ EMITIDO A LA ATMÓSFERA SIN PROYE CTO (m ³ /año) CB	CO ₂ EMITIDO A LA ATMÓSFERA SIN PROYE CTO (CA+C B) (m ³ /año)	CO ₂ EMITIDO A LA ATMÓSFERA SIN PROYE CTO (T/año)	CO ₂ TOTAL EMITIDO A LA ATMÓSFERA SIN PROYE CTO (T/año)	Emisiones de CH ₄ (T/año) Considerando 70% recolección	CH ₄ destruido (33% aproximación) = CH ₄ generado – Ch ₄ destruido (T/año)	CH ₄ emitido a la atmósfera (T/año) = CH ₄ generado – Ch ₄ destruido (T/año)	CH ₄ EN TÉRMINOS DE EQ. EMITIDO A LA ATMÓSFERA BAJO PROYE CTO (T/año)	CH ₄ DESTRUIDO EN TÉRMINOS DE EQ. (YA SEA POR FLAMA O POR GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD) (TON/año)	CAMBIO NETO (REDUCCIÓN DE EMISIONES DE CO ₂ BAJO EL ESCENARIO PROPUESTO)
1	71239	51	103548	75	126	2894	71239	103548	174787	280	3174	88	29	97	2226	669	2506
2	326541	235	466688	336	571	13136	326541	466688	793229	1269	14405	400	132	439	10101	3034	11371
3	477952	344	652954	470	814	18728	477952	652954	1130906	1809	20537	570	188	626	14402	4326	16211
4	524237	377	682835	492	869	19989	524237	682835	1207072	1931	21920	608	201	668	15372	4617	17303
5	559763	403	694661	500	903	20773	559763	694661	1254424	2007	22780	632	209	695	15975	4799	17982
6	574807	414	708727	510	924	21255	574807	708727	1283535	2054	23309	647	213	711	16345	4910	18399
7	549589	396	723247	521	916	21078	549589	723247	1272836	2037	23115	642	212	705	16209	4869	18246
8	579471	417	740263	533	950	21855	579471	740263	1319734	2112	23966	665	219	731	16806	5048	18918
9	554796	399	753631	543	942	21668	554796	753631	1308426	2093	23761	659	218	724	16662	5005	18756
10	550618	396	769319	554	950	21858	550618	769319	1319937	2112	23970	665	220	731	16809	5049	18921
14	511250	368	834043	601	969	22278	511250	834043	1345293	2152	24431	678	224	745	17132	5146	19284
18	474421	342	903480 101009	651	992	22818	474421	903480	1377901	2205	25023	694	229	763	17547	5271	19752
22	358690	258	2 109460	727	986	22667	358690	1010092	1368782	2190	24857	690	228	758	17431	5236	19621
26	317023	228	8 125350	788	1016	23377	317023	1094608	1411631	2259	25635	711	235	782	17977	5400	20235
30	310981	224	1	903	1126	25908	310981	1253501	1564482	2503	28411	788	260	866	19923	5985	22426

Tabla J.2 Emisiones de CO₂ Tejupilco RP -80%V

AÑO	EMISIONES DE CH ₄ (m ³ /año) CA	EMISIONES DE CH ₄ (T/año) CA	EMISIONES DE CH ₄ (m ³ /año) CB	EMISIONES DE CH ₄ (T/año) CB	EMISIONES (CA+CB) de CH ₄ (T/año)	CH ₄ EN TÉRMINOS DE CO ₂ EQ. EMITIDO A LA ATMÓSFERA SIN PROYECTO (T/año)	CO ₂ EMITIDO A LA ATMÓSFERA SIN PROYECTO (m ³ /año) CA	CO ₂ EMITIDO A LA ATMÓSFERA SIN PROYECTO (m ³ /año) CB	CO ₂ EMITIDO A LA ATMÓSFERA SIN PROYECTO (CA+CB) (m ³ /año)	CO ₂ EMITIDO A LA ATMÓSFERA SIN PROYECTO (T/año)	CO ₂ TOTAL EMITIDO A LA ATMÓSFERA SIN PROYECTO (T/año)	Emisiones de CH ₄ (T/año) Considerando 70% recolección	CH ₄ destruido (33% aproximadamente a eficiencia térmica media) (T/año)	CH ₄ emitido a la atmósfera (T/año)= CH ₄ generado - CH ₄ destruido	CH ₄ EN TÉRMINOS DE CO ₂ EQ. EMITIDO A LA ATMÓSFERA SIN PROYECTO (T/año)	CH ₄ DESTRUIDO EN TÉRMINOS DE CO ₂ EQ. (YA SEA POR FLAMAS O POR GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD) (T/año)	CAMBIO NETO (REDUCCIÓN DE EMISIONES DE CO ₂ BAJO EL ESCENARIO PROPUUESTO)
