



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Boca del Río
División de Estudios de Posgrado e Investigación



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MEXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BOCA DEL RÍO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**"CLAUSURA DE LOS SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL NO CONTROLADOS
ABANDONADOS EN LA REGIÓN SOTAVENTO, DEL ESTADO DE VERACRUZ,
MÉXICO".**

TESIS

**QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTOR EN CIENCIAS EN AMBIENTALES**

PRESENTA
MANUEL ALBERTO SUSUNAGA MIRANDA

DIRECTOR DE TESIS
DR. BENIGNO ORTIZ MUÑIZ

CO-DIRECTOR
DRA. MARÍA DEL REFUGIO CASTAÑEDA CHÁVEZ
ASESOR
DRA. FABIOLA LANGO REYNOSO
ASESOR
DRA. MARÍA DEL CONSUELO HERNÁNDEZ BERRIEL
ASESOR
DR. MARIO DÍAZ GONZÁLEZ

30 DE MARZO DEL 2023 BOCA DEL RIO, VERACRUZ



Km. 12 Carretera Veracruz-Córdoba, Boca del Río, Ver. C.P. 94290.
Tel. (229) 690 5010 ext. 113 depi_bdelrio@tecnm.mx | tecnm.mx | bdelrio.tecnm.mx





Boca del Río, Ver **24/FEBRERO/2023**

ASUNTO: **AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN**

**MANUEL ALBERTO SUSUNAGA MIRANDA
PASANTE DEL PROGRAMA DEL DOCTORADO EN
CIENCIAS AMBIENTALES
PRESENTE**

De acuerdo con el fallo emitido por los integrantes del Comité Revisor de la **TESIS PARA OBTENCIÓN DE GRADO**, desarrollada por usted cuyo título es:

**“CLAUSURA DE LOS SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL NO CONTROLADOS
ABANDONADOS EN LA REGIÓN SOTAVENTO, DEL ESTADO DE VERACRUZ, MÉXICO”.**

Esta División de Estudios de Posgrado e Investigación le concede **AUTORIZACIÓN** para que proceda a su impresión.

ATENTAMENTE
*Excelencia en Educación Tecnológica®
Por nuestros mares responderemos*

**DR. JUAN DAVID GARAY MARIN
JEFE DE LA DIVISION DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



c.c.p. Coordinación del Programa DCAMB
c.c.p. Expediente





ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

Número Registro: DCAM-020223-02

En la ciudad de Boca del Río, Ver., siendo las 10:00 horas del día 06 del mes de enero de 2023 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Claustro doctoral del programa de Doctorado en Ciencias Ambientales del ITBOCA-ITVER, para examinar la Tesis de Grado titulada:

“CLAUSURA DE LOS SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL NO CONTROLADOS ABANDONADOS EN LA REGIÓN SOTAVENTO, DEL ESTADO DE VERACRUZ, MÉXICO”.

Que presenta el (la) alumno(a):

MANUEL ALBERTO SUSUNAGA MIRANDA

Aspirante al Grado de:

Doctor en Ciencias Ambientales

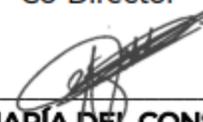
Después de escuchar las opiniones sobre el documento escrito e intercambiar puntos de vista, los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACIÓN**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes para su defensa ante el jurado correspondiente.

LA COMISIÓN REVISORA:


DR. BENIGNO ORTIZ MUÑIZ
Director


DRA. MARÍA DEL REFUGIO CASTAÑEDA CHÁVEZ
Co-Director


DRA. FABIOLA LANGO REYNOSO
Asesor


DRA. MARÍA DEL CONSUELO HERNÁNDEZ BERRIEL
Asesor


DR. MARIO DÍAZ GONZÁLEZ
Asesor



RESUMEN

Los Sitios de Disposición Final No Controlados de Residuos Sólidos Urbanos, son aquellos que no cuentan con infraestructura, ni mecanismos adecuados de operación con una operación adecuada y por lo general se localizan en lugares inadecuados, lo que genera una gran cantidad de problemas ambientales entre los que se encuentran la generación de biogás y de líquidos lixiviados. Si bien son los ayuntamientos los encargados de la construcción y operación de estos sitios, por diversos motivos suelen cerrarlos y abandonarlos sin ningún tipo de remediación o mecanismo de clausura. En la región Sotavento del Estado de Veracruz, se identificaron un total de 9 sitios de disposición final abandonados, dos de los cuales se clasifican como rellenos sanitarios, dos como sitios controlados y cuatro no controlados, que en su conjunto cuentan con un total de 326,365 m² de extensión, 1,934,526m³ de volumen con un total de 2,451,262 toneladas de residuos acumulados, lo que representa un impacto crítico para el ambiente y que requiere de una solución metodológica que se ajuste a la Normatividad nacional existente en tres etapas y que permita a los ayuntamiento desarrollar planes de clausura y la construcción de las obras necesarias para el mejoramiento del entorno y de esta manera contribuir al saneamiento ambiental y remediar estos pasivos ambientales de los cuales son responsables.

Palabras Clave

Clausura, Rehabilitación, Pasivo Ambiental, Saneamiento, Infraestructura Ambiental.

ABSTRACT

The Uncontrolled Final Disposal Sites of Urban Solid Waste are those that do not have infrastructure, operating mechanisms or improper operation and are generally located in inappropriate places, which generates a large number of environmental problems among the that are the generation of biogases and leached liquids. Although the municipalities are in charge of the construction and operation of these sites, for various reasons they tend to close them and abandon them without any type of remediation or closure mechanism.. In the Sotavento region of the State of Veracruz, a total of 9 abandoned final disposal sites were identified, two of which are classified as sanitary landfills, two as controlled sites and four uncontrolled sites, which together have a total of 326,365 m² of extension, 1,934,526m³ of volume with a total of 2,451,262 tons of accumulated waste, which represents a critical impact for the environment and that requires a methodological solution that adjusts to the existing national regulations in three stages and that allows municipality develop closure plans and the construction of the works necessary to improve the environment and thus contribute to environmental sanitation and remedy these environmental liabilities for which they are responsible.

Keywords

Closure, Rehabilitation, Environmental Liability, Sanitation, Environmental Infrastructure.

DEDICATORIAS

A mi hermosa familia, pilar de mis actos y fuente inagotable de metas

Dra. Bertha María Estévez Garrido de Susunaga

Rodrigo Manuel Susunaga Estévez

Adrián Alberto Susunaga Estévez

AGRADECIMIENTOS

Al programa de Doctorado en Ciencias Ambientales multisede del Tecnológico Nacional de México en el Instituto Tecnológico de Boca del Río y el Instituto Tecnológico de Veracruz por la apertura a la generación de conocimientos.

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	12
2. ANTECEDENTES.	17
3. MARCO TEÓRICO.....	20
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	50
5. JUSTIFICACIÓN.	52
6. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	54
7. HIPOTESIS.	55
8. OBJETIVOS.	56
9. MATERIAL Y MÉTODOS.....	57
10. RESULTADOS.....	82
11. DISCUSIÓN.	142
12. CONCLUSIONES.....	145
13. REFERENCIAS.....	147

INDICE DE TABLAS

Tabla 9.1 Precipitación y evapotranspiración promedio anual en estaciones climáticas de la Región Sotavento del Estado de Veracruz	60
Tabla 9.2 Coeficiente de compactación de sitios de disposición final	63
Tabla 9.3. Factor de Corrección del Metano.	66
Tabla 9.4 Valoración e Importancia del Impacto.	71
Tabla 10.1 Toneladas de residuos sólidos urbanos (R.S.U) en sitios de disposición final de la en la Región Sotavento.....	83
Tabla 10.2 Incremento porcentual de la disposición de R.S.U en sitios de disposición final en la Región Sotavento.....	84
Tabla 10.3 Localización y Estado de los Sitios de Disposición Final en la Región Sotavento en coordenadas UTM WGS 84 grado 14.	85
Tabla 10.4 Clasificación de los Sitios de Disposición Final Abandonados en la Región Sotavento.....	87
Tabla 10.5 Inicio de Operación y Abandono de los Sitios de Disposición Final Abandonados de la Región Sotavento del Estado de Veracruz.....	88
Tabla 10.6 Área estimada, volumen y cantidad de residuos acumulados en los Sitio de Disposición Final Abandonados de la Región Sotavento.	98
Tabla 10.7 Obtención del Coeficiente de compactación para estimación de lixiviados.....	99
Tabla 10.8 Lixiviados generados en Sitio de Disposición Final abandonados en la Región Sotavento del Estado de Veracruz para el año 2021.	100
Tabla 10.9 Determinación de la k para la Región Sotavento.	101
Tabla 10.10 Factor de Corrección de Metano y potencial de generación de metano (L ₀) para los sitios de disposición final abandonados de la Región Sotavento....	102

Tabla 10.11 Disposición de R.S.U y generación de Biogás en los Sitios de
Disposición Final Abandonados de la Región Sotavento. 104

INDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Composición de los RSU en México	21
Figura 3.2 Sitios de Disposición Final en México en 2017.	25
Figura 3.3 Relleno Sanitario “El Guayabo” Medellín de Bravo, Ver.....	26
Figura 3.4 Sitio de Disposición Final Controlado abandonado del municipio de Veracruz.	28
Figura 3.5 Sitio de Disposición Final No Controlado Los Carriles, Cotaxtla, Veracruz.	29
Figura 3.6 Conformación de los residuos.	36
Figura 3.7 Métodos Básicos para la conformación de los residuos.....	37
Figura 3.8 Conformación del Talud.	39
Figura 3.9 Drenaje superficial.....	40
Figura 3.10 Drenaje de Lixiviados.	41
Figura 3.11 Pozos de Biogás.	42
Figura 3.12 Pozos de monitoreo de aguas subterráneas	43
Figura 3.13 Pozos de Monitoreo de Biogás.....	44
Figura 3.14 Pozos de monitoreo de Lixiviados.	45
Figura 3.15 Cobertura Final con Colocación de Capa Vegetal.....	47
Figura 9.1 Región Sotavento.....	58
Figura 9.2 Climas de la Región Sotavento.	59
Figura 9.3 Matriz de Impactos Ambientales.	72
Figura 9.4 Categorización por colores según la importancia del Impacto.	73
Figura 10.1 Zona metropolitana de la Ciudad de Veracruz.	82
Figura 10.2 Sitios de Disposición Final Región Sotavento	86
Figura 10.3 Ex Basurero Municipal de Boca del Río en años 2003 y 2020.....	89

Figura 10.4 Ex basurero de La Antigua en la comunidad de Playa Oriente en los años 2005 y 2020.....	90
Figura 10.5 Ex basurero de Manlio Fabio Altamirano en la comunidad de La Plataforma en los años 2018 y 2020.	91
Figura 10.6 Ex basurero de Medellín de Bravo en la comunidad de El Guayabo en los años 2014 y 2020.	92
Figura 10.7 Ex basurero de Puente Nacional en la comunidad Chichicaxtle 2010 y 2020.	93
Figura 10.8 Ex basurero del Ayuntamiento de la Antigua en el municipio de Puente Nacional 2017 y 2020.....	94
Figura 10.9 Ex basurero del municipio de Tlalixcoyan en la comunidad de Mata Verde los años 2018 y 2020.....	95
Figura 10.10 Relleno Sanitario Clausurado de la Ciudad de Veracruz, ex hacienda Santa Fé en los años 2002 y 2020.....	96
Figura 10.11 Relleno Sanitario Abandonado de Loma Iguana La Antigua en los años 2011 y 2020.....	97
Figura 10.12 Generación de Biogás de los Sitios de Disposición Final Abandonados de la Región Sotavento, de 1990 al 2021.	103
Figura 10.13 Basurero Abandonado de Mata Verde, Tlalixcoyan.	105
Figura 10.14 Incendio del Basurero Municipal Puente Nacional en Chichicaxtle.....	106
Figura 10.15 Incendio del Ex basurero Municipal de Veracruz en la ex hacienda Santa Fe.....	107
Figura 10.16 Estación de Policía del municipio de Boca del Río, sobre el basurero municipal abandonado.	108
Figura 10.17 Residuos Sólidos presentes en el basurero abandonado de Mata Verde, Tlalixcoyan.....	109
Figura 10.18 Matriz de Impactos para el Sitio de Disposición Final No Controlado Abandonado de Playa Oriente, La Antigua.	110

Figura 10.19 Matriz de Impactos para el Sitio de Disposición Final Controlado Abandonado de la Colonia 9 de marzo, Boca del Río.....	111
Figura 10.20 Matriz de Impactos para el Sitio de Disposición Final Controlado Abandonado de El Guayabo, Medellín de Bravo.....	113
Figura 10.21 Matriz de Impactos para el Sitio de Disposición Final No Controlado Abandonado La Plataforma en Manlio Fabio Altamirano.	114
Figura 10.22 Matriz de Impactos para el Sitio de Disposición Final No Controlado Abandonado Chichicaxtle, Puente Nacional.	115
Figura 10.23 Matriz de Impactos para el Sitio de Disposición Final No Controlado Abandonado José Cardel, Puente Nacional.....	116
Figura 10.24 Matriz de Impactos para el Sitio de Disposición Final No Controlado Abandonado Mata Verde, Tlaxicoyan.....	117
Figura 10.25 Matriz de Impactos para el Relleno Sanitario clausurado Abandonado del Municipio de Veracruz.	118
Figura 10.26 Señalamiento del Sitio de Disposición Final Abandonado en proceso de clausura.....	120
Figura 10.27 Señalamientos Restrictivos.	121
Figura 10.28 Caseta de Vigilancia Prefabricada.	122
Figura 10.29 Cerca Perimetral.	123
Figura 10.30 Acomodo y conformación de los residuos en los sitios de disposición final no controlados abandonados.....	124
Figura 10.31 ubicación de la zanja para drenaje pluvial.....	126
Figura 10.32 Sistema de Drenaje Pluvial.	127
Figura 10.33 Pozos de Venteo de Biogás	128
Figura 10.34 Drenaje de Lixiviados	129
Figura 10.34 Drenaje de Lixiviados	130
Figura 10.35 Filtro de Arena Sílica.	131
Figura 10.36 Laguna de Estabilización de Lixiviados.....	131

Figura 10.37 Conformación de la cobertura final del sitio de disposición abandonado.	132
Figura 10.37 Anclaje de Geomembranas.	133
Figura 10.38 Pozo de Monitoreo de Aguas Subterráneas.....	134
Figura 10.39 Pozos de monitoreo de Biogás.....	135
Figura 10.40 Sistema de Monitoreo de Lixiviados.....	136

1. INTRODUCCIÓN

Los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) o Basura como se conocen genéricamente, son el producto que resulta de las actividades domésticas, comerciales y de la limpieza de calles, parques y jardines, están compuestos por una mezcla de residuos orgánicos como restos de productos alimenticios, papel y cartón, madera, residuos de jardinería, etc., así como de componentes inorgánicos como vidrio, plásticos y metales (SEMARNAT, 2017); los cuales al ser dispuestos de manera inadecuada contaminan al ambiente ya que generan fauna nociva, malos olores y cuando estos se descomponen emanan compuestos orgánicos volátiles, biogases y lixiviados (Vian-Pérez et al., 2019).

El incremento poblacional y el cambio en las actividades domésticas ha ocasionado que se generen grandes volúmenes de RSU, sin embargo, este aumento en la cantidad de desechos no ha sido acorde con la capacidad de las autoridades municipales para su disposición adecuada, particularmente en los países en desarrollo (Agbeshie et al., 2020), por lo que en su mayor parte estos depositan su basura en sitios no controlados donde se vierten los residuos directamente al suelo sin ningún material de cobertura utilizando para eso barrancas, minas abandonadas, terrenos baldíos (Rojas-Valencia y Sahagún-Aragón, 2012). Para el año 2020 en nuestro planeta se generaron alrededor de 2,010 millones de toneladas de RSU, de los cuales se ha calculado que no más del 33% de estos son manejados de manera ambientalmente segura y más de la mitad se disponen sin control a cielo abierto ocasionando impactos al ambiente y a la salud; por lo que se espera que para el año 2050 la cantidad global de residuos se incremente a 3,400 toneladas, con un crecimiento cercano al 70% (WB. 2020).

El artículo 115 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en su fracción III inciso c indica que los Municipios tendrán a su cargo las funciones y servicios públicos sobre la disposición final de residuos (DOF 1999), servicios públicos que se pueden prestar por sí o a través de gestores como lo establece la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (DOF, 2003) por lo que de esta manera se clasifica a los sitios de disposición final de RSU en municipales y privados.

Los Sitios de Disposición final de RSU en México se caracterizan por tener grandes diferencias sobre el manejo de los residuos y de los contaminantes que estos generan, que van desde una ausencia total de mecanismos de control hasta procesos tecnológicos complejos de coberturas sanitarias, por lo que se han clasificado dependiendo de su operación como rellenos sanitarios, rellenos de tierra controlados y los conocidos sitios no controlados o tiraderos a cielo abierto (SEMARNAT, 2018).

A partir de la entrada en vigor de la modificación de la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, publicada en 10 de mayo del 2021 que establece las 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, los sitios de disposición final se clasifican como Relleno Sanitario, Sitio Controlado o Sitio No Controlado (DOF, 2021).

El relleno sanitario es una instalación destinada a la disposición final de los RSU y Residuos de Manejo Especial (RME), y debe de cumplir con lo establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 en cuanto a las características de construcción y operación que incluye entre otras cosas las

restricciones para la selección del sitio, el control del Biogás, la extracción de lixiviados, el drenaje pluvial y el material de cobertura (DOF, 2004). El sitio de disposición final controlado es aquel que cumple con algunas de las especificaciones de un relleno sanitario en lo que se refiere a obras de infraestructura y operación, y finalmente un sitio no controlado es aquel que no cumple con ninguno de los requisitos establecidos en esta Norma Oficial Mexicana (DOF, 2021), estos últimos comúnmente son conocidos como Tiraderos a Cielo Abierto, se localizan en terrenos con una ausencia total de controles operativos y de obras de infraestructura para la minimización de los impactos ambientales (Susunaga-Miranda y Estévez-Garrido, 2018).

Cuando los Sitios de Disposición Final por diversos motivos son cerrados y abandonados, se suspende en forma definitiva el depósito de residuos sólidos ya sea por el término de su vida útil, por decisiones política o por clausura de las autoridades ambientales, por sus efectos de contaminación al entorno, o por la inconformidad de las personas vecinas (Rojas-Valencia y Sahagún-Aragón, 2012), se convierten en un pasivo ambiental ya estos lugares pueden causar impactos graves tales como la contaminación del agua subterránea y las aguas superficiales, la emisión de gases tóxicos, explosiones y malos olores (Lobo et al., 2016) y la propia inestabilidad de los residuos acumulados lo que produce derrumbes y derrames de los residuos (Yadab et al. 2019), con efectos adversos para el ambiente y la salud (Morita et al, 2020a) ya que en su mayor parte no se incluyen técnicas de monitoreo, aislamiento o rehabilitación debido a la falta de interés en la gestión de estos sitios, sobre todo en los países en desarrollo (Morita et al., 2020b), es por esto que las normativas de distintos países han incorporado la obligatoriedad de los organismos operadores a hacerse cargo (técnica y económicamente) de estos sitios por un periodo de al menos 20 años de su clausura (Lobo et al., 2016).

Para localizar, caracterizar y clasificar un sitio de disposición final abandonado y determinar los cambios que suceden en los mismos se utilizan técnicas de percepción remota (De Wet, 2016; Irfan et al., 2019), mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) las cuales son herramientas informáticas para la recopilación, el procesamiento, gestión, análisis, modelado y presentación de datos espaciales para una (Ayaim *et al.*, 2019), con las que es posible identificar y analizar mediante imágenes satelitales las características de un área determinada, ya que permite establecer criterios espaciales como el uso de suelo y la geomorfología con la herramientas disponibles como Google Earth® (Mekuria *et al.*, 2019) la cual contiene imágenes históricas con las que se puede obtener información sobre los cambios que estos sitios presentan en un tiempo determinado (Susunaga-Miranda et al., 2022).

Con la información espacial proporcionada con los sistemas de información geográfica de los sitios de disposición final (Susunaga-Miranda et al., 2022) se puede realizar una evaluación del Impacto Ambiental mediante un conjunto de procedimientos que se formulan para la toma de decisiones (Dangui et al, 2015), en especial para determinar los resultados ambientales, interpretar los mismos y comunicar sus resultados (Resta y Dotti, 2015), existen diversas metodologías para llevar a cabo este proceso, sin embargo, uno de los métodos para determinar numéricamente la importancia de los impactos ambientales, los cuales dependen de la caracterización de los mismos durante cada una de las etapas de vida de un establecimiento, entre las que se encuentran la perteneciente a Vicente Conesa Fernandez-Vitora (1997). Que mediante once parámetros jerarquiza los impactos presentes y establece la importancia del sitio (HidroAr, 2015)

Las opciones para un Sitio de Disposición Final ya cerrado puedan ser clausurado o rehabilitado es mediante sellado y confinado in situ o el retiro y traslado de los residuos y la recuperación situ (Lobo et al. 2016), el primer caso implica un

movimiento mínimo de los residuos (Méndez, 2010) y el aislamiento de los mismos mediante el depósito sobre su superficie de distintas capas de materiales poco permeables, a fin de limitar la generación de lixiviados por el paso del agua de lluvia y de retener el biogás evitando su escape libre a la atmósfera. El retiro y traslado de los residuos se puede realizar cuando el volumen de los mismos es pequeño y se cuenta con un nuevo sitio de disposición final (Lobo et al. 2016).

Son tres las etapas para la clausura de los sitios de disposición final abandonados o cerrados (CONAM/CEPIS/OPS, 2004; SEDESOL, 2005), que va desde la pre-clausura donde se incluyen la colocación de de señalamientos preventivos y restrictivos, la construcción de infraestructura para la restricción del acceso al sitio de disposición final, el control de Fauna Nociva, la recolección de residuos dispersos en las áreas colindantes del sitio y la conformación, compactación y sellado de los residuos sólidos (Lobo, 2016; DOF, 2021); la propia clausura con la conformación y estabilización de taludes, la construcción de drenaje superficial, infraestructura para el control ambiental y de sistemas de monitoreo, así como la colocación de cobertura final, suelo orgánico y capa vegetal (CONAM/CEPIS/OPS, 2004; Chakrabarti y Dubey, 2016) y finalmente la post clausura con los programas de mantenimiento de la cubierta y de las instalaciones de control, de monitoreo ambiental y el uso final que se le pretende dar al sitio (DOF, 2021).

Este documento tiene como finalidad dar a conocer donde se localizan los sitios de disposición final no controlados abandonados en el Región Sotavento del Estado de Veracruz, México, determinar sus características, las emisiones de contaminantes y el impacto el impacto ambiental que estos generan y sobre todo dar una serie de mecanismos para poder llevar a cabo la clausura y rehabilitación de los mismos de conformidad con la normatividad mexicana.

2. ANTECEDENTES.

Uno de los primeros esfuerzos en México para la clausura y rehabilitación de Tiraderos a Cielo Abierto ahora conocidos como Sitios de disposición final no controlados se dio en el Basurero de Prados de la Montaña en la Alcaldía Álvaro Obregón, en la Ciudad de México, el cual fue cerrado en el año de 1987 cuando los residuos del lugar comenzaron a esparcirse por los predios vecinos, el procedimiento consistió en la compactación de los residuos y la colocación de una serie de seis coberturas de diferentes materiales y la construcción de infraestructura para la extracción de lixiviados y de biogás, permitiendo la recuperación de 300 hectáreas en donde se originaron el parque Cuitláhuac y las alamedas Poniente y Oriente, y la unidad habitacional Tlayacapa en donde se reubicaron a las familias de pepenadores que habitaban ese lugar (López y Samano, 1996).

En el municipio de Tultitlan, Estado de México, en el 2013 se cierra el Basurero Municipal, mediante la eliminación de fauna nociva, la conformación y estabilización de taludes, la perforación de pozos de venteo, la extracción y el drenaje de los lixiviados, la colocación y compactación de una cubierta de baja permeabilidad, así como de una capa de suelo vegetal y finalmente la construcción de un parque recreativo (Cruz et al. 2002).

En el año 2000 se iniciaron los trabajos en el Tiradero de residuos en Gorai en Mumbai en la India el cual se localizaba en una zona pantanosa, en donde se depositaron residuos sin control ni compactación lo que lo se convirtió en un montículo geotécnicamente inestable, para lo cual fue necesario realizar nivelaciones, la reubicación de residuos y conformación de taludes y un

tablestacado de hormigón de 830 m de largo y 7 m de alto, cubriendo los residuos con una capa protectora y una geo membrana de 1,5 mm de Polietileno de Alta Densidad y finalmente una capa de suelo vegetal de 30 cm de espesor a fin de prevenir la erosión, la colocación de un sistema de generación de energía eléctrica por medio de la extracción y combustión de Gases de Efecto invernadero (Rodic-Wiersma y Gupta, 2012).

Para 2010 se realiza el proyecto de Diseño del Sellado y Clausura del “Vertedero de Residuos Sólidos Urbanos de Fuenlabrada de los Montes” para la recuperación de su emplazamiento el cual contempló una metodología para el Sellado y Confinamiento In Situ de este Tiradero a Cielo Abierto en desuso en España el cual incluyó la construcción de drenaje para las aguas superficiales y subterráneas, el sellado de los residuos, el sistema de captación de biogás, la colocación de una capa impermeable, geomembrana. el uso de un geocompuesto drenante, una capa de terreno soporte, una capa de tierra vegetal, y finalmente una red de drenaje perimetral. Lo anterior con una integración ambiental y recuperación del emplazamiento con la revegetación. con. especies herbáceas y especies leñosas e incluye el Plan de Vigilancia y Control (Méndez, 2010)

En el año 2019 el Gobierno del estado de Yucatán inició el programa de saneamiento y rehabilitación de los sitios de disposición final de RSU en los municipios ubicados en la Reserva Estatal Geohidrológica “Anillo de Cenotes”, el cual consistió en convertir los sitios de disposición final no controlados (algunos de los cuales estaban abandonados) a controlados en los municipios de Homún, Tekit, Tecoh, Timucuy (SDS Yucatán, 2019 a) y que consistió en el saneamiento (levantamiento y acomodo de basura) y la rehabilitación (mejoramiento y operación controlada) (SDS Yucatán, 2019 b).

El Gobierno del Estado de Jalisco en 2020 desarrolla el plan del cierre, rehabilitación y abandono del Relleno Sanitario “Los Laureles” en el municipio de Tonalá, el cual incluye las pautas normativas establecidas en la NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF, 2004), y que incluye entre otras cosas el manejo y tratamiento de Lixiviados y Biogás, las obras complementarias y las características de los programas de monitoreo ambiental (SEMADET, 2020)

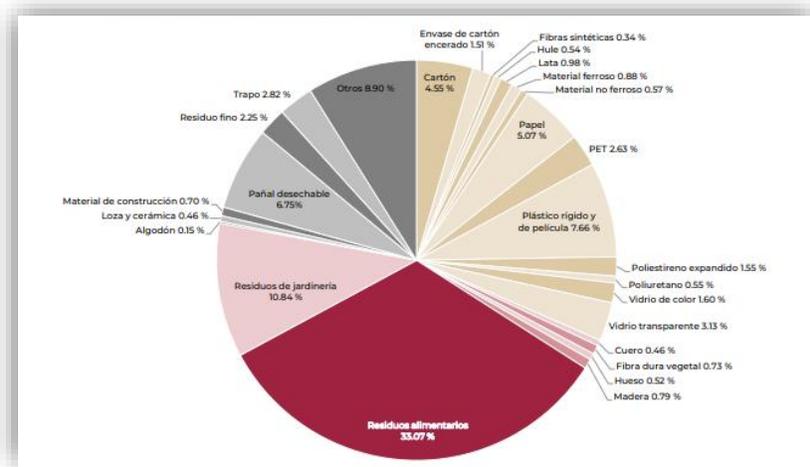
3. MARCO TEÓRICO

3.1 Los Residuos Sólidos Urbanos.

Los Residuos Sólidos Urbanos, también denominados Basura son todos aquellos desechos o materiales no deseados o inservibles que se generan como consecuencia de las actividades de producción o consumo y que tienen su origen en las casas habitación, en los comercios y en los servicios públicos (son los residuos de los productos de consumo y sus empaques, envases o embalajes) (DOF, 2003), la generación de los RSU en México para el año 2020 se estimó en 120,128 ton/día, lo que representa un índice de generación de 0.95 kilogramos por habitante día, dándose los mayores volúmenes en las entidades donde se concentra la mayoría de la población, en donde el estado de Veracruz por sí sólo se estima produce 7,813 ton/día (SEMARNAT, 2020).

La composición de los RSU es muy heterogénea, y, la predominancia de residuos orgánicos o inorgánicos varia de un lugar a otro, cambia con las estaciones del año, con los tipos de vida, con los servicios y sobre todo con la conciencia que se tiene de ellos (Abdel-Shafy y Mansour, 2018), para el año 2020 en México los residuos orgánicos (productos alimenticios, jardinería, etc.) representaron el 46.42% del total, el papel y sus derivados el 9.62% y los plásticos el 12.39% (Figura 3.1) (SEMARNAT, 2020).

Figura 3.1 Composición de los RSU en México



SEMARNAT, 2020

Evolución de residuos en los sitios de disposición final

Los residuos orgánicos que se depositan en un Sitio de Disposición Final están compuestos generalmente de un 50% de celulosa, 15% de lignina, 10% de hemicelulosa, 5% de proteína, almidón, pectina y otros azúcares solubles (Khalil et al., 2014), los cuales se descomponen en cinco fases (Sillet et al., 2015; Khalil et al., 2014; Rua-Orozco et al., 2015; Lezak et al., 2015).

Fase de hidrólisis aeróbica

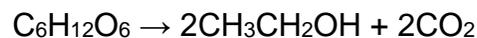
Es la fase en la cual se consume rápidamente el oxígeno y el nitrógeno presente (descomposición aeróbica), en donde las bacterias degradan la materia orgánica compleja (lignina, lípidos, hidratos de carbono, proteínas, etc) es transformada mediante hidrólisis por las bacterias hidrolíticas en componentes más simples (aminoácidos, azúcares, etc.) produciendo nitratos, sulfatos, cloratos e iones

orgánicos e iones metálicos que se disuelven fácilmente que se transportan en los lixiviados y gases como dióxido de carbono, hidrógeno y amoníaco que generan una elevación de la temperatura del sitio.

Se estima que en promedio se consume entre el 5 al 15% del material orgánico degradable, incrementado la temperatura de los residuos entre 50 y 70°C, lo que ocurre en las primeras semanas de la disposición de los desechos.

Fase ácida.

Representa la transición gradual de condiciones aeróbicas a condiciones anaeróbicas, en esta segunda etapa las bacterias acidogénicas, inician los procesos fermentativos (reacción combinada de oxidación / reducción de compuestos orgánicos) donde se genera lixiviado con alto contenido en ácidos grasos orgánicos volátiles y de componentes como propionato, butirato, alcoholes e hidrógeno, es en este momento cuando la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y el amoníaco alcanzan su máxima concentración, generando biogás con dióxido de carbono y nitrógeno, mediante las reacciones:

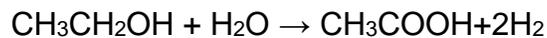
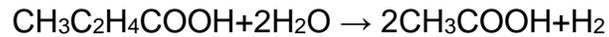


La duración de esta fase es desde unos días hasta algunas semanas.

Fase Acetogénica

Esta fase puede extenderse durante varios años o incluso décadas. Se caracteriza por la presencia de las llamadas bacterias "acetogénicas" que hidrolizan y transformar la materia orgánica por fermentación produciendo moléculas simples y

soluble (ácidos grasos, amoniaco), formando hidrógeno y dióxido de carbono en donde se mantiene el ácido del medio pH, con las reacciones:

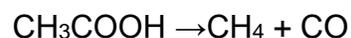


El lixiviado producido durante este período tienen valores elevados de DBO y un pH ácido que facilita la disolución de compuestos metálicos como el Hierro, Manganeso, Zinc, Calcio y Magnesio.

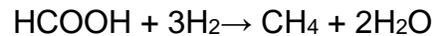
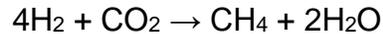
Fase metanogénica

Esta etapa de biodegradación de la materia orgánica corresponde a la producción de metano (del orden de 50 a 60% en volumen) y dióxido de carbono (contenido incluido entre 40 y 60% en volumen) de productos orgánicos de las etapas procesos metabólicos, a excepción de la formación de biogás, el lixiviado tiene un bajo DQO. En este momento las condiciones predominantes en los residuos son totalmente anaeróbicas, en donde se genera metano a partir del acetato por la acción de las bacterias *archaea metanogénicas acetoclásticas*, y del hidrógeno y dióxido de carbono por metabolismo de las bacterias *archaea metanogénicas hidrogenotróficas*, con lo que la concentración de componentes en los lixiviados decrece (al reducirse su carga orgánica), lo que produce un aumento en el pH, el biogás producido se compone de un 55% de metano y el dióxido de carbono disminuye al 45%.

Reacción por bacterias *archaea metanogénicas acetoclásticas*



Reacciones por bacterias *archaea metanogénicas hidrogenotróficas*.



Fase sulfhidrogenética o de estabilización.

En esta etapa final la generación de metano decrece y el dióxido de carbono se sustituye en parte por nitrógeno y oxígeno y se inicia la formación de ácido sulfhídrico gaseoso por reducción de sulfatos, dada una competencia por el sustrato entre las bacterias reductoras de sulfato y las *archaea metanogénica*.

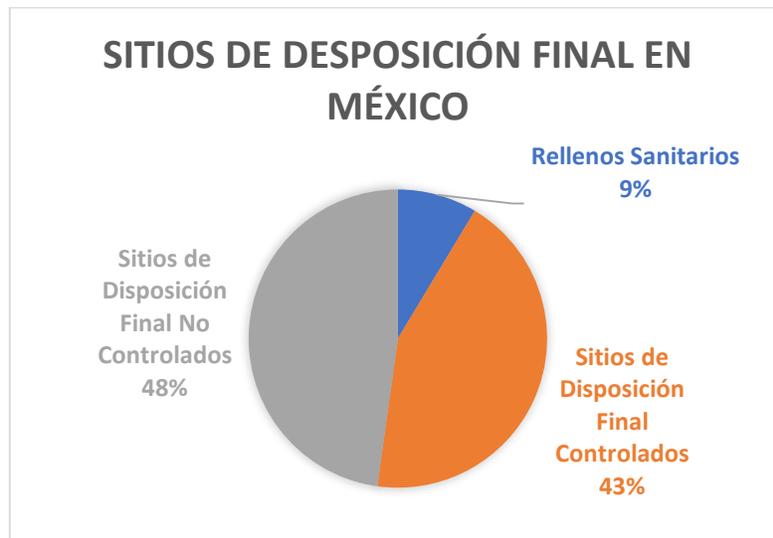
3.2 Los Sitios de Disposición Final

Los sitios de disposición final de los residuos son lugares donde se deposita o confinan de manera permanente y que pueden tener o no instalaciones que permiten evitar su desaminación y afectación a los ecosistemas y a la salud de la población (SEMARNAT, 2015), en México estos se clasifican dependiendo de su operación dependen del grado de control de los residuos sólidos urbanos como Rellenos Sanitarios, Sitios de Disposición Controlados y Sitios de Disposición No controladas y las características técnicas puede ser desde procesos tecnológicos complejos para evitar la contaminación ambiental hasta la ausencia completa de infraestructura. (DOF, 2021).

Para el año 2017 como se muestra en la figura 3.2 de los 2,203 Sitios de Disposición Final 190 se pueden considera como Rellenos Sanitarios al cumplir con la totalidad de las disposiciones de la NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF, 2004), 1,053 se encuentran carentes de toda infraestructura por lo que se pueden clasificar como

Sitios de disposición final no controlados y 960 como Sitios de Disposición Final Controlados (SEMARNAT, 2020).

Figura 3.2 Sitios de Disposición Final en México en 2017.



SEMARNAT, 2020

a) Rellenos Sanitarios

El relleno sanitario es una instalación con infraestructura destinada a la disposición final de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, en el cual la selección de sitio, diseño, construcción, operación monitoreo y obras complementarias, cumplen con los requisitos de la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 para las especificaciones de protección ambiental para los casos de tanto para la disposición de residuos sólidos urbanos como de manejo especial y que incluyen entre otras cosas sistemas de control de biogás, mecanismos de extracción y tratamiento de lixiviados, obras de drenaje pluvial y material de cobertura (DOF, 2004).

Figura 3.3 Relleno Sanitario “El Guayabo” Medellín de
Bravo, Ver.



Inclán, 2019.

El relleno sanitario es un método de disposición final de residuos sólidos urbanos que utiliza técnicas de ingeniería para confinar la basura, este se construye típicamente excavando en el suelo y colocando un recubrimiento plástico para proteger el agua subterránea y de esta manera minimizar la migración de lixiviados a las capas subterráneas y con la colocación de un mecanismo de recolección de los mismos para su tratamiento (Abdel-Shafy y Mansour, 2018).

b) Sitios de Disposición Final Controlados.

Estos sitios de disposición final de residuos sólidos tienen la característica fundamental de que se encuentran en lugares donde no fueron planeados, no tienen las características de diseño y operación que establece la NOM-083-SEMARNAT-2003 y cuentan con poca infraestructura o una cobertura inadecuada (Calva-Alejo y Rojas-Caldelas R., 2014), en el Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos publicado en el año 2020 se define que estos sitios deben de contar al menos con un tipo de instalaciones entre los que se encuentran (SEMARNAT, 2020).

- Báscula.
- Captura de Lixiviados.
- Captura de Biogás.
- Geomembrana.

Además, con alguno de los siguientes procesos:

- Control de Accesos.
- Control de Admisión de Residuos.
- Compactación y recubrimiento con tierra.
- Monitoreo en aspecto de higiene y seguridad.

Figura 3.4 Sitio de Disposición Final Controlado abandonado del municipio de Veracruz.



c) Sitios de disposición final no controlados.

Los sitios de disposición final no controlados o Tiraderos a Cielo Abierto son lugares no adecuados en donde se disponen y acumulan los RSU y que no cuentan con ningún tipo de infraestructura sanitaria ni operativa y generan un impacto negativo al ambiente, estos se localizan principalmente en barrancas, terrenos baldíos y áreas geológicamente inestables provocando contaminación el suelo, agua y aire, la proliferación de fauna nociva y con efectos adversos para la salud (Rojas-Valencia y Sahagún-Aragón 2012) en los que en 2013 se depositaba el 25% del total de los residuos sólidos urbanos (SEMARNAT, 2015).

Figura 3.5 Sitio de Disposición Final No Controlado
Los Carriles, Cotaxtla, Veracruz.



3.3 Factores de Riesgo de los Sitios de disposición final no controlados Abandonados

La disposición inadecuada de los RSU es una práctica común en los países en desarrollo, los sitio donde se depositan los desechos independientemente de su tamaño constituyen una fuente de contaminación a largo plazo, ya que impactan al ambiente por años o décadas después de su cierre o clausura (Morita et al., 2020a).

Los factores de riesgo que sen han determinado para los Sitio de Disposición Final No Controlado son: la contaminación del agua subterránea y superficial por lixiviados, generación y emisión de biogases, incendios y explosiones, malos olores, inestabilidad y asentamiento de los terrenos, contaminación del suelo, perdida de la vegetación y presencia de fauna nociva (Yadav et al, 2020).

El lixiviado de los Sitios de Disposición Final se genera en parte cuando hay un exceso de agua de lluvia la cual se infiltra a través de las capas de residuos del basurero. El lixiviado se puede definir como una solución a base de agua cuyos componentes principales son los metales pesados, la materia orgánica y los compuestos organoclorados, los que contaminan principalmente las aguas superficiales y subterráneas (Susunaga-Miranda y Estévez-Garrido, 2018). La generación volumétrica de lixiviado está en función fundamentalmente de la precipitación pluvial, las escorrentías y la infiltración a través de grietas en el terreno, y debido a la localización de cada sitio de disposición final y las condiciones de operación, las tasas esperadas pueden variar, es por esto que el cálculo del volumen generado de lixiviados tenga que realizarse de manera particular para cada caso (López-Vega et al. 2021).

La cantidad de emisiones de gases de los sitios de disposición final está influenciada por factores como el volumen de los residuos acumulados, el contenido de materia orgánica, la humedad, la temperatura y la edad de los desechos, los cuales intervienen en las diferentes etapas de estabilización de los RSU. (Zhang et al. 2019).

La duración de cada fase varía con las condiciones del sitio de disposición final, pero por lo general la descomposición de la fase de hidrólisis aeróbica dura de días a meses, y la fase metanogénica se alanza plenamente a los seis meses del depósito de los residuos y puede permanecer durante 20 años, aunque la emisión de biogases puede continuar por más de 50 años, dependiendo de la cantidad de desechos acumulados (Khalil et al., 2014).

a) Riesgos de la Fase hidrólisis anaeróbica y acidogénica.

Como resultado de la descomposición de la materia orgánica en los residuos sólidos urbanos se genera una serie de impactos al ambiente que varían con el tiempo (Lezak et al. 2015) y con las características del sitio de disposición final, al inicio de la descomposición de la materia orgánica por la estabilización aeróbica de los sitios de disposición final se presenta la conversión de compuestos de carbono y nitrógeno y el inicio de la generación de lixiviados y biogases, los primeros comienzan su migración desde los basureros hacia los mantos acuíferos con una muy alta carga de iones metálicos entre los que se encuentran los metales pesados, los cuales generan una diversidad de problemas ambientales y de salud, ya que estos componentes aún en niveles de trazas ocasionan alteraciones en los organismos y el ambiente, la exposición aún a niveles bajos de Cd puede provocar daños en los riñones, el hígado, el sistema óseo y el sistema cardiovascular, así como el deterioro de la vista y la audición, y fuertes efectos teratogénicos y mutagénicos, el envenenamiento con puede causar arterioesclerosis e hipertensión, trombosis, aterosclerosis y enfermedades cardíacas, el Níquel puede causar enfermedades cardiovasculares, asma, fibrosis pulmonar, y cáncer de las vías respiratorias; el Cromo hexavalente Cr^{6+} es dañino para los ojos, la piel y el sistema respiratorio y lo más preocupante es que es altamente cancerígeno (Maitra et al., 2022).

b) Riesgos de la fase metanogénica.

En la fase metanogénica la digestión anaeróbica está asociada a la generación de varios gases de efecto invernadero entre los que se encuentran el CO_2 , CH_4 y N_2O (Paolini et al. 2018). El metano liberado por los procesos de biogás no se considera que ocasione problemas a la salud y no existe evidencia de interacciones

relevantes con los sistemas biológicos, aunque la exposición a mezclas de hidrocarburos puede tener algunos efectos adversos en los seres humanos (Prasad et al., 2011), sin embargo, el metano es un gas de efecto invernadero que influye en el calentamiento global, del cual se ha estimado que tiene una potencia de 28 a 36 veces mayor que el CO₂, y se considera como el segundo componente antropogénico entre los Gases de Efecto Invernadero (Paolini et al. 2018). Otro de los gases que se generan en la fase metanogénica de los residuos además del CO₂ y el CH₄, el óxido nitroso, el cual es otro Gas de Efecto Invernadero, ya que su emisión durante la generación del biogás contribuye significativamente al calentamiento global, ya que es un importante agente de cambio de temperatura en la atmósfera (Jordan et al. 2016).

Un riesgo que se presenta en los sitios de disposición final en la fase metanogénica es de los incendios espontáneos de los residuos sólidos urbanos, los cuales resultan de una combinación de factores como la generación de metano, el cual queda atrapado en ciertas zonas de las celdas o zonas de tiro y que al entrar en contacto con iniciadores de fuego como pudiera ser la fricción entre metales (Bernaché, 2015) estos inician un proceso de combustión que genera gases como el monóxido de carbono por la quema de llantas y cables eléctricos (Atencio-Pérez et al., 2013).

c) Riesgos de Fase sulfhidrogenética o de estabilización

El ácido sulfhídrico gaseoso (H₂S) que se genera en los sitios de disposición final en su fase de estabilización es un gas incoloro y altamente inflamable, el cual tiene un olor característico a huevo podrido, que ocasiona a altos niveles de exposición un mal funcionamiento del sistema nervioso central y parálisis respiratoria (Njoku et al., 2019).

d) Riesgos presentes en cualquiera de las fases de los RSU.

Los sitios de disposición final no controlado se pueden generar una serie de microcontaminantes orgánicos tóxicos entre los que se incluyen las dibenzo-p-dioxinas policloradas y dibenzofuranos policlorados (DPDPC y DFPC) que se denominan dioxinas y hidrocarburos policíclicos aromáticos (HAP). Las dioxinas se pueden formar a partir de la presencia de sustancias que contienen cloro en el vertedero y de los incendios de los basureros que son perjudiciales para la salud humana ya que están relacionados con propiedades cancerígenas potenciales cuando están en contacto con seres humanos (Njoku et al., 2019).

Los incendios de los sitios de disposición final generan la emisión de gases tóxicos a la atmósfera, lo cual representa un riesgo para la salud y el ambiente, ya que el resultado de este proceso de combustión es el incremento en la generación de gases de efecto invernadero y daño a las personas de las cercanías de los mismos respiran estos gases (Dafi et al., 2020).

3.4 Proceso de Clausura de los Sitios de Disposición Final

Considerando la información recopilada en diversas guías y manuales y en la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF, 2004) y su modificación del año 2021 (DOF, 2021) publicadas en el Diario Oficial de la Federación, que incluyen las especificaciones de protección ambiental para la clausura de un sitio de disposición final abandonado que, en el entendido de esta norma son aquellos que están sujetos al procedimiento de clausura ya que se ha suspendido la recepción de residuos sólidos urbanos (DOF, 2021), se pueden establecer las siguientes etapas:

a) Etapa de Pre clausura o Cierre.

En esta etapa se llevan a cabo una serie de trabajos cuyo objetivo es el de preparar el sitio de disposición final no controlado abandonado para que se inicie la clausura y debe de ocurrir cuando se haya terminado el depósito de los residuos (CONAM/CEPIS/OPS, 2004), las acciones deben de asegurar el control de accesos de personas no autorizadas, y el control de fauna nociva (Vectores), y las obras inician con el perfilado de la superficie para la atenuación de las pendientes, por lo que en ocasiones es necesario mover y compactar los residuos (lo que representa emisión momentánea de contaminantes) por lo que las acciones consideradas en esta fase son las siguientes (SEDESOL, 2005; Lobo et al, 2016):

- Colocación de señalamientos preventivos y restrictivos.
- Construcción de infraestructura para la restricción del acceso al sitio de disposición final.
- Control de Fauna Nociva
- Recolección de residuos dispersos en las áreas colindantes del sitio.
- Conformación, compactación y sellado de los residuos sólidos

Señalamientos preventivos y restrictivos

El señalamiento preventivo tiene como objeto advertir a la comunidad del inicio de las obras por la clausura del sitio de disposición final, su fecha de inicio y el uso que se le dará al emplazamiento, así como señalar y evidenciar la precaución que se debe de tener (CONAM/CEPIS/OPS, 2004).

Restricción de Acceso al Sitio de Disposición Final

La restricción de acceso al Sitio se realiza mediante caseta de Vigilancia y cercado perimetral del sitio, la caseta de vigilancia_tiene que estar dispuesta de tal forma que permita al personal hacer el seguimiento de las obras clausura del sitio de disposición final, con un vigilante que debe tener una visual completa de las vías de acceso y permitir al personal el resguardo de las herramientas necesarias para su labor (CONAM/CEPIS/OPS, 2004), mientras que con el cercado perimetral del sitio se establecen los límites de la propiedad, impide la entrada de animales y controla la entrada y salida del personal (CONAM/CEPIS/OPS, 2004; SEDESOL, 2005)

Control de Fauna Nociva

El control de la fauna nociva se da por eliminación de vectores por medio de la fumigación y el uso de cebos para roedores, así como trampas para animales mayores a fin de evitar que estas migren hacia los predios vecinos (SEDESOL, 2005). Para la implementación de un control biológico se debe de considerar los mismos factores que tienen cualquier método control a fin de no dañar el ambiente (Arán, 2014).

Las aves y los insectos comenzarán un proceso de migración natural hacia otros lugares donde tengan su sustento, estos no pueden ser eliminados y el proceso de control de los mismos será natural (CONAM/CEPIS/OPS, 2004).

Conformación, compactación y sellado de los residuos sólidos

La Conformación, compactación y sellado de los residuos sólidos se efectúa mediante el movimiento y conformación de los residuos (Figura 3.6), cuya finalidad es la de concentrar los desechos dispersos en la zona, amontonarlos y confinarlos en un área central del sitio tratando de formar una pila con una menor área posible a fin de procurar la formación de taludes (SEDESOL, 2005).

Figura 3.6 Conformación de los residuos.



FEAM, 2010.

El objetivo de la conformación es que los residuos estén confinados de manera adecuada para prevenir los efectos ambientales sobre el sitio de disposición final para lo cual existen tres métodos básicos (Figura 3.7) que deberán de considerar la topografía del lugar, y la disponibilidad de materiales de cobertura, los cuales son (Arán, 2014; MoE, 2021).

- Método de Trinchera.
- Método de Área.
- Método Mixto.

Figura 3.7 Métodos Básicos para la conformación de los residuos.



MoE, 2021.

La compactación de los residuos se realiza una vez conformados los residuos en forma de pila, esta actividad debe de realizarse con equipo mecánico como un compactador de rodillos tipo pata de cabra el cual debe de subir y bajar el talud conformado de acuerdo al plan de operación que se adopte para esta fase, la cual

estará en función de los resultados que se obtengan en las pruebas de compactación que se realicen en un laboratorio de mecánica de suelos, en los cuales se incluye el contenido de humedad y la capacidad del suelo para alcanzar la mayor compactación (SEDESOL, 2005).

Al término de la conformación y compactación de los residuos se continuará con el acarreo, colocación y compactación del material para el sellado de los residuos, el cual será colocado mediante camiones de volteo que los transportarán desde el banco de material más próximo y esparcidos por medio de un bulldozer. (CONAM/CEPIS/OPS, 2004).

b) Etapa de Clausura

Esta fase consiste en la construcción de mecanismos para el control ambiental, la cual se inicia cuando la totalidad de los residuos sólidos hayan sido cubiertos, conformados y compactados, lo anterior de conformidad con la NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF, 2021) mediante conformación de la cobertura final que es esencialmente en la colocación de una capa separadora entre los residuos acumulados y el ambiente, con el objetivo de protegerlos de los efectos adversos de la migración de contaminantes (CONAM/CEPIS/OPS, 2004; Chakrabarti y Dubey, 2016).

- Conformación y Estabilidad de Taludes.
- Construcción del Drenaje Superficial (Sistemas de control de escurrimientos).
- Construcción de la infraestructura para el control de Lixiviados y Biogás.
- Construcción de sistemas para el Monitoreo Ambiental.
- Colocación de Cobertura Final.
- Colocación de suelo orgánico y capa vegetal.

Conformación y Estabilidad de Taludes.

Los taludes son la superficie inclinada con respecto a la horizontal que se genera de manera permanente y que se basa en la reconstrucción geométrica de la estructura de la capa de sellado de los residuos para que geotécnicamente se garantice la estabilidad de su estructura (Figura 3.8), se originan por la construcción de los terraplenes de confinamiento, su estabilidad es uno de los factores más importantes que se deben de considerar en el proceso de clausura (SEDESOL, 2005).

Figura 3.8 Conformación del Talud.



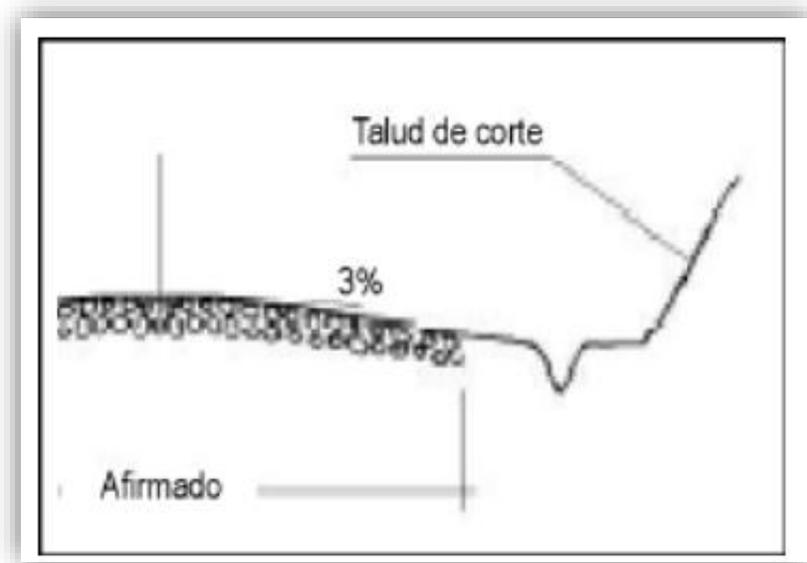
Debido a que los residuos son una mezcla heterogénea de componentes y las condiciones geomorfológicas y climatológicas de cada región es difícil establecer criterios estandarizados para la conformación y estabilización de taludes, sin

embargo, para el caso de sitios de disposición abandonados es preferible un solo talud con pendiente inclinada a un ángulo de 45° (SEDESOL, 2005).

Construcción del Drenaje Superficial (Sistemas de control de escurrimientos).

En zonas superficiales donde se dé el curso de agua de manera permanente o debido a las lluvias presentes es importante considerar la construcción de zanjas de coronación perimetral para evitar que estas aguas lleguen hasta la zona de clausura del sitio de disposición final, lo anterior como drenaje superficial el cual debe de tener un acabado uniforme con pendiente mínima de 2% aguas abajo como se muestra en la figura 3.9 (CONAM/CEPIS/OPS, 2004).

Figura 3.9 Drenaje superficial.

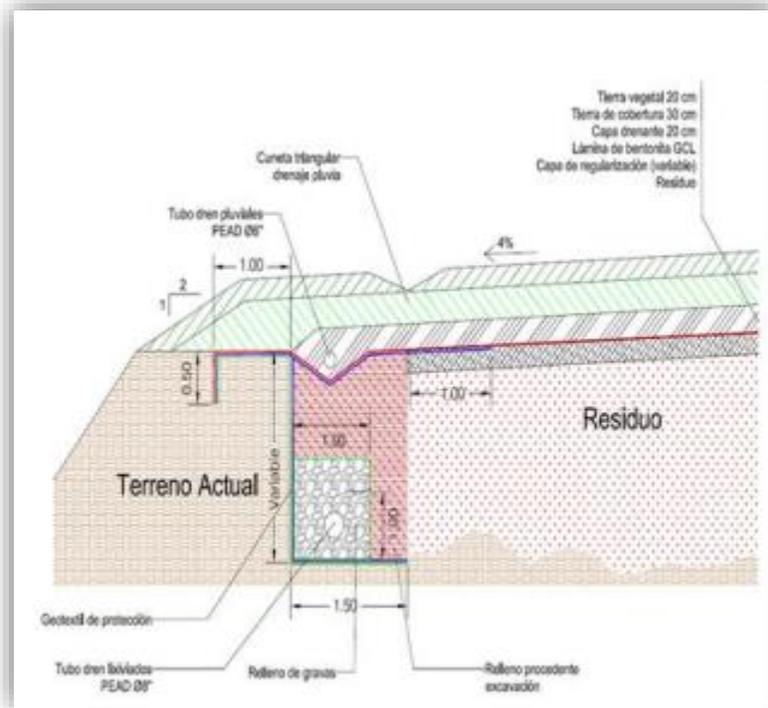


CONAM/CEPIS/OPS, 2004.

Construcción de la infraestructura para el control de Lixiviados y Biogás.

El drenaje de los lixiviados consiste en una línea de conducción que se construye en el perímetro de la plataforma base del talud conformado (Figura 3.10), para que por gravedad estos sean conducidos a un registro de recolección para ser enviados a una laguna de tratamiento de lixiviados (FEAM, 2010; MINAM, 2019).

Figura 3.10 Drenaje de Lixiviados.

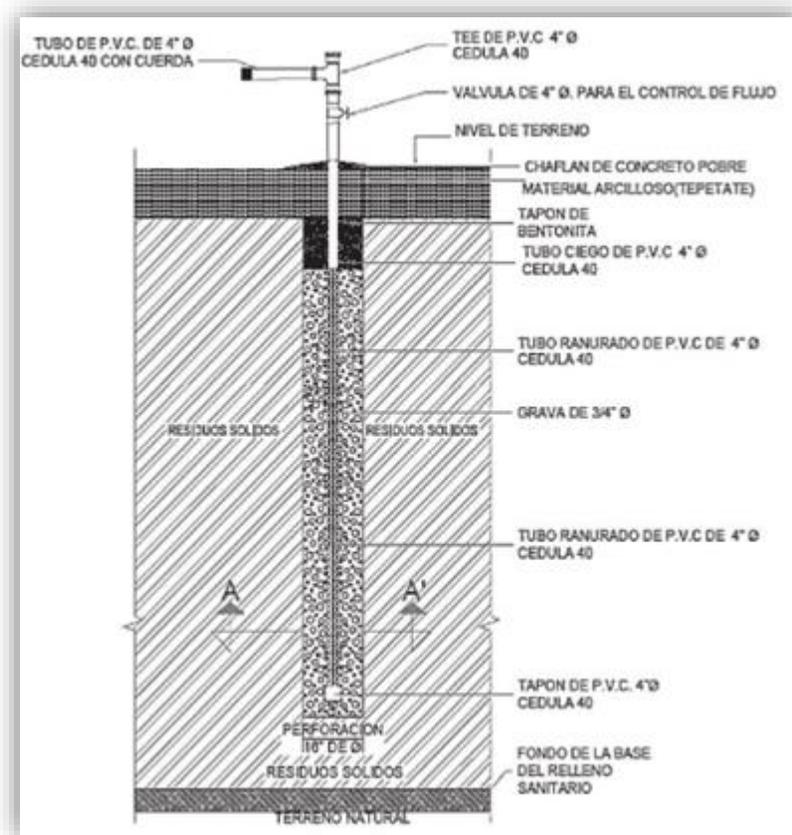


MINAM, 2019.

La infraestructura más apropiada para el control del biogás de los sitios de disposición final es la construcción de chimeneas o pozos de venteo (Figura 3.11), los cuales se habilitan una vez terminado con la conformación, compactación y

sellado de los residuos sólidos y por lo general se perforan pozos de hasta donde se colocan tubos de PCV ranurados y con un relleno de gravas, arriba de los cuales se instalan quemadores de gas o sistemas de colecta de los mismos (CONAM/CEPIS/OPS, 2004; MINAM, 2019).

Figura 3.11 Pozos de Biogás.



Andrade et al., 2018

Construcción de Sistemas de Monitoreo Ambiental

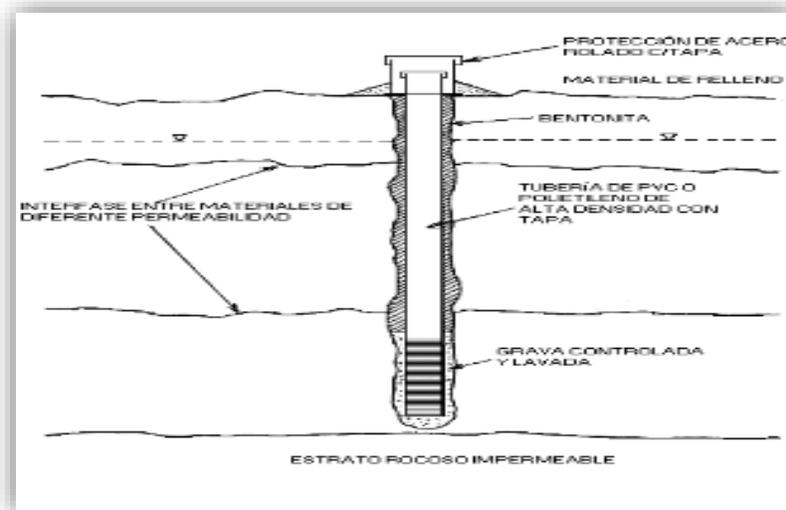
Estas obras que forman parte de la clausura de los sitios de disposición final, tiene la finalidad de determinar los posibles efectos al ambiente y a la salud, provocados

por la emisión de contaminantes generados por los residuos en su proceso degradativo y medir la influencia de las condiciones ambientales sobre el sitio (CONAM/CEPIS/OPS, 2004; MINAM, 2019), los cuales se clasifican en:

- Sistemas de monitoreo de agua subterránea.
- Sistemas de monitoreo de biogás.
- Sistema de monitoreo de lixiviados.
- Sistema de monitoreo de asentamientos diferenciales y estabilidad de taludes.

El monitoreo de aguas subterráneas tiene el objetivo detectar la migración de los contaminantes al manto freático desde el sitio de disposición final y determinar si los parámetros se encuentran dentro de los límites que establece la NOM-001-SEMARNAT-2021; el cual se monitorea en pozos construidos para tal efecto (Figura 3.12).

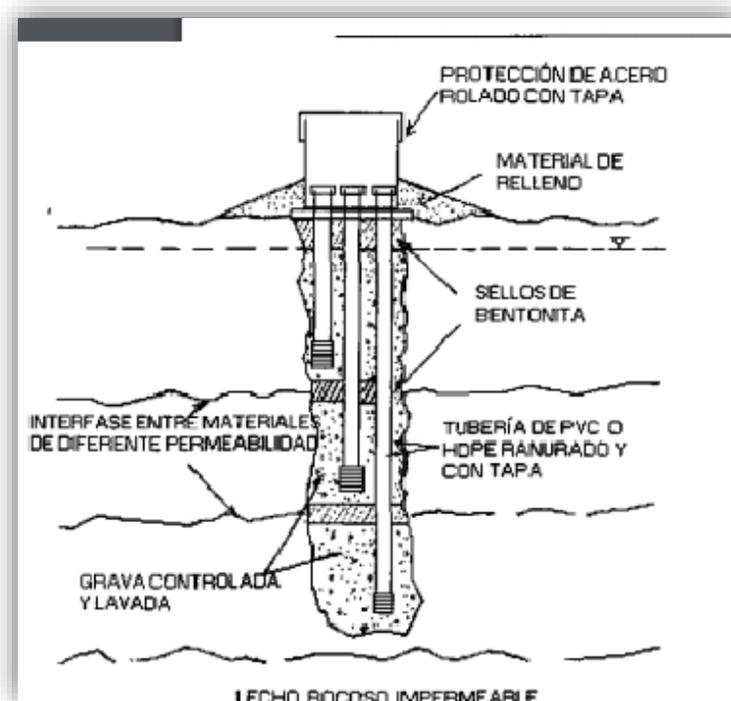
Figura 3.12 Pozos de monitoreo de aguas subterráneas



COCEF-BECC, 2016

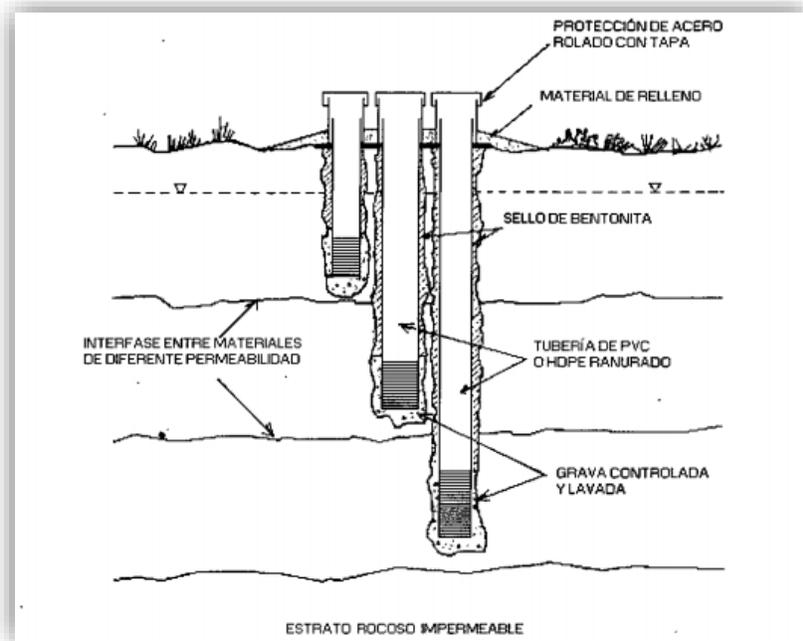
El biogás se monitorea en pozos (Figura 3.13) con la finalidad de detectar la emisión de gases de efecto invernadero como el metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y la presencia de otros gases como el ácido sulfhídrico (H_2S), Nitrógeno (N_2), hidrógeno (H_2) y Oxígeno (O_2); en el caso de los lixiviados sirve para establecer si estos están migrando en el subsuelo (Figura 3.14) y los asentamientos diferenciales tienen el objeto de mostrar las tendencias del movimiento de los taludes conformados con los residuos y su material de cobertura, y para identificar fallas por deslizamiento que afecten la estabilidad del sitio conformado (CONAM/CEPIS/OPS, 2004; DOF, 2021).

Figura 3.13 Pozos de Monitoreo de Biogás.



COCEF-BECC 2016

Figura 3.14 Pozos de monitoreo de Lixiviados.



COCEF-BECC 2016

Colocación de la cobertura final

Consiste en el aislamiento de los residuos (figura 3.15), a fin de controlar la infiltración lluvia en el sitio y la generación de biogás, minimizar la erosión, el impacto en las aguas subterráneas y permitir un drenaje adecuado, mediante materiales naturales o sintéticos (DOF, 2021), lo anterior a efecto de evitar que los residuos entren en contacto con los seres humanos, se ocasionen incendios, explosiones y malos olores (MFE, 2001) y para regenerar el ambiente que lo circunda (SEDESOL, 2005).

Los materiales naturales de cobertura más comunes son (SEDESOL, 2005):

- Gravas.
- Arenas.
- Arcillas.

Las gravas incrementan el nivel de compactación del sitio en proceso de clausura, las arenas permiten cubrir las irregularidades en la cobertura con lo que se reduce la permeabilidad de la misma y son buenas bases de la cubierta vegetal (SEDESOL, 2005; FEAM, 2010).

El material sintético consiste en tres tipos de membranas (SEDESOL, 2005).

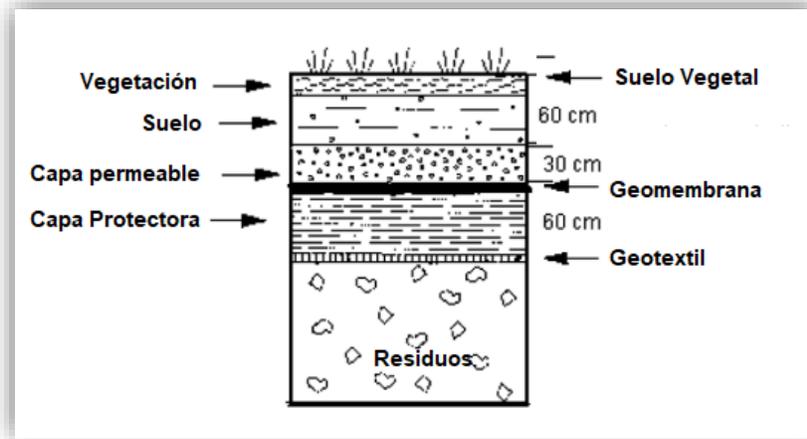
- Geomembranas.
- Membranas de PVC.
- Geotextil.

La geomembrana es un conjunto lámina de polietileno con espesores de entre 0,75 mm (30 milésimas de pulgada) hasta 1,5 mm (60 milésimas de pulgada) la cuales se adhieren por termo fusión, las membranas de PVC son más rígidas que las anteriores con espesores similares, pero con un sistema de pegado con adhesivo plástico, las membranas con alma geotextil consisten en un hilado no tejido, por lo regular impregnadas con asfalto plástico el cual sirve de mecanismo de sellado (SEDESOL, 2005; FEAM, 2010).

Colocación de capa vegetal

La mayoría de las plantas aumentan la disponibilidad de nutrientes en el suelo, ya que secretan agentes quelantes catiónicos, ácidos orgánicos o enzimas como la fosfatasa, por lo que influyen en gran manera en la degradación de contaminantes (Nagerdran et al., 2006).

Figura 3.15 Cobertura Final con Colocación de Capa Vegetal.



Nagerdran et al., 2006

c) Etapa de Postclausura

Cuando el sitio de disposición final haya sido clausurado, éste sufrirá una serie de cambios al paso del tiempo, lo anterior debido a la degradación continua de los residuos sólidos, la movilidad de los mismos, la continua generación de contaminantes (biogás y lixiviados), o por los efectos del clima, las alteraciones geológicas, movimientos del suelo, sismos, etc (Lobo et al., 2019), por lo cual se debe de vigilar estos sitios por un periodo de 30 años (DOF, 2003), por lo anterior es que en esta etapa se recomienda que se lleven a cabo dos actividades fundamentales: mantenimiento de la cobertura del sitio de disposición final y de sus instalaciones construidas para el control ambiental a fin de minimizar el impacto al ambiente y la segunda el monitoreo de las posibles fuentes de contaminación del sitio y la estabilidad de los taludes (Lobo et al., 2016), para lo cual se desarrollan principalmente dos actividades (CONAM/CEPIS/OPS, 2004).

- Mantenimiento de la cubierta y de instalaciones de control.
- Programa de Monitoreo ambiental.
- Uso Final del Sitio.

Mantenimiento del Sitio Clausurado.

Es el conjunto de procedimientos que durante un período de al menos 20 años se debe de llevar a cabo para que no exista riesgo al ambiente, en donde se debe de incluir el mantenimiento tanto de los sistemas de biogás y lixiviados como de la cobertura final mediante la reparación de grietas y hundimientos provocados por la degradación de los residuos, así como el programa de monitoreo de la emisión de biogás y la generación de lixiviados (DOF, 2021).

Programa de Monitoreo

De acuerdo a la NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF, 2004), para prevenir condiciones que representen un riesgo para el ambiente por la emisión de contaminantes como son el biogás y los lixiviados, se debe de diseñar y aplicar un programa para el monitoreo, para un periodo de 20 años el cual puede ser reducido cuando se demuestre que ya no existen riesgos para el ambiente.

Las posibles emisiones de gases a través de la superficie del sitio de disposición final se pueden detectar, por ejemplo, mediante el uso de dispositivos de monitoreo de los biogases generalmente CH_4 , CO_2 , a lo que también es necesario monitorear el agua subterránea en cuanto a niveles y calidad (Artuso et al., 2018).

Uso Final del Sitio

Como lo indica el Proyecto de NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF, 2021), una vez concluida la clausura del sitio de disposición final, el uso de suelo permitido sobre el mismo debe de estar de acorde con los programas de ordenamiento ecológico territoriales o urbanos aprobados por la autoridad competente, donde se indique las restricciones relacionadas con la capacidad de carga, la inestabilidad por hundimientos diferenciales y la presencia de lixiviados y de biogás, en donde solo se podrá utilizar el área del sitio como parques, jardines y áreas verdes garantizando la seguridad e integridad de las personas que los usen.

En caso de que se determine el uso de suelo para otro tipo de infraestructura, la autoridad ambiental competente deberá de evaluar y autorizar bajo si responsabilidad mediante los mecanismos pertinentes, cuando se cuenten con la infraestructura para el control de los contaminantes y para evitar los asentamientos diferenciales (DOF, 2021), con alguna de las siguientes opciones (Artuso et al., 2018):

- Campo de golf.
- Uso agrícola.
- Pastizales para ganado.
- Cultivos energéticos.
- Instalaciones fotovoltaicas.

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

La disposición final de los RSU es uno de los principales problemas en los municipios de México ya que presenta una creciente cantidad de desechos, lo que ocasiona que se rebase la capacidad de los basureros, que en su mayor parte no cuentan con infraestructura para el control de la contaminación, con una falta de estrategias de gestión de los residuos (Bernaché, 2015) generando graves problemas ambientales (Ferronato y Torretta, 2019).

La región Sotavento en el centro del Estado de Veracruz, contaba en 2009 con 11 Sitio de Disposición Final No Controlado y un relleno sanitario (En el municipio de Veracruz) en donde se depositaban y almacenaban 411 mil toneladas anuales, lo que equivale a 1,126 toneladas diarias, con un índice de generación de 1.15 kg por persona al día (SEFIPLAN, 2011). Para el 2015 en la Región Sotavento, contaba con un total de 18 Sitio de Disposición Final No Controlado y dos rellenos sanitarios el área ocupada por los Sitio de Disposición Final No Controlado era de 15 hectáreas (INEGI, 2016a).

Cuando un Sitio de Disposición Final No Controlado es cerrado y abandonado este se convierte en un Pasivo Ambiental, ya que estos al no ser remediados no hay mecanismos que impidan la dispersión de los contaminantes (DOF, 2003), a nivel regional el manejo inadecuado de los RSU provoca impactos perjudiciales en los ecosistemas y en la salud, sobre todo por la generación de biogáses y la quema descontrolada de los basureros que provoca contaminación atmosférica por emisiones de gases, del suelo y del agua por la generación de lixiviados (Iqbal et al., 2020) Los riesgos que representa los sitios de disposición final abandonados

hacia su entorno derivan de que aún después de haber cesado la acumulación de residuos, la emisión de contaminantes puede extenderse por más de 20 años, por lo que se consideran pasivos ambientales (Lobo et al. 2016).

En México, los lineamientos para la clausura y saneamiento ambiental de los Sitios de Disposición Final no Controlados son limitados, las acciones por lo general se centran en cubrirlos con una capa de tierra y se abandonan, lo anterior, aunque visualmente resuelve el problema no evita que los contaminantes migren y contaminen los mantos acuíferos y las zonas de cultivo cercanas (Rojas-Valencia y Sahagún-Aragón, 2012).

Si bien existen tres métodos diferentes de rehabilitación de Sitios de Disposición Final (Lobo et al. 2016) cada uno de ellos puede tener nuevas tecnologías que incidan en los costos de la recuperación de los sitios de disposición final (Gala, 2019) y no existe un procedimiento que determine cual método es el más adecuado para las condiciones de la Región Sotavento del Estado de Veracruz, que permita proponer soluciones a la mala gestión de los Residuos.

5. JUSTIFICACIÓN.

Cuando un Sitio de Disposición Final No Controlado es abandonado sin realizar ningún mecanismo de rehabilitación puede causar la degradación al ambiente debido entre otras cosas a la falta de infraestructura adecuada para el control de los residuos, ya sea por no contar con cobertura, aislamiento o tratamiento de los desechos y por la quema de los mismos, lo que provoca la contaminación del agua superficial y subterránea por la formación de lixiviados, disminución de la abundancia vegetal por el acumulamiento de las partículas sólidas, generación de gases de efecto invernadero en forma de biogases, la formación de asentamientos por la inestabilidad de los residuos, la presencia de olores desagradables y fauna nociva, que generan alteraciones en el entorno y problemas de salud a las personas que habitan en sus alrededores (Yadab et al. 2019).

Desde el año 2019 el Gobierno de México pone en marcha el Programa Cero Residuos (Visión Nacional hacia una Gestión Sustentable) el cual establece que los Sitios de Disposición Final potencialmente contaminantes deben de ser saneados a fin de que operen de acuerdo a la normatividad vigente y aquellos potencialmente contaminados no puedan seguir en operación, tendrá que ser cerrado con un plan de saneamiento y remediación utilizando tecnología ambientalmente efectiva (SEMARNAT, 2019).

Si bien la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, establece las especificaciones de protección ambiental para la clausura de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial, (DOF, 2003) esta no establece los mecanismos de rehabilitación y solo propone que el proyecto debe

de contener al menos, taludes estables, drenajes superficiales y la infraestructura para el control de lixiviados y biogás, para lo cual debe incluir material de cobertura final que aisle los residuos, controle la infiltración de líquidos para minimizar la erosión y brindar un drenaje adecuado.

Los beneficios de la clausura de los Sitio de Disposición Final No Controlado para los municipios son varios entre los que se encuentran la recuperación de terrenos para usos específicos y una mejor calidad de vida para sus habitantes (Rodic-Wiesma, 2012), sin embargo, estos deben de enfrentar los costos que como la mayoría de los proyectos ambientales incorpora una gran cantidad de componentes económicos (Gala, 2019).

6. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.

¿Cuál es el estado y grado de impacto ambiental de los Sitios de disposición final no controlados abandonados en la Región Sotavento del estado de Veracruz, México?

¿Cuáles son los mecanismos de clausura adecuados para los Sitios de Disposición Final abandonados de la Región Sotavento del Estado de Veracruz?

7. HIPOTESIS.

Con el diagnóstico del estado y determinación del grado de impacto de los Sitios de disposición final no controlados abandonados de la Región Sotavento del Estado de Veracruz es posible establecer los mecanismos de clausura adecuados de acuerdo a la normatividad existente.

8. OBJETIVOS.

Objetivo General.

Determinar el estado, grado de impacto y mecanismos de clausura de los Sitios de disposición final no controlados abandonados de la Región Sotavento del Estado de Veracruz, México.

Objetivos Específicos

Realizar el diagnóstico ambiental para establecer el estado y el impacto de los Sitios de disposición final no controlados Abandonados de la Región Sotavento del Estado de Veracruz.

Determinar el grado de impacto para el ambiente de los Sitios de disposición final no controlados Abandonados en la región Sotavento del Estado de Veracruz.

Establecer los Mecanismos técnico-ambientales adecuados de clausura de conformidad con la normatividad nacional aplicable a los Sitios de disposición final no controlados Abandonados de la Región Sotavento del Estado de Veracruz

9. MATERIAL Y MÉTODOS.

9.1 Área de Estudio.

La región Sotavento en el Estado de Veracruz está conformada por 12 municipios (La Antigua, Boca del Río, Cotaxtla, Jamapa, Manlio Fabio Altamirano, Medellín, Paso de Ovejas, Puente Nacional, Soledad de Doblado, Tlaxiaco, Úrsulo Galván y Veracruz) con una extensión territorial conjunta de 3,961 km² (SEFIPLAN, 2011) y una población en el año 2020 de 1,085,751 habitantes (INEGI, 2021a), limita al norte con la Región Capital, al sur con la Región del Papaloapan, al este con el Golfo de México y al Oeste con la Región de las Altas Montañas (SEFIPLAN, 2011), (Figura 9.1), comprende una vasta llanura parcialmente interrumpida por algunos lomeríos de baja altitud por la que discurren los ríos Actopan, La Antigua, y el sistema Jamapa-Cotaxtla, los cuales desembocan en las aguas del Golfo de México donde casi 95% de la superficie regional se destina a las actividades agropecuarias (SEFIPLAN, 2013).

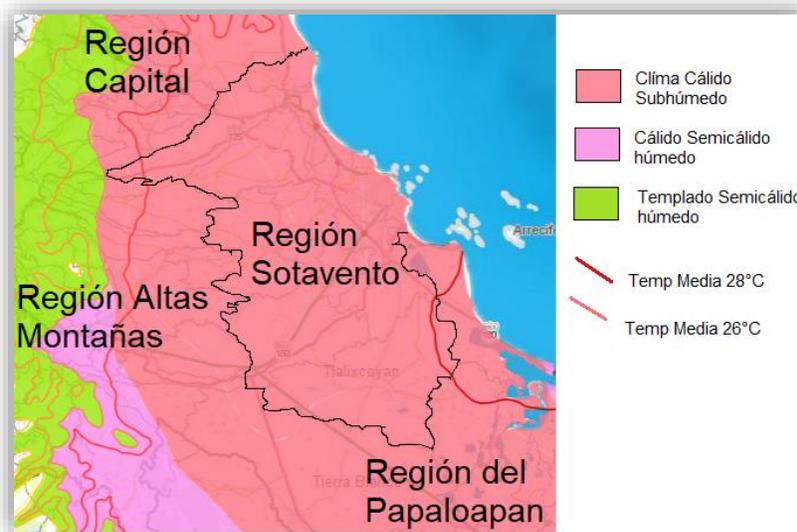
Figura 9.1 Región Sotavento



SEFIPLAN, 2013.

De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por E. García para los climas de México, el clima de la Región Sotavento del Estado de Veracruz es el $A(w_1)$, cálido y subhúmedo con lluvias abundantes y de manera intensa en verano, del orden de los 1500 mm donde se presenta una estación corta seca y su temperatura media anual oscila alrededor de los 26°C. con la abundancia suficiente para que los terrenos mantengan su humedad todo el año (INEGI, 2021b.).

Figura 9.2 Climas de la Región Sotavento.



INEGI 2021b.

Precipitación Promedio anual (mm.)

La precipitación anual promedio en metros y la evapotranspiración se obtuvo de los datos del Centro Hidrometeorológico Veracruz-Boca del Río, de la Comisión Nacional del Agua, para la estación climatológica 30192 y las estaciones climáticas 30101 Manlio Fabio Altamirano, 30048 El Copital en Medellín y 30193 José Cardel en el municipio de La Antigua expresados en la tabla 9.1 (CONAGUA, 2021).

Tabla 9.1 Precipitación y evapotranspiración promedio anual en estaciones climáticas de la Región Sotavento del Estado de Veracruz

Estación Climatológica	Precipitación Promedio anual (m)	Evapotranspiración Promedio anual (m)
30048 El Copital Medellín	1.583	0.161
30101 Manlio Fabio Altamirano	1.246	0.133
30192 Boca del Río	1.559	0.163
30193 José Cardel	1.322	0.147

Fuente: Realizada a partir de CONAGUA 2021

9.2 Metodología

En esta investigación se analizan los sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos de la región Sotavento del Estado de Veracruz, México, a través de conocer como son las prácticas de operación implementadas para la disposición final y como se involucran los aspectos ambientales y de salud (Ferronato y Torreta, 2019) la práctica de realizar reciclaje primario o coloquialmente llamado “pepena”, mecanismo de trabajo que se realiza dentro de estos sitios donde se recolectan materiales reciclables y son comercializados en los mercados locales (Sasaki, y Araki, 2014).

Acopio de información sobre los residuos sólidos en la Región Sotavento

Se utilizaron herramientas como la entrevista, las observaciones y la revisión de la literatura, las cuales son técnicas cualitativas semiestructuradas (Troncoso-Pantoja y Amaya-Placencia, 2016), se realizaron visitas técnicas a los Ayuntamientos de los Región (principalmente con las autoridades de limpia pública), con el objetivo

de recopilar información sobre la generación de los residuos sólidos urbanos, la localización de los sitios de disposición final en operación y abandonados.

Análisis de los sitios de disposición final abandonados

Para la localización de los sitios de disposición final en uso, para conocer su área de cobertura, se realizó por medio del uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), se analizaron imágenes satelitales de Google Earth®, técnica que se ha utilizado para selección de sitios y el manejo de residuos sólidos (Tamrat et al., 2019; Kapilan y Elangoyan, 2018). Se realizó un análisis comparativo entre la información proporcionada por los entrevistados y la disponible en Sistema de Consulta de Estadísticas Ambientales MapServer® del INEGI (INEGI, 2020).

Para caracterizar los Sitios de Disposición Final abandonados en la Región Sotavento del Estado de Veracruz, se utilizó la técnica de percepción remota (De Wet, 2016) mediante fotografías satelitales de formato libre de Earth® (Irfan et al 2019) a fin de identificar los cambios en las capas de vegetación y el grado de perturbación espacial de estos sitios con imágenes disponibles de los años 2005, 2010, 2015 y 2020.

Para el cálculo de las toneladas acumuladas de residuos se utilizó el valor promedio del peso volumétrico de 500 kg/m^3 para residuos sin compactar o mal compactados para el caso de los Sitio de Disposición Final no Controlado y $1,300 \text{ kg/m}^3$ para los residuos compactados para los rellenos sanitarios y lo rellenos de tierra controlados (Zekkos et al., 2006; Hanson et al., 2010). El volumen ocupado por los residuos en los sitios de disposición abandonados se determinó multiplicando el área determinada con las fotografías satelitales mediante el uso de Google Earth® y la altura promedio de los mismos (Susunaga-Miranda et al. 2022).

$$\text{Vol. de Residuos} = (\text{Área del SDF})(\text{Altura del SDF}) \quad \text{Ecuación. 9.1}$$

Donde:

SDF = Sitio de Disposición Final

Estimación de la generación de Lixiviados en los Sitio de Disposición Final No Controlado Abandonados

Para estimar la generación de Lixiviados en los Sitios de Disposición Final, se han desarrollado diversos modelos matemáticos, los cuales toman como base el balance hídrico de un volumen de control correspondiente al área de estos sitios, ahora el método que se utilizará es el denominado Método Suizo, el cual ha sido utilizado en investigaciones realizadas en Cuba (López-Vega et al. 2021), cuyas condiciones climáticas son similares a las presentadas en la Región Sotavento del Estado de Veracruz, México.

El Caudal de lixiviado o líquido percolado se determina por la ecuación (López-Vega et al. 2021; Gaudie Ley et al. 2021):

$$Q = \frac{(P)(A)(K)}{t} \quad \text{Ecuación 9.2}$$

Donde:

Q = Caudal medio de lixiviado percolado (m^3/s)

P = Precipitación media anual (m)

A = Área Superficial del Sitio de Disposición Final (m^2)

t = es el número de segundos en un año (31.536.000 s)

K = Coeficiente de compactación de los Sitios de Disposición Final

K es el coeficiente dependiente del grado de compactación de los residuos, en el que se estima una producción de lixiviados equivalente al porcentaje de media anual precipitación que contribuye al área del sitio de disposición final (Gaudie Ley et al. 2021).

El Coeficiente de compactación de los sitios de disposición final se puede estimar de acuerdo a la tabla 9.2.

Tabla 9.2 Coeficiente de compactación de sitios de disposición final

Sitio de Disposición Final	Peso Específico (t/m ³)	Coeficiente K
Débilmente Compactados	0.4 a 0.7	0.25 a 0.50
Fuertemente Compactados	> 0.7	0.15 a 0.25

López-Vega et al. 2021; Gaudie Ley et al. 2021

Cálculo del volumen de Biogás generado en los Sitio de Disposición Final No Controlado Abandonados.

Para la estimación de la generación de biogás en los sitios de disposición final abandonados de la Región Sotavento del Estado de Veracruz, se utilizó el Modelo Mexicano de Biogás 2.0 mediante una hoja de cálculo en Excel, el cual utiliza la ecuación de degradación de primer orden (Aguilar-Virgen et al. 2014).

$$Q_{LFG} = \sum_{t=1}^n \sum_{j=0.1}^1 2kLo \left[\frac{M_i}{10} \right] (e^{-ktij})(MCF)(F) \quad \text{Ecuación 9.3}$$

Donde:

Q_{LFG} = Es el flujo de biogás máximo esperado en m³/año.

i = Es el incremento en tiempo de 1 año.

n = Es el año del cálculo (año inicial de disposición de RSU).

j = Es el incremento de tiempo en 0.1 años.

k = Es el índice de generación de metano (1/año).

Lo = Es la generación potencial de metano en m^3/Ton .

Mi = Es la masa de residuos dispuestos en el año i (Ton).

t_{ij} = Es la edad j de la masa de residuos Mi dispuestas en el año i (años decimales).

MCF = Es el factor de corrección de metano.

F = Es el factor de ajuste por incendios.

La ecuación del Modelo Mexicano de Biogás estima la generación de biogás considerando la cantidad de residuos acumulados en un año, donde la composición del gas asumida por el modelo es del 50% Metano y 50% Dióxido de Carbono y otros compuestos, el exponencial asume que después de seis meses de la disposición de los residuos se inicia el proceso de obtención del biogás y que seis meses después disminuye a medida que se consume la fracción orgánica de los desechos, además de que la generación máxima se da en el año de abandono o cierre del sitio de disposición final (Escamilla, 2019).

a) Índice de Generación de metano (k)

Los valores para el índice de generación de metano (k) para el modelo Mexicano de Biogás versión 2.0 dependen del tiempo que tardan los residuos en degradarse, los cuales pueden ser: DDR Degradación de residuos muy rápida. DRMR, degradación de residuos moderadamente rápida, DRML, degradación de residuos moderadamente lenta y DRL degradación de residuos muy lenta (Aguilar-Virgen et al. 2012), para determinar los valores de k para la Región Sotavento se modificaron los valores establecidos en el modelo mexicano con el porcentaje de los residuos que se obtuvieron tanto de datos obtenidos en campo y de resultados

proporcionados por la Procuraduría de Medio ambiente del Estado de Veracruz, mediante la ecuación siguiente:

$$k_{ponderada} = \sum_{i=1}^9 (\%ri)(vp) \quad \text{Ecuación 9.4}$$

Donde:

%ri = porcentaje de residuos en cada categoría

vp = valor de k predeterminado por el Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0 en cada una de las categorías de degradación.

b) Potencial de generación de metano (L_0).

El parámetro define la cantidad potencialmente producida de metano (CH_4) por unidad de masa de residuos cuando se degrada, lo cual depende exclusivamente de ellos. (Aguilar-Virgen et al. 2014).

$$L_0 = \frac{16}{12} (MCF \times DOC \times DOCF \times F) \quad \text{Ecuación 9.5}$$

Donde:

MCF = Factor de corrección para el metano.

DOC = Fracción de carbono orgánico degradable.

DOCF = Fracción de carbono orgánico degradable asimilado (Teóricamente 0.77).

F = Fracción de metano en el Biogás (Se asume 0.5).

16/12 = Constante Estequiométrica.

El contenido de Carbono Orgánico Degradable (DOC) se puede calcular por la ecuación 4, este depende de la composición de los residuos y varía con el sitio de disposición final, el cual se obtiene por la ecuación siguiente (Aguilar-Virgen et al. 2014; Salmerón-Gallardo et al. 2017).

$$DOC = 0.4A + 0.17B + 0.15C + 0.3D \quad \text{Ecuación 9.6}$$

Donde:

A = Porcentaje de papel, cartón y los textiles.

B = Porcentaje de desechos de jardinería, de parques y jardines públicos.

C = Porcentaje de los restos alimenticios.

D = Porcentaje de madera y paja.

c) Factor de Corrección para el metano (MFC)

Este ajuste de la estimación de la generación de Metano para el modelo considera la degradación anaeróbica de los residuos y depende de la profundidad de los mismos en el sitio de disposición final y de sus prácticas de manejo (Aguilar-Virgen et al. 2014; Salmerón-Gallardo et al. 2017) que se pueden tabular de la siguiente manera (Tabla 9.3).

Tabla 9.3. Factor de Corrección del Metano.

Manejo del Sitio de Disposición Final	Profundidad < 5 m	Profundidad ≥ 5 m
Sin manejo	0.4	0.8
Con Manejo	0.8	1.0
Semi aeróbico	0.4	0.5
Desconocido	0.4	0.8

Aguilar-Virgen et al. 2014; Salmerón-Gallardo et al. 2017.

d) Factor de Ajustes de Incendios (F)

Este valor considera que cuando se producen incendios en los sitios de disposición final los residuos se consumen como combustible produciendo cenizas las cuales no contribuyen a la generación de biogás, en caso de que se presente este fenómeno se debe descontar de la generación de biogás el porcentaje del área impactada multiplicando por el ajuste dada la severidad del impacto del incendio (1/3 para impacto bajo, 2/3 para impacto medio, y 1 para impacto severo).

Impacto Ambiental de los Sitio de Disposición Final No Controlados Abandonados.

Existen diversas metodologías para llevar a cabo la Evaluación del Impacto Ambiental, una de las más usadas es la técnica matricial de Conesa Fernández Vítora que determina numéricamente la importancia de los impactos ambientales, caracterizándolos por medio de 11 atributos (Chacón y Pinilla, 2018) y conformado con esto la importancia del Impacto (I) por una serie de criterios cuantitativos mediante una matriz de valoración los cuales se describen a continuación (Conesa et al., 2010):

Signo (+) (-)

El signo que se le asigna está determinado por el carácter de la importancia del Impacto, y sea benéfico (+) o adverso (-) a los factores ambientales

Intensidad (I)

Es el grado de incidencia del factor sobre el ambiente en un ámbito específico, sus valores van desde 1 hasta 12 en el que el 12 está determinado por un impacto total sobre el área en que se produce un efecto y 1 cuando es una afectación mínima.

Extensión (EX)

Se trata del área de influencia del impacto con relación al entorno, por lo que si el efecto es muy localizado se considera puntual (1) y (8) en áreas muy extensas o zonas generalizadas donde el impacto sería total, considerando situaciones como impacto parcial (2) o extenso (4), sin embargo, si el efecto es crítico se le atribuirá un valor de cuatro unidades por encima del que se propone, a fin de que se generen medidas de mitigación o corrección.

Momento (MO)

Es el plazo en el que se lleva a cabo la acción de acuerdo con el tiempo que transcurre, si es inmediato y menor a un año, se le asigna un valor ponderable (4), si es a mediano plazo, en un periodo es de 1 a 5 años se asigna un valor de (2), si es a largo plazo y tarda el efecto en manifestarse más de cinco años tendrá un valor de (1).

Persistencia (PE)

Es el tiempo en el que el efecto permanece desde que aparece hasta que el factor afectado regresa a las condiciones que tenía antes del impacto ya sea por recuperación de la naturaleza o por medio de la acción del ser humano, la cual si

es fugaz se le asigna un valor de (1), si la duración es entre 1 y 10 años se considera temporal (2) y si es o superior a 10 años es de larga duración y se considera permanente con un valor de (4).

Reversibilidad (RV)

Es la capacidad de que se restituya al factor afectado o que retome sus condiciones iniciales de manera natural una vez que el impacto cese, si este es menor a un año se le asigna un valor de (1), de 1 a 10 años se considera a mediano plazo con un valor de (2) y cuando el efecto es irreversible o con una duración mayor a 10 años se le asigna un valor de (4).

Recuperabilidad (MC)

Es la posibilidad de que se pueda reconstruir total o parcialmente el factor afectado mediante la intervención de los seres humanos mediante la introducción de medidas correctivas, si se puede recuperar totalmente se le asigna un valor de (1) o (2), si es a corto o mediano plazo, cuando es parcialmente mitigables o a mediano plazo toma un valor de (4) y si es irrecuperable se le asigna un valor de (8)

Sinergia (SI)

Este atributo se debe cuando dos o más efectos simples actúan de manera simultánea y provoca una manifestación superior a la que se podría esperar cuando las acciones que los generan actúan independientemente o no simultánea. Cuando una acción no es sinérgica y no actúa sobre el mismo factor tendrá un valor de (1), en el caso de un sinergismo moderado valor de (2) y para una actuación altamente sinérgica valor (4).

Acumulación (AC)

Este carácter se refiere a la manifestación progresiva del impacto, cuando es persistente o de forma continua o reiterada, si no produce efectos acumulativos se le asigna un valor de (1) y si el efecto es acumulativo es de (4).

Efecto (EF)

Se refiere a la forma en que se manifiesta un efecto sobre un factor ambiental como consecuencia de una acción, el cual puede ser directo o primario en cuyo caso se asigna un valor de (1) o indirecto o secundario al cual se le da un valor de (4)

Periodicidad (PR)

Es la regularidad con la que se manifiesta un efecto y que puede ser de manera cíclica o recurrente constante (continuo) al cual se le asigna un valor de (4) periódico con un valor de (2) o impredecible o discontinuo (1).

Importancia del Impacto (I)

Finalmente, la Importancia del Impacto (I) se determina con la ecuación

$$I = \pm(3IN + 3EX + MO + PE + RV + SI + AC + EF + PR + MC) \quad \text{Ec. 9.7}$$

La ponderación final obtenida por medio de la ecuación establece la importancia de los diversos efectos sobre el sitio y la acción de los factores ambientales (Soto et al., 2018), con lo que esta importancia se representa por un valor que se deduce en función del valor asignado a cada uno de los criterios considerados, el cual se encuentra entre 13 y 100 (Tabla 9.4)

Tabla 9.4 Valoración e Importancia del Impacto.

Importancia del Impacto	Intervalo Numérico
Irrelevante	<25
Moderado	25 a 50
Severo	50 a 75
Crítico	>75

Fuente: Propia a partir de Conesa et al. 2010.

Los factores de impacto de los tiraderos a cielo abierto que se consideraron para este análisis de los sitios de disposición final abandonados son: la contaminación del agua subterránea y superficial por lixiviados, generación de biogases, incendios y explosiones, malos olores, inestabilidad y asentamiento de los terrenos, contaminación del suelo, pérdida de la vegetación y presencia de fauna nociva (Yadav et al, 2020) y adicionalmente presencia de pepenadores, asentamientos humanos, extensión y volumen.

Para determinar el índice de impacto de los Sitios de Disposición Final Abandonados se diseñó una matriz que considera los 12 factores ambientales más importantes (Figura 9.3), para lo cual una vez establecido cada factor se utiliza la ecuación 9.7 para determinar la importancia del impacto, y se categoriza este en función de la importancia como se establece en la tabla 9.4.

Figura 9.3 Matriz de Impactos Ambientales.

Factor Ambiental	S	I	EX	MO	PE	RV	MC	SI	AC	EF	PR	I	Categoría
Área del Sitio de Disposición Final	-											0	
Volumen de los Residuos Acumulados	-											0	
Cantidad de Residuos Acumulados	-											0	
Generación de Lixiviados	-											0	
Generación de Biogás	-											0	
Flora y Fauna	+											0	
Incendios y Explosiones	-											0	
Malos Olores	-											0	
Inestabilidad del Terreno	-											0	
Presencia de Asentamientos Humanos	-											0	
Presencia de Residuos Sólidos	-											0	
Presencia de Pepenadores	-											0	
IMPACTO ACUMULADO												0	

Además, se establece un código de colores para cada una de las categorías de los impactos: azul para irrelevante, amarillo para moderado, rojo para severo para severo y morado para crítico (Figura 9.4).

Figura 9.4 Categorización por colores según la importancia del Impacto.

Irrelevante	Blue
Modrado	Yellow
Severo	Red
Crítico	Purple

Método de Clausura de los Sitios de Disposición Final no Controlados Abandonados.

Para la selección de los métodos de clausura de los Sitios de Disposición Final no Controlados se tomará en cuenta lo que se establece en la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF, 2003) y en aquellos casos no contemplados en la normatividad nacional se dará una alternativa de acuerdo con los manuales técnicos de la Organización Panamericana de la Salud (CONAM/CEPIS/OPS, 2004), del Manual para la rehabilitación y clausura de tiraderos a cielo abierto (SEDESOL, 2000), del Cuaderno técnico de rehabilitación de áreas degradadas por residuos sólidos urbanos del Gobierno del Estado de Minas Gerais, Brasil (FEAM., 2010), entre otros.

a) Etapa de Pre clausura o Cierre.

La siguiente metodología se ocupará para la etapa de Preclausura o Cierre:

Colocación de Señalamientos Restrictivos.

Los señalamientos preventivos deben de localizarse en la entrada, por la caseta de vigilancia y en las vallas perimetrales que rodearán el emplazamiento, las cuales como mínimo debe de contar con la siguiente información (SEDESOL, 2005).

- Nombre del Proyecto.
- Objetivo del Proyecto.
- Plazo de Ejecución.
- Nombre de la Compañía Constructora.
- Número del Resolutivo en Materia de Impacto Ambiental o Autorizaciones Ambientales.

Construcción de infraestructura para la restricción del acceso al sitio de disposición final.

La infraestructura que se debe de construir para la restricción del acceso al sitio de disposición final consta de una caseta de vigilancia, puerta y control de acceso, cerca perimetral (DOF, 2021).

Para la caseta de vigilancia se propone que sea prefabricada con las siguientes características a fin de que soporte las características climáticas presentes en la Región Sotavento del Estado de Veracruz.

- Estructura de acero comercial de cuatro pulgadas.
- Piso de lámina antiderrapante con acabado anticorrosivo.
- Techo y muros de lámina galvanizada acanalada.
- Pintura de esmalte anticorrosiva en paredes y puertas.

- Ventanas de aluminio natural y vidrio de 4mm. de espesor.
- Puerta de lámina galvanizada con marco prefabricado.
- Instalación Eléctrica con lámparas y contactos.
- Baño con inodoro y lavamanos.
- Tanque de agua de 5,000 litros.
- Fosa séptica prefabricada.

Para el cercado perimetral se realizarán excavaciones de 60 cm por 60 centímetros de ancho por 50 cm de profundidad donde se colocarán postes prefabricados de concreto 150 kg/cm² con castillo interior tipo armex, los cuales tienen espacio para la instalación de alambre de púas de calibre 12, mismo que se colocará en cinco filas y será tenzado al momento de la colocación.

Control de Fauna Nociva

Se deben de colocar cebos rodenticidas mono dosis para la cantidad de roedores observados, en estaciones de cebado fijas e identificadas con letreros (Arán, 2015) con pictogramas de conformidad con la NOM-018-STPS-2015 (DOF, 2015).

Recolección de Residuos en los predios vecinos

Al inicio el proceso de clausura de los sitios de disposición final no controlados abandonados se debe de recolectar los residuos que han desbordado la extensión del predio por medio de trascabos de carga frontal y acomodarlo al centro del acumulamiento del Basurero (SEDESOL, 2005).

Conformación, compactación y sellado de los residuos sólidos.

El saneamiento con esta técnica consiste en mover, compactar y sellar los residuos sólidos a nivel superficial y dadas las características de los sitios de disposición final abandonados se propone que la conformación del mismo sea por el método de área, el cual permitirá que la clausura sea económica, y que el material de cubierta se transporte de lugares cercanos a éste y se con lo anterior se presente un mínimo movimiento de residuos sólidos, siempre y cuando las condiciones de estabilidad mecánica de la basura lo permitan. (CONAM/CEPIS/OPS, 2004).

La conformación de la pila de residuos se realizará mediante un trascabo frontal que empujará los desechos a fin de originar un acumulamiento central de la basura, la cual dependerá de las medidas del sitio de disposición final. La compactación de los residuos sólidos se llevará a cabo al mismo tiempo que se realice la conformación de la pila central, esta actividad se realiza con el equipo mecánico subiendo y bajando sobre el talud (CONAM/CEPIS/OPS, 2004; SEDESOL, 2005).

El material de cubierta para el sellado de los residuos debe de acarreararse de un banco de materiales cercano al sitio y además deberá cumplir ciertos requisitos para las funciones citadas, de los cuales, los más importantes es que sea compactable, tenga una composición de entre 0 a 10 % de finos y de 90 a 100 % de gravas o arenas, con un coeficiente de permeabilidad de 1×10^{-5} a 1×10^{-7} cm/s y una porosidad de 25 a 50 % (SEDESOL, 2005).

b) Etapa de Clausura

La metodología propuesta para la etapa de clausura de los sitios de disposición final abandonados es la siguiente:

Conformación y Estabilización de Taludes

Los taludes se conformarán en una relación no menor a 3:1 durante la conformación de la pila de residuos a fin de evitar riesgos, lo anterior mediante un bulldozer para un mejor acomodo de los desechos (SEDESOL, 2005; DOF, 2021).

Construcción del Drenaje Superficial (Sistemas de control de escurrimientos)

El sistema de drenaje superficial está basado en la captación, conducción y desalojo del agua pluvial, para lo cual se recomienda construir una zanja para drenaje con un ancho de por lo menos 0.5 m de profundidad y 0.5 metros de ancho, cubiertos con una capa de geomembrana impermeable y llenarles con grava o piedra bola. Los canales se cubren con geotextil a fin de evitar que se introduzcan partículas sólidas arrastradas por la lluvia de la cubierta del sitio de disposición final no controlado abandonado.

Para el control del exceso de agua pluvial, se construirá en la parte más baja del terreno una zanja perimetral de 0.5 metros de ancho y 0.5 metros de profundidad, relleno con grava para que sirva de vaso regulador y que permita la infiltración de parte de la misma al subsuelo y el resto discurra de manera natural.

Construcción de la infraestructura para el control de Lixiviados y Biogás

El drenaje de Lixiviados consiste en una trinchera de 50 x 50 centímetros donde se colocará una capa de 10 cm de grava y un sistema de tuberías de PVC hidráulico de 8 pulgadas de diámetro ranurado al tres bolillo y recubierto por grava a fin de permitir el paso de solo los líquidos.

Para el control de biogás se debe de instalar un número mínimo de pozos de venteo en un sitio de disposición final no controlado abandonado de 4 por hectárea, los cuales deben ser colocados con una sección transversal mínima de 0.01 m², empacados con piedra y con armazón de malla con un mínimo de 0.25 m² por sección, con un ranurada de la estructura del 10% con respecto a la parte exterior de la misma (DOF, 2021) y dadas sus características en la región sotavento sin quemadores.

Construcción del sistema para monitoreo ambiental

Para el monitoreo de las aguas subterráneas se propone la construcción de un pozo que tendrá de una profundidad de veinte metros, toda vez que el nivel estático en la zona de los sitios de disposición final no controlados abandonados de la región Sotavento es de 40 metros, este será perforado para la colocación de un tubo de PVC de 2 pulgadas de diámetro ranurado en su parte final a los 19 metros al tres bolillo, y se colocará una capa interior de grava lavada para que evite la entrada de material particulado, en la parte superior de la tubería (que deberá de ser roscada) se colocará una protección de acero rolado con tapa (COCEF-BECC, 2016).

Los pozos de monitoreo de biogás se construirán dos pozos de tres metros de profundidad relleno de grava en donde se colocarán tres tubos de PVC de 2 pulgadas de diámetro con profundidades de 1, 2 y 3 metros, con rosca al final y una tapa con un par de perforaciones que permita el paso de sólo el gas que se genere, estos deberán de tener una protección de acero rolado con tapa para permitir la toma de muestras de gas (COCEF-BECC, 2016), el cual debe incluir como material para el monitoreo de gases: flujómetro, manómetro, termómetro, analizador de gases y termómetro de combustión (DOF, 2021).

El sistema de monitoreo de Lixiviados constará de tres tubos de PVC ranurado al tres bolillo, con una profundidad de uno, dos y tres metros, con una capa de grava lavada de 20 centímetros en la parte terminal y rodeados con una capa de bentonita que rodee estos tubos, los cuales estarán protegidos por una tapa de acero rolada y con material de relleno en la superficie.

Las mediciones de los asentamientos diferenciales, su comportamiento y evolución se realizará mediante la construcción de mojoneras con cemento a cada 100 m., asignándole un número de identificación con georreferenciación (COCEF-BECC, 2016)

Colocación de Cobertura Final.

La cubierta impermeable que se coloca por medio de geomembranas de polietileno de alta densidad; deberá cumplir las siguientes especificaciones mínimas (DOF, 2021)

Espesor promedio	1 mm.
Esfuerzo a la tensión de al menos	15 kN/m.
Límite de fuerza de ruptura, mayor a	27 KN/m.
Densidad mayor o igual a	0.94 g/cm ³ .

Colocación de suelo orgánico y capa vegetal.

Para la selección de plantas apropiadas para la cubierta vegetal para la remediación y rehabilitación de sitios de disposición final es el uso de especies endémicas, ya que por lo general la superficie de estos ofrece una gran diversidad de nichos ecológicos para las especies, ya que las diferentes coberturas pueden

crear nicho hábitats que permiten ventajas competitivas contra de especies no nativas (Nagerdran et al., 2006).

c) Etapa de Post Clausura

De acuerdo con lo que se establece en la NOM-083-SEMARNAT-2003, la etapa de post-clausura contempla una serie de programas que se deben de desarrollar a lo largo de 20 años posteriores a la clausura de los sitios de disposición final (DOF, 2021), entre los que se encuentran:

Mantenimiento de la cubierta y de instalaciones de control.

El programa de mantenimiento del sitio de disposición clausurado debe de incluir los sistemas de control biogás y lixiviados, y la cobertura final de clausura, la reparación de grietas y hundimientos provocados por la degradación de los residuos, así como los daños ocasionados por erosión (escurrimientos pluviales y viento). El programa de mantenimiento deberá contar con registros mensuales de su aplicación y control y monitoreo de biogás (DOF, 2021).

Programa de Monitoreo ambiental.

A fin de prevenir los riesgos para el ambiente por la emisión de contaminantes (biogás y lixiviados) se tiene que elaborar y aplicar un programa de monitoreo, con una vigencia de 20 años con registro de aplicación, la cual puede reducirse si se demuestra mediante un dictamen de validación de un experto que ya no existe riesgo ambiental (DOF, 2021).

Uso Final del Sitio

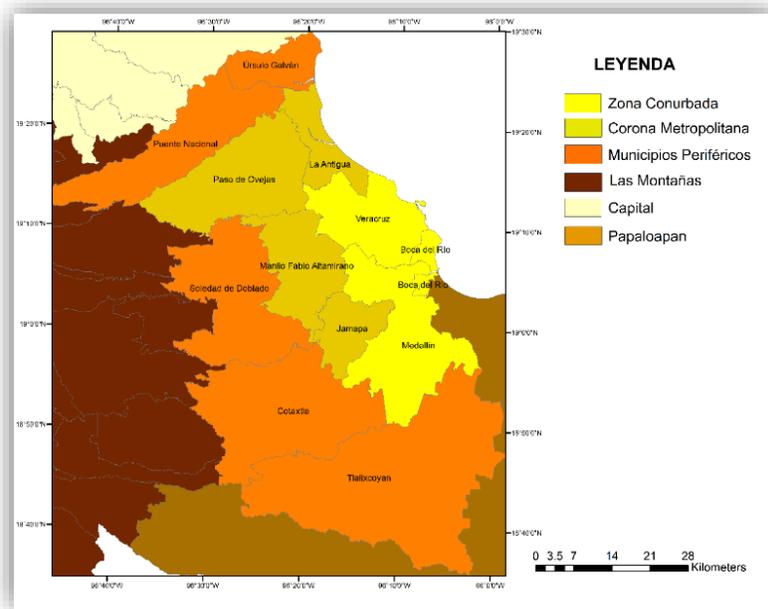
El uso final que se le puede dar a los sitios de disposición final clausurados abandonados dependerá de acuerdo al Programa Veracruzano de Ordenamiento Territorial, de los programas municipales de ordenamiento tanto urbanos como municipales.

10. RESULTADOS.

10.1 Generación de Residuos Sólidos Urbanos en la Región Sotavento.

Los municipios de Veracruz, Boca del Río y Medellín forman en su conjunto (Figura 10.1) la zona metropolitana más poblada del estado de Veracruz (SEDATU, 2015) la cual, por el crecimiento de la población, la rápida urbanización, progreso económico y el incremento en el nivel de vida ha aumentado la generación de desechos (Abdel-Shafy y Mansour, 2018).

Figura 10.1 Zona metropolitana de la Ciudad de Veracruz.



Los municipios de La Antigua, Manlio Fabio Altamirano, Paso de Ovejas y Jamapa, se pueden catalogar como parte de la corona metropolitana de la Ciudad de

Veracruz, ya que gran parte de sus habitantes viajan por diversos motivos (Escolares, Médicos, Comerciales) a la zona Conurbada, por lo que en muchas ocasiones son municipios dormitorio, donde las personas viven en ellos, pero trabaja o estudian en la Ciudad de Veracruz, están conformados por una gran cantidad de comunidades rurales, con escasos recursos financieros para la gestión adecuada de los RSU (Pokhrel y Viraraghavan, 2005) y los municipios de Cotaxtla, Tlaxiucoyan, Soledad de Doblado, Puente Nacional y Úrsulo Galván, que se encuentran lo suficientemente alejados de la zona conurbada de la Ciudad de Veracruz como para catalogarse como municipios periféricos, con un mayor número de comunidades rurales, los cuales en su conjunto para 2019 generaron un total de 1,262.5 Toneladas de R.S.U (Tabla 10.1).

Tabla 10.1 Toneladas de residuos sólidos urbanos (R.S.U) en sitios de disposición final de la en la Región Sotavento.

Municipio	Años		
	2019	2015	2011
Boca del Río	200.00	141.00	135.06
Cotaxtla	10.00	11.00	12.05
Jamapa	8.50	8.21	7.94
La Antigua	35.00	32.60	21.09
Manlio Fabio Altamirano	17.00	16.40	15.89
Medellín de Bravo	100.00	70.13	47.94
Paso de Ovejas	20.00	21.09	24.93
Puente Nacional	12.00	13.69	15.06
Soledad de Doblado	20.00	19.17	18.08
Tlaxiucoyan	20.00	16.43	15.61
Úrsulo Galván	20.00	20.00	20.00
Veracruz	800.00	700.00	600.00

Susunaga-Miranda et al, 2022.

Los resultados de la generación de residuos sólidos se obtuvieron para el año 2019 de entrevista personal a las autoridades municipales en la semana comprendida entre el 6 al 10 de enero del 2020 y los datos para los años 2015 y 2011 de la Secretaría de Finanzas y Planeación del Gobierno del Estado de Veracruz y se muestran en la Tabla 10.1 (SEFIPLAN-a, 2019; SEFIPLAN-b, 2019).

A partir de los resultados de la tabla 10.1 se puede determinar el incremento porcentual en la disposición de los R.S.U para la Región Sotavento del Estado de Veracruz para el periodo 2015 a 2019 en rangos que van desde más del 50% hasta valores negativos o de decrecimiento (Tabla 10.2).

Tabla 10.2 Incremento porcentual de la disposición de R.S.U en sitios de disposición final en la Región Sotavento.

Incremento porcentual en la Disposición (2015-2019) %	Municipios
20 – 50	Boca del Río, Medellín de Bravo, Tlaxiucoyan, Veracruz
0-20	Jamapa, La Antigua, Soledad de Doblado, Manlio Fabio Altamirano, Úrsulo Galván
> 0	Cotaxtla, Puente Nacional, Paso de Ovejas

10.2 Identificación y localización de los Sitios de Disposición Final abandonados.

Se identificaron y localizaron nueve sitios de disposición final abandonados en la Región Sotavento en los municipios de La Antigua, Boca del Río, Manlio Fabio Altamirano, Medellín de Bravo, Puente Nacional. Tlaxiucoyan y Veracruz, los cuales se enlistan en la tabla 10.3 con sus coordenadas UTM WGS 84 grado 14.

Tabla 10.3 Localización y Estado de los Sitios de Disposición Final en la Región Sotavento en coordenadas UTM WGS 84 grado 14.

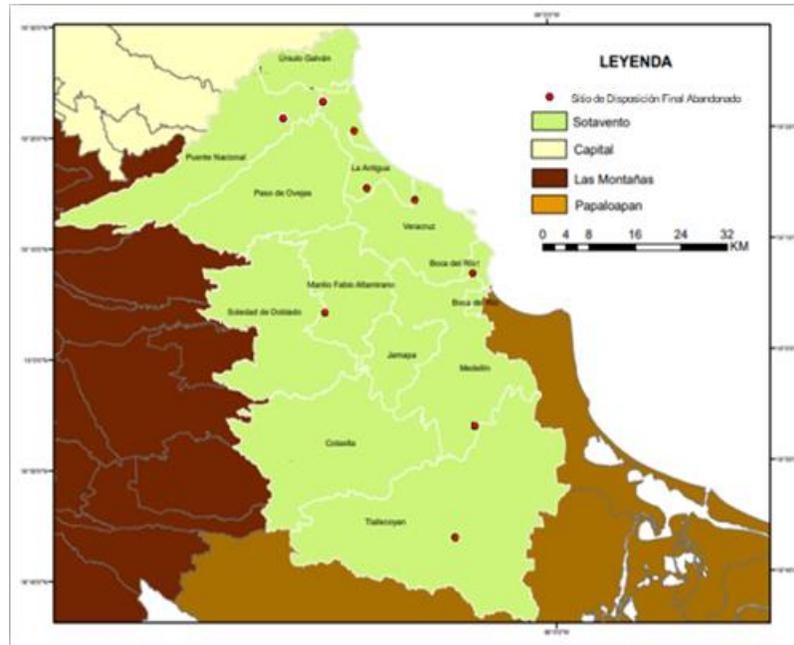
Sitio	Municipio	X	Y	Localidad	Estado
1	Boca del Río	802,026.87	2,116,672.07	9 de Marzo	A
2	La Antigua	783,645.00	2,130,844.00	Loma Iguana	S
3	La Antigua	781,466.00	2,140,378.00	Playa Oriente	A
4	Manlio Fabio A.	776,403.00	2,110,095.00	Plataforma	A
5	Medellín de Bravo	802,400.00	2,091,227.00	El Guayabo	A
6	Puente Nacional	772,993.28	2,146,182.41	José Cardel	A
7	Puente Nacional	767,868.59	2,141,017.23	Chichicastle	A
8	Tlalixcoyan	798,952.63	2,072,709.19	Mata Verde	A
9	Veracruz	791,981.00	2,128,885.00	Hda Santa Fé	C

A Sitio Abandonado, C Sitio Clausurado, S Sitio sin Operar

Por diversos motivos los Sitios de Disposición Final de los municipios de La Antigua, Boca del Río, Manlio Fabio Altamirano, Medellín de Bravo, Puente Nacional y Tlalixcoyan fueron abandonados, sin que se llevara a cabo ningún procedimiento de clausura, en el caso de la Ciudad de Veracruz este fue clausurado operativamente y administrativamente en el año 2019 por la Procuraduría Estatal de Protección al Medioambiente del Gobierno del Estado de Veracruz (Madrigal, 2019) y el que se construyó en 2008 en la comunidad de Loma Iguana en el municipio de La Antigua y que hasta diciembre del 2021 se encuentra sin ser utilizado y no ha iniciado su operación (Aguirre, 2016).

Como particularidad del Sitio de Disposición Final del municipio de La Antigua en José Cardel, geográficamente se encuentra en el municipio de Puente Nacional, sin embargo, el terreno es propiedad del Ayuntamiento de La Antigua (SEDESOL, 2011).

Figura 10.2 Sitios de Disposición Final Región Sotavento



Susunaga-Miranda et al., 2022.

10.3 Características de los Sitios de Disposición Final Abandonados

Si bien una de las principales características de los Sitios de Disposición Final de Residuos Sólidos en México tienen que ver con su operación y el grado de control sobre los residuos (Calva-Alejo y Rojas-Caldelas., 2014), la clasificación de los mismos está establecida en el proyecto de Modificación de la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 publicado en el año 2021 en la cual dependiendo de sus mecanismos de control de los contaminantes y de la infraestructura presente se clasifican en Relleno Sanitario, Sitios de Disposición Final Controlados y Sitios No Controlados (DOF, 2021) y los resultados se presentan en la Tabla 10.4.

Tabla 10.4 Clasificación de los Sitios de Disposición Final Abandonados en la Región Sotavento.

Sitio de Disposición Final	Relleno Sanitario	Sitio de Disposición Final Controlado	Sitio de Disposición Final No Controlados
Boca del Río		x	
Loma Iguana	x		
Playa Oriente			x
José Cardel		x	
Plataforma			x
El Guayabo		x	
Chichicaxtle			x
Mata Verde			x
Veracruz	x		

De conformidad con lo establecido en la NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF, 2004), los Sitios de Disposición Final Abandonados de la Región Sotavento del Estado de Veracruz que se pueden considerar como No Controlados son cuatro:

- Playa Oriente, Mpio La Antigua.
- La Plataforma, Mpio Manlio Fabio Altamirano.
- Chichicaxtle, Mpio de Puente Nacional.
- Mata Verde, Mpio de Tlalixcoyan.

Con las Imágenes satelitales de Google Earth®, de los años de 1990 al 2020 se pudo determinar la fecha de inicio y de abandono de los Sitios de Disposición Final Abandonados de la Región Sotavento del Estado de Veracruz (Tabla 10.5).

Tabla 10.5 Inicio de Operación y Abandono de los Sitios de Disposición Final Abandonados de la Región Sotavento del Estado de Veracruz.

Municipio	Localidad	Inicio de Operaciones	Abandono del Sitio
Boca del Río	Col. 9 de Marzo	1990	2008
La Antigua	Playa Oriente	2005	2010
La Antigua	Loma Iguana	N/A	N/A
Manlio Fabio Altamirano	La Plataforma	2017	2018
Medellín de Bravo	El Guayabo	2010	2015
Puente Nacional	Chichicaxtle	2010	2017
Puente Nacional	José Cardel	2010	2017
Tlaxiacoan	Mata Verde	2013	2018
Veracruz	Ex Hacienda Santa Fé	2000	2019

N/A No Aplica (Susunaga-Miranda et al., 2022).

a) Basurero Abandonado de Boca del Río.

El Basurero municipal de Boca del Río inicia sus operaciones en la parcela 79 del Ex Ejido Boca del Río en el año de 1990 y fue cerrado y abandonado en el año 2008 por encontrarse rodeado por la mancha urbana y el riesgo que representaba para el Área Natural Protegida Arroyo Moreno (López-Portillo *et al.*, 2009), una parte de la parcela fue vendida por el ejidatario en forma de lotes donde se asentó la colonia 9 de Marzo (SDS-MA, 2006); donde se han asentado alrededor de 150 casas habitación y comercios, otra parte fue adquirida por el Ayuntamiento de Boca del Río en donde se construyó una Estación de Policía, manteniendo una fracción aún libre (Figura 10.3), su máxima extensión fue de 55,600 m², se operó con el método de área o pastel, con una diferencia de altura entre la base y la parte más alta de 4 metros, para el año 2021 el área no ocupada fue de 10,425 m².

Figura 10.3 Ex Basurero Municipal de Boca del Río en años 2003 y 2020.



Google Earth®, 2022.

b) Basurero Abandonado de Playa Oriente, La Antigua.

El Basurero municipal de La Antigua se localizó en la comunidad de Playa Oriente, inició sus operaciones en el año 2005, sin embargo y debido a las inundaciones que provocadas por el desbordamiento del Río La Antigua por al huracán Karl en 2010 se tomó la decisión de abandonarlo (Lara, 2010). De acuerdo a las imágenes satelitales su máxima extensión (Figura 10.4) fue de 7,348 m², con una altura media de 2 metros, en diciembre del 2020 se construye una finca en la zona sur del basurero, el cual ha sido completamente cubierto por la vegetación de la zona.

Figura 10.4 Ex basurero de La Antigua en la comunidad de Playa Oriente en los años 2005 y 2020.



Google Earth®, 2022.

c) Basurero Abandonado de La Plataforma, Manlio Fabio Altamirano.

El basurero municipal de Manlio Fabio Altamirano se localizó en la congregación de La Plataforma en un terreno que fue rentado por el Ayuntamiento operó entre los años de 2017 y 2018 cuando se vence el contrato de arrendamiento (Pérez, 2020), su extensión máxima alcanzó los 14,515 m² con una altura media de residuos de 2 metros (Figura 10.5), ya para el año 2020 la totalidad de los residuos habían sido cubiertos por una capa vegetal y arbolado, además de que en el predio en cuestión ya se ha construido una vivienda.

Figura 10.5 Ex basurero de Manlio Fabio Altamirano en la comunidad de La Plataforma en los años 2018 y 2020.



Google Earth®, 2022.

d) Basurero Abandonado El Guayabo, Medellín de Bravo

El basurero abandonado de Medellín de Bravo se localiza en la congregación de El Guayabo, con la información recopilada de Google Earth® se determinó que inicia operaciones en el año 2010 y dejó de utilizarse en el año 2015 cuando se inicia la disposición de residuos sólidos en el Relleno Sanitario privado de El Guayabo construido en una parcela anexa al mismo, tiene una extensión de 68,038 m², una altura promedio de 2 metros, en donde los residuos se compactaban con maquinaria, sin embargo se consideraba como un Tiradero a Cielo Abierto, ya que no se cubrían los desechos de manera adecuada, en el año 2020 aún se podían observar zonas con residuos sólidos expuestos y en la zona sur una laguna de lixiviados, por donde dada las escorrentía discurren estos contaminantes (Figura 10.6).

Figura 10.6 Ex basurero de Medellín de Bravo en la comunidad de El Guayabo en los años 2014 y 2020.



Google Earth®, 2022.

e) Basurero Abandonado de Chichicaxtle, Puente Nacional

El basurero abandonado de Chichicaxtle en Puente Nacional operó desde el año 2010 hasta 2017 en una barranca a un costado de la Autopista Xalapa-Veracruz en terrenos de una parcela particular, alcanzando una extensión máxima al final de su periodo de operación de 20,570 m², para el año 2020 la totalidad del área se encontraba cubierta con una capa vegetal y ocasionalmente ha presentado incendios (Figura 10.7)

Figura 10.7 Ex basurero de Puente Nacional en la comunidad Chichicaxtle 2010 y 2020.

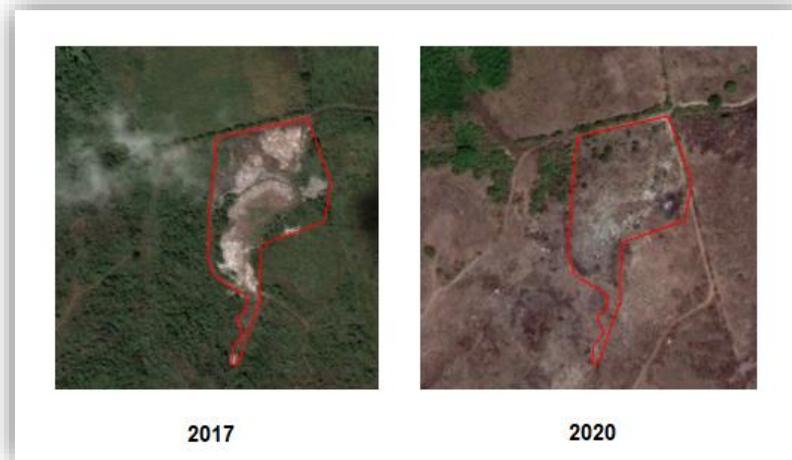


Google Earth®, 2022

f) Basurero Abandonado del Ayuntamiento de La Antigua, José Cardel, Puente Nacional.

El Basurero Abandonado de José Cardel se encuentra en un terreno propiedad del Ayuntamiento de La Antigua, pero en la jurisdicción territorial de Puente Nacional, este es el único Sitio de Disposición Final abandonado que pertenece a un Municipio, inicia sus operaciones tras el abandono del Basurero de Playa Oriente en 2010 y continúa operando hasta el año 2017, cuando termina su ciclo de vida y se traslada el depósito de los residuos a un nuevo sitio (Susunaga-Miranda et al., 2022) , su máxima extensión es de 20,570 m² en los cuales se utilizó cierta cantidad de maquinaria para el acomodo de los residuos (Figura 10.8).

Figura 10.8 Ex basurero del Ayuntamiento de la Antigua en el municipio de Puente Nacional 2017 y 2020.

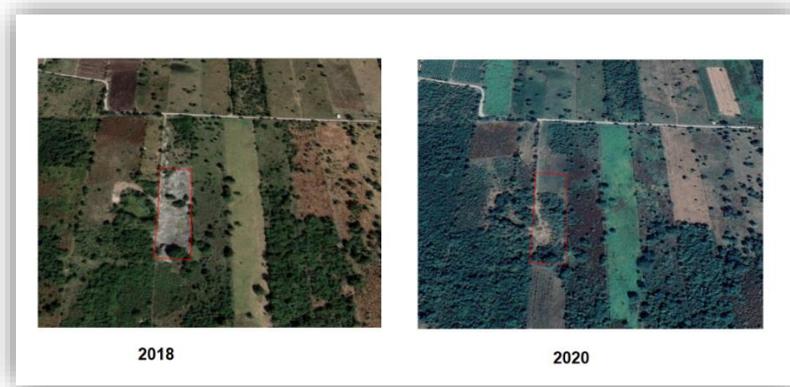


Google Earth®, 2022.

g) Basurero Abandonado Mata Verde, Tlalixcoyan.

El basurero abandonado de Mata Verde en Tlalixcoyan operó desde el año 2013 hasta 2018 año en que debido a las quejas contantes de los vecinos de la localidad inicia el Ayuntamiento el depósito de los Residuos en el Relleno Sanitario de El Guayabo (Barranco, 2017), se localiza en una parcela particular y cuenta con una extensión de 13,636 m², para el año 2020 la totalidad de los residuos sólidos se encuentran cubiertos por una capa vegetal que ha crecido sola, inclusive algunos árboles han sido plantados en este lugar (Figura 10.9).

Figura 10.9 Ex basurero del municipio de Tlaxicoyan en la comunidad de Mata Verde los años 2018 y 2020



Google Earth®, 2022.

f) Relleno Sanitario Clausurado del Municipio de Veracruz.

En el municipio de Veracruz, en un predio en comodato de la Ex Hacienda Santa Fé perteneciente a la Administración del Sistema Portuario Nacional Veracruz (ASIPONAVER) se construyó el Relleno Sanitario municipal, el cual se diseñó, construyó y operó de conformidad con la NOM-083-ECOL-1996 (DOF, 1996) e inicia sus operaciones en el año 2000, con un tiempo de vida útil calculado para 10 años, sin embargo, continuó en operación sin un control adecuado hasta cubrir con desechos toda la infraestructura existente (Laguna de Lixiviados, Pozos de Biogás, esc,) desbordando su área original y presentando incendios de manera constante, por lo que fue clausurado administrativamente por la Procuraduría Estatal de Protección al Medioambiente en Diciembre de 2019, cuenta con una extensión 167,228 m², una forma de pastel con una diferencia de altura máxima de 25 metros (Figura 10.10) y una altura promedio es de 12.5 m.

Figura 10.10 Relleno Sanitario Clausurado de la Ciudad de Veracruz, ex hacienda Santa Fé en los años 2002 y 2020.



Google Earth®, 2022

g) Relleno Sanitario Abandonado de Loma Iguana.

El Relleno Sanitario que se construyó en la comunidad de Loma Iguana en el municipio de La Antigua en el año 2010, estuvo diseñado de conformidad con la NOM-083-SEMARNAT-2003, fue abandonado sin operar ya que este no contaba con un acceso adecuado para los camiones recolectores, su área es de 27,240 m² y su infraestructura se encuentra en total abandono, con acumulación de agua de lluvia en la laguna de lixiviados y en la celda para los residuos sólidos (Figura 10.11).

Figura 10.11 Relleno Sanitario Abandonado de Loma Iguana La Antigua en los años 2011 y 2020.



Google Earth®, 2022

10.3 Factores de Impacto de los Sitios de Disposición Final

Los factores de impacto ambiental dieron como resultado los siguientes valores:

Área, Volumen y cantidad de residuos almacenados en los Sitio de Disposición Final Abandonados de la Región Sotavento.

Con la ecuación 9.1 se calculó el volumen de los RSU acumulados en los sitios de disposición final abandonados mediante la multiplicación del área de cada uno de ellos con la altura de determinada mediante el rastreo de capas de cobertura utilizando la herramienta Google Earth®, para determinar la cantidad másica de residuos se multiplicó el volumen por el peso volumétrico de 500 kg/m^3 para sitios sin compactación o mal compactados (La Antigua, Manlio Fabio Altamirano, Puente Nacional y Tlaxicoyan y $1,300 \text{ kg/m}^3$ para aquellos que tuvieron un mecanismo de compactación (Boca del Río, Medellín de Bravo y Veracruz),

obteniendo un área en su conjunto de 366,852 m² un volumen total 2,015,500 m³ y una cantidad acumulada de 2,491,751 Toneladas (Tabla 10.6).

Tabla 10.6 Área estimada, volumen y cantidad de residuos acumulados en los Sitio de Disposición Final Abandonados de la Región Sotavento.

Municipio	Tiradero a Cielo Abierto Abandonado	Área (m ²)	Volumen (m ³)	Residuos Acumulados (Ton)
Boca del Río	Col. 9 de marzo	55,600	222,400	289,120
La Antigua	Playa Oriente	7,348	14,696	7,348
Manlio Fabio A.	La Plataforma	14,515	29,030	14,515
Medellín	El Guayabo	68,038	136,076	176,896
Puente Nacional	Chichicastle	19,917	39,834	19,917
Puente Nacional	José Cardel	20,570	41,140	20,570
Tlaxiacoan	Mata Verde	13,636	27,272	6,818
Veracruz	Ex hda Santa Fé	167,228	1,505,052	1,956,567
	Total	326,365	1,934,526	2,451,262

Susunaga-Miranda et al., 2022.

Generación de Lixiviados.

Para utilizar la ecuación 9.2 a fin de estimar la generación de lixiviados de los Sitios de Disposición Final Abandonados (López-Vega et al, 2021) se determina primero el coeficiente K de compactación de los Sitios de Disposición Final Abandonados el cual se realizó por observación directa en visitas de campo en base a la tabla 9.2, los cuales se muestran en la tabla 10.7.

Tabla 10.7 Obtención del Coeficiente de compactación para estimación de lixiviados.

Sitio de Disposición Final	Grado de Compactación	K
Boca del Río	Fuertemente Compactado	0.25
Playa Oriente	Débilmente Compactado	0.50
La Plataforma.	Débilmente Compactado	0.50
El Guayabo	Fuertemente Compactado	0.15
Chichicaxtle	Débilmente Compactado	0.50
José Cardel	Débilmente Compactado	0.50
Mata Verde	Débilmente Compactado	0.50
Veracruz	Fuertemente Compactado	0.15

La cantidad de lixiviado que se estima para cada uno de los sitios de disposición final abandonados considera la precipitación promedio anual de las estaciones climatológicas 30048 El Copital para los Municipio de Medellín de Bravo y Tlaxicoyan, 30101 para Manlio Fabio Altamirano, 30192 para Boca del Río y Veracruz y 30193 José Cardel para el Municipio de La Antigua y Puente Nacional (Tabla 9.1) el coeficiente de compactación (Tabla 10.7) y su área libre (Tabla 10.6).

Para el año 2021 el total de lixiviados generados por los seis sitios de disposición final abandonados calculado fue de 98, 361.66 m³ (Tabla 10.8), para este resultado se consideró que el área total libre del Basurero abandonado de la Ciudad de Boca del Río es de solo 11,897 m² ya que en su mayor parte se encuentra ocupado por viviendas e infraestructura urbana.

Tabla 10.8 Lixiviados generados en Sitio de Disposición Final abandonados en la Región Sotavento del Estado de Veracruz para el año 2021.

Sitio de Disposición Final	P* media (m)	K**	Área Superficial (m ²)	Generación de Lixiviados (m ³)
Boca del Río***	1.559	0.25	11,897	4,636.85
Playa Oriente	1.322	0.50	7,348	4,857.02
La Plataforma	1.246	0.50	14,515	9,042.84
El Guayabo	1.583	0.25	68,038	29,926.03
Chichicaxtle	1.322	0.50	19,917	13,165.13
José Cardel	1.322	0.50	20,570	13,596.77
Mata Verde	1.583	0.50	13,636	10,792.89
Veracruz	1.559	0.15	167,227	39,106.03
			Total	125,123.56

*P Precipitación media anual (INEGI, 2021), **Coeficiente de compactación, *** Sólo el área libre.

Generación de Biogás

Para determinar el índice de Generación de Metano (k) ponderado (Tabla 10.9) se tomaron los valores propuestos de cuantificación dados por el Programa Estatal para la Prevención y la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial del Estado de Veracruz 2014 para la macro región Centro-Norte que incluye los municipios de Veracruz, Boca del Río, Paso de Ovejas, Medellín y

La Antigua (PEPGIRS, 2014), los valores de k modelo Mexicano de Biogás versión 2.0 para la Región Sureste (Aguilar-Virgen et al., 2012) donde se encuentra el Estado de Veracruz y los calculados a partir de la ecuación 9.4 para la Región Sotavento.

Tabla 10.9 Determinación de la k para la Región Sotavento.

Subproducto	Categoría de Degradación	Porcentaje de los RSU	Valor de k para la Región Sureste	Valor de k modificada
Residuos Alimenticio	DR	36.8	0.300	0.1104
Papel y Cartón	DML	8.2	0.050	0.0041
Residuo de Jardinería	DMR	9.0	0.130	0.0117
Papel Higiénico	DMR	11.7	0.130	0.0152
Pañales	DR	5.8	0.300	0.0174
Madera	DL	1.0	0.025	0.0003
			<i>k ponderada</i>	<i>0.1591</i>

La tabla 10.10 contiene factor de corrección de metano (MCF) y el potencial de generación de metano (L_0) para cada uno de los sitios de disposición final abandonados de la región Sotavento, los cuales se determinaron por medio de las diferencias de los niveles con las Imágenes satelitales de Google Earth® y con los valores del cuadro 9.2.

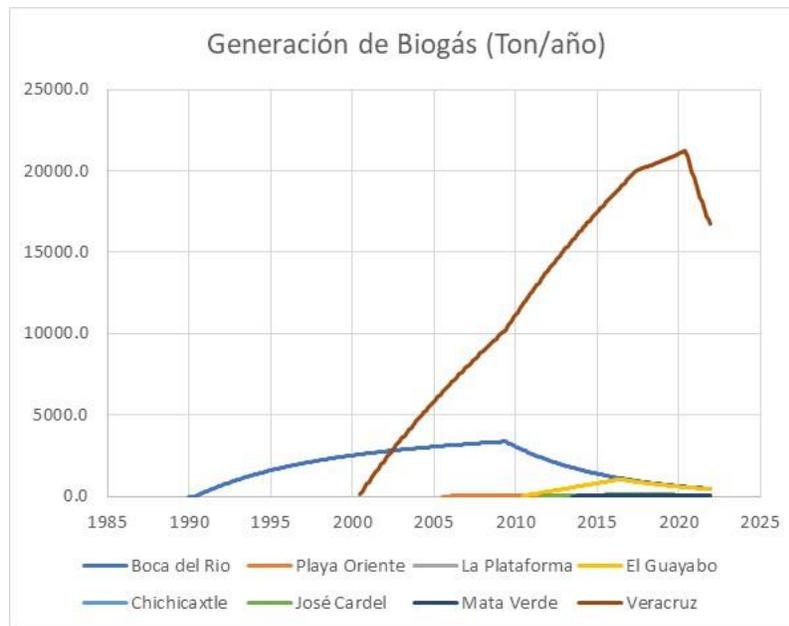
Tabla 10.10 Factor de Corrección de Metano y potencial de generación de metano (L₀) para los sitios de disposición final abandonados de la Región Sotavento.

Sitio de Disposición Final	Manejo del Sitio	Profundidad (m)	MCF	L ₀ (m ³ /Ton)
Boca del Río	Con Manejo	4.0	0.8	43.6
Playa Oriente	Desconocido	2.0	0.4	21.8
La Plataforma	Sin Manejo	2.0	0.4	21.8
El Guayabo	Con Manejo	2.0	0.8	43.6
Chichicaxtle	Desconocido	2.0	0.4	21.8
José Cardel	Sin Manejo	2.0	0.4	21.8
Mata Verde	Sin Manejo	2.0	0.4	21.8
Veracruz	Con Manejo	12.5	1.0	54.5

Para el factor de ajuste por incendios se revisó la información documental disponible y el único sitio de disposición final abandonado que presentó este tipo de contingencias fue el Basurero Municipal de Veracruz, en los años 2018 y 2019 con una muy baja severidad y poco impacto, por lo que se desprecia este factor.

La estimación de la generación de biogás y el cálculo de la disposición de los desechos en los sitios de disposición final abandonados de la región Sotavento se graficaron en la figura 10.10 cabe hacer mención que si bien el basurero de Boca del Río, fue abandonado a finales del 2008, el ayuntamiento dispuso sus residuos hasta 2015 en el Sitio de Disposición Final en el Municipio de Veracruz.

Figura 10.12 Generación de Biogás de los Sitios de Disposición Final Abandonados de la Región Sotavento, de 1990 al 2021.



Como se puede observar en la figura 10.12 la generación de Biogás inicia a los seis meses de que se comienza la operación del sitio de disposición final, se incrementa con el paso de los años y al momento del cierre de los mismos empieza un decaimiento en la Generación de estos gases, toda vez de que se detiene la disposición final de residuos sólidos urbanos (Tabla 10.10)

Tabla 10.11 Disposición de R.S.U y generación de Biogás en los Sitios de Disposición Final Abandonados de la Región Sotavento.

Periodo (Años)	Generación calculada de RSU (Ton)	Emisión estimada de Biogás (millones de Ton)
1990-1994	194,988	32.28
1995-1999	208,543	84.90
2000-2004	905,373	348.15
2005-2009	1,174,036	811.99
2010-2014	1,564,614	1,299.72
2015-2019	1,568,717	1,717.74
2020-2024	*	1,334.07

* La disposición de RSU termina en el año 2019 por lo que ya no hay generación calculada.

Como se puede apreciar en la tabla 10.11 de 1990 a 2019 los residuos acumulados en los siete sitios de disposición final abandonados en la región Sotavento del Estado de Veracruz fue de 5,616,271 toneladas y la emisión de Biogás en ese mismo periodo fue de 4294.78 millones de Toneladas, y que para el período del 2020 al 2024 se emitan 1,334.07 millones de Toneladas de biogás.

Flora y Fauna presentes en los basureros abandonados.

Los sitios de disposición final abandonados de la región sotavento del estado de Veracruz hasta el 2022 no contaban con ningún proceso de clausura, por lo que en su mayoría han desarrollado una cubierta vegetal encima de los mismo y, dadas las condiciones climáticas de la zona han sido invadidos por gramíneas oportunistas (Figura 10.13) como el zacate (*Paspalum notatum*), estropajo (*Luffa*

aegyptiaca P. Miller), Zacate cadillo (*Enneapogon desvauxii* P. Beauv) el basurero de Veracruz presenta muy poca cubierta vegetal y el de Boca del Río.

Figura 10.13 Basurero Abandonado de Mata Verde, Tlalixcoyan.



La fauna que se encuentra de forma temporal en estos sitios se pueden identificar insectos como: orugas de mariposa (*Papilionidae*), Chinchas (*Balboa* sp.), Cucaracha (*Periplaneta americana*), Mosca (*Musca domestica*) y Mosquito común (*Culex pipiens*) además de Mamíferos como: ratones (*Mus musculus*), Ratas (*Rattus norvegicus*) y aves como zopilotes (*Coragyps atratus*) que se pueden considerar fauna nociva.

Incendios y Explosiones.

Un problema que han presentado los sitios abandonados de la Región Sotavento es el incendio espontáneo de los RSU como resultado de una combinación de factores como la falta de recursos, personal e infraestructura (Bernaché, 2015) o provocados por la quema de desechos para la recuperación de metales y de otros recursos a partir de llantas y cables eléctricos (Atencio-Pérez *et al.*, 2013). De los ocho Sitio de Disposición Final desde su abandono los basureros de Chichicaxtle en Puente Nacional (Figura 10.14) en los años 2014 y 2018 (García, 2018) y de Veracruz en la ex hacienda Santa Fé (Figura 10.15) en los años 2020 y el 2021 (AVC, 2022) se incendiaron, provocando cierres en la Autopista Xalapa-Veracruz, la generación de humo y la actuación de las autoridades de protección civil, tanto estatal como municipal.

Figura 10.14 Incendio del Basurero Municipal Puente Nacional en Chichicaxtle.



García, 2018

Figura 10.15 Incendio del Ex basurero Municipal de Veracruz en la ex hacienda Santa Fe.



AVC, 2022.

Malos Olores.

Durante las visitas de campo realizadas a los seis sitios de disposición final solo en el Relleno Sanitario Clausurado de la Ciudad de Veracruz presentaba malos olores, ya que, al ser cerrado por las autoridades estatales, no se permitió el ingreso de maquinaria para cubrir los residuos almacenados quedando estos expuestos.

Inestabilidad de Taludes.

En cuanto a la inestabilidad de taludes, ninguno de los seis sitios de disposición final abandonados ha presentado movimientos desde que se abandonaron o clausuraron ya que dada la compactación de algunos y la poca altura alcanzada por otros no se ha registrado movimiento de tierras

Asentamientos Humanos.

El Basurero abandonado de Boca del Río ya cuenta con un asentamiento humano sobre de éste, que es conocido como la Colonia 9 de marzo (SDSMA, 2006); tiene 150 Casas habitación y una estación de policía (Figura 10.16), y solo el 18.75% del sitio aún no se ha construido, el sitio de La Plataforma ya cuenta con una casa habitación en el predio donde se instaló el basurero.

Figura 10.16 Estación de Policía del municipio de Boca del Río, sobre el basurero municipal abandonado.



Presencia de Residuos Sólidos

En los sitios de disposición final abandonados de la Colonia 9 de marzo en Boca del Río, La Plataforma en Manlio Fabio Altamirano, Playa Oriente en La Antigua, José Cardel en Puente Nacional no se observa presencia de Residuos Sólidos, sin embargo, en Chichicaxtle en Puente Nacional, Mata Verde en Tlaxiucoyan, El Guayabo en Medellín de Bravo y sobre todo en el Relleno Sanitario clausurado de

la ex hacienda Santa Fé en Veracruz, se puede apreciar la presencia de residuos sólidos.

Figura 10.17 Residuos Sólidos presentes en el basurero abandonado de Mata Verde, Tlaxicoyan.



Presencia de Pepenadores.

Para 2021 ninguno de los seis sitios de disposición final abandonados contaba con la presencia de pepenadores.

10.4 Grado de impacto para el ambiente de los Sitios de disposición final.

Tomando la ecuación 9.7 y los factores de Impacto de los Sitios de Disposición Final establecidos en el apartado 10.3 se ha determinado:

a) Matriz de Impacto para el Sitio de Disposición Final Abandonado de Playa Oriente, La Antigua.

Los impactos que generan los factores ambientales en el Sitio de Disposición Final No Controlado Abandonado de Playa Oriente (Figura 10.18) se consideran irrelevantes, sin que esto signifique que no se debe de realizar un procedimiento de clausura del mismo.

Figura 10.18 Matriz de Impactos para el Sitio de Disposición Final No Controlado Abandonado de Playa Oriente, La Antigua.

Sitio de Disposición Final Abandonado Playa Oriente								Municipio La Antigua						Categoría
Factor Ambiental	S	I	EX	MO	PE	RV	MC	SI	AC	EF	PR	I		
Área del Sitio de Disposición Final	-	2	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	19	Irrelevante
Volumen de los Residuos Acumulados	-	2	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	19	Irrelevante
Cantidad de Residuos Acumulados	-	2	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	19	Irrelevante
Generación de Lixiviados	-	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	16	Irrelevante
Generación de Biogás	-	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	16	Irrelevante
Flora y Fauna	+	2	2	2	1	2	1	1	1	1	1	1	22	Irrelevante
Incendios y Explosiones	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No Presente
Malos Olores	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No Presente
Inestabilidad del Terreno	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No Presente
Presencia de Asentamientos Humanos	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No Presente
Presencia de Residuos Sólidos	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No Presente
Presencia de Pепенadores	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No Presente
IMPACTO ACUMULADO												9.3	Irrelevante	

Los factores ambientales que se cuantifican con un mayor valor tienen que ver con la cantidad de residuos sólidos que se encuentran almacenados en el sitio de disposición final, aunque gran parte de la zona ha sido asimilada por el ecosistema.

b) Matriz de Impacto para el Sitio de Disposición Final Abandonado de la Colonia 9 de marzo, Boca del Río.

En cuanto al ex basurero municipal de Boca del Río, localizado en la colonia 9 de marzo lo más crítico tiene que ver con la cantidad de viviendas y de infraestructura que se ha desarrollado sobre este sitio, sin embargo, hay 4 factores que representan un impacto severo, dos moderados y dos irrelevantes (Figura 10.19).

Figura 10.19 Matriz de Impactos para el Sitio de Disposición Final Controlado Abandonado de la Colonia 9 de marzo, Boca del Río.

Sitio de Disposición Final Abandonado Colonia 9 de Marzo										Municipio Boca del Río					Categoría
Factor Ambiental	S	I	EX	MO	PE	RV	MC	SI	AC	EF	PR	I			
Área del Sitio de Disposición Final	-	5	5	2	4	4	6	1	1	1	1	50	Severo		
Volumen de los Residuos Acumulados	-	8	5	2	4	4	6	1	4	1	1	62	Severo		
Cantidad de Residuos Acumulados	-	8	5	2	4	4	6	1	4	1	1	62	Severo		
Generación de Lixiviados	-	5	5	2	4	4	4	1	2	1	1	49	Moderado		
Generación de Biogás	-	5	5	2	4	4	4	1	2	1	1	49	Moderado		
Flora y Fauna	+	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	14	Irrelevante		
Incendios y Explosiones	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No Presente		
Malos Olores	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	14	Irrelevante		
Inestabilidad del Terreno	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No Presente		
Presencia de Asentamientos Humanos	-	10	6	4	4	4	8	2	2	4	4	80	Crítico		
Presencia de Residuos Sólidos	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No Presente		
Presencia de Pепенadores	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No Presente		
IMPACTO ACUMULADO												32	Moderado		

Los factores que tienen que ver con la acumulación de los residuos representan un impacto severo, los cuales en su mayor parte serán irreversibles toda vez de que

los asentamientos humanos presentes impiden hasta cierto punto su clausura o remediación, sin embargo, estos permiten que la generación de lixiviados y de biogás sea moderado ya que en su mayor parte están cubiertos los residuos.

c) Matriz de Impacto para el Sitio de Disposición Final Abandonado El Guayabo, Medellín de Bravo.

En cuanto al sitio de disposición final controlado de El Guayabo, en el municipio de Medellín de Bravo se determinaron tres impactos severos (Figura 10.20) y estos tienen que ver con el acumulamiento de los residuos sólidos, su volumen y la extensión del mismo, los impactos moderados se observaron en la generación de Lixiviados y Biogás, así como con la presencia de residuos sólidos por toda la zona, ya que el sitio no ha sido cubierto, fue abandonado sin que se cubrieran los residuos, este sitio adicionalmente presenta malos olores por el proceso degradativo de los desechos, el cual continúa y de fauna nociva, representada por entre otros por roedores, zopilotes, cucarachas, etc., en cuanto a la presencia de flora, este ha comenzado a ser cubierto por zacate.

Uno de los aspectos más importantes detectados, es que el sitio de disposición final controlado abandonado de El Guayabo tiene las características necesarias para iniciar con su proceso de clausura, ya que no existen asentamientos humanos en el lugar.

Figura 10.20 Matriz de Impactos para el Sitio de Disposición Final Controlado Abandonado de El Guayabo, Medellín de Bravo.

Sitio de Disposición Final Abandonado El Guayabo								Municipio Medellín de Bravo						Categoría
Factor Ambiental	S	I	EX	MO	PE	RV	MC	SI	AC	EF	PR	I		
Área del Sitio de Disposición Final	-	7	5	2	4	4	4	1	1	1	1	1	54	Severo
Volumen de los Residuos Acumulados	-	5	5	2	4	4	4	1	4	1	1	1	51	Severo
Cantidad de Residuos Acumulados	-	5	5	2	4	4	4	1	4	1	1	1	51	Severo
Generación de Lixiviados	-	5	5	2	4	4	4	1	2	1	1	1	49	Moderado
Generación de Biogás	-	5	5	2	4	2	4	1	2	1	1	1	47	Moderado
Flora y Fauna	-	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	16	Irrelevante
Incendios y Explosiones	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No Presente
Malos Olores	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	14	Irrelevante
Inestabilidad del Terreno	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No Presente
Presencia de Asentamientos Humanos	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No Presente
Presencia de Residuos Sólidos	-	2	4	1	2	2	1	4	1	1	1	1	31	Moderado
Presencia de Pепенadores	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No Presente
IMPACTO ACUMULADO												26	Moderado	

d) Matriz de Impacto para el Sitio de Disposición Final Abandonado La Plataforma, Manlio Fabio Altamirano.

En el caso del Sitio de Disposición Final Abandonado de La Plataforma, el mayor impacto se presenta en la regeneración de la cubierta vegetal, ya que en el lugar ha crecido árboles y dado el poco tiempo que estuvo en operación los impactos que tienen que ver con la generación de biogás y la emisión de lixiviados se ha determinado que tiene un carácter de irrelevantes, sin que esto no implique la necesidad de clausurar el sitio (figura 10.21).

Figura 10.21 Matriz de Impactos para el Sitio de Disposición Final No Controlado Abandonado La Plataforma en Manlio Fabio Altamirano.

Sitio de Disposición Final Abandonado La Plataforma										Municipio Manlio Fabio Altamirano				Categoría
Factor Ambiental	S	I	EX	MO	PE	RV	MC	SI	AC	EF	PR	I		
Área del Sitio de Disposición Final	-	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	16	Irrelevante
Volumen de los Residuos Acumulados	-	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	16	Irrelevante
Cantidad de Residuos Acumulados	-	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	16	Irrelevante
Generación de Lixiviados	-	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	16	Irrelevante
Generación de Biogás	-	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	16	Irrelevante
Flora y Fauna	+	2	2	2	1	2	1	1	1	1	1	1	22	Irrelevante
Incendios y Explosiones	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No Presente
Malos Olores	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No Presente
Inestabilidad del Terreno	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No Presente
Presencia de Asentamientos Humanos	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	14	Irrelevante
Presencia de Residuos Sólidos	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No Presente
Presencia de Pепенadores	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No Presente
IMPACTO ACUMULADO												9.7	Irrelevante	

e) Matriz de Impacto para el Sitio de Disposición Final Abandonado Chichicaxtle, Puente Nacional.

Los aspectos ambientales de mayor relevancia que presenta el sitio de disposición final abandonado de Chichicaxtle en el municipio de Puente Nacional (Figura 10.22) tienen que ver con la extensión, el volumen y la cantidad de residuos almacenados, ya que estos en su mayoría provenían de los municipios de Xalapa y Coatepec y si bien desde 2017 se encuentra abandonado, las autoridades municipales de Puente Nacional lo han ocupado de manera esporádica, presentando incendios y dada su cercanía a la autopista Xalapa-Veracruz

representa un riesgo para los automovilistas que transitan por esta vía de comunicación.

Figura 10.22 Matriz de Impactos para el Sitio de Disposición Final No Controlado Abandonado Chichicaxtle, Puente Nacional.

Sitio de Disposición Final Abandonado Chichicaxtle								Municipio Puente Nacional						Categoría
Factor Ambiental	S	I	EX	MO	PE	RV	MC	SI	AC	EF	PR	I		
Área del Sitio de Disposición Final	-	5	2	2	1	2	1	2	2	2	1	34	Moderado	
Volumen de los Residuos Acumulados	-	3	2	2	1	2	2	2	1	2	2	29	Moderado	
Cantidad de Residuos