1	120402.455	86.6897674	468919.793	337.622251	424.312018	9759.17642	120402.455	468919.793	589322.247	942.915596	10702.092	297.018413	98.0160762	326.295942	7504.81	2254.36975	8447.72226
2	551894.695	397.36418	211340.924	1521.65465	1919.01883	44137.4332	551894.695	211340.924	266530.394	4264.4863	48401.9195	1343.31318	443.293351	1475.72548	33941.69	10195.7471	38206.1724
3	807798.495	581.614916	295691.666	2128.98491	2710.5983	62343.683	807798.495	295691.666	376471.515	6023.5425	68367.2272	1897.41644	626.14749	2084.44749	47942.29	14401.3908	53965.8364
4	886024.916	637.93794	309223.6	2226.40992	2864.34786	65880.0008	886024.916	309223.6	397826.092	6365.21747	72245.2182	2005.0435	661.664356	2202.6835	50661.72	15218.2802	57026.9381
5	946067.62	681.168686	314579.167	2264.97869	2946.13869	67761.1898	946067.62	314579.167	409185.929	6546.97486	74308.1646	2062.29708	680.558036	2265.58065	52108.35	15652.8348	58655.3298
6	971495.296	699.476613	320948.943	2310.83239	3010.309	69237.1071	971495.296	320948.943	418098.473	6689.57556	75926.6826	2107.2163	695.38138	2314.92762	53243.34	15993.7717	59932.9109
7	928872.447	668.788162	327524.402	2358.17569	3026.96385	69620.1686	928872.447	327524.402	420411.646	6726.58634	76346.755	2118.8747	699.22865	2327.7352	53537.91	16082.259	60264.496
8	979378.053	705.152198	335229.768	2413.65433	3118.80653	71732.5501	979378.053	335229.768	433167.573	6930.68117	78663.2312	2183.16457	720.444307	2398.36222	55162.33	16570.2191	62093.0122
9	937673.175	675.124686	341283.49	2457.24112	3132.36581	72044.4137	937673.175	341283.49	435050.807	6960.81291	79005.2266	2192.65607	723.576502	2408.78931	55402.15	16642.2596	62362.967
10	930611.6	670.040352	348388.175	2508.39486	3178.43521	73104.0099	930611.6	348388.175	441449.335	7063.18936	80167.1993	2224.90465	734.218534	2444.21668	56216.98	16887.0263	63280.173
14	864075.31	622.134223	377698.616	2719.43003	3341.56426	76855.9779	864075.31	377698.616	464106.147	7425.69835	84281.6762	2339.09498	771.901343	2569.66291	59102.25	17753.7309	66527.9453
18	801830.623	577.318048	409142.971	2945.82939	3523.14744	81032.3911	801830.623	409142.971	489326.034	7829.21654	88861.6077	2466.20321	813.847059	2709.30038	62313.91	18718.4824	70143.1253
22	606230.204	436.485747	457422.55	3293.44236	3729.92811	85788.3465	606230.204	457422.55	518045.571	8288.72913	94077.0756	2610.94968	861.613393	2868.31472	65971.24	19817.108	74259.9676
26	535808.178	385.781888	495695.915	3569.01059	3954.79247	90960.2269	535808.178	495695.915	549276.733	8788.42772	99748.6546	2768.35473	913.557062	3041.23541	69948.41	21011.8124	78736.8422
30	525595.684	378.428893	510475.126	3675.4209	4053.8498	93238.5453	525595.684	510475.126	563034.694	9008.55511	102247.1	2837.69486	936.439303	3117.41049	71700.44	21538.104	80708.9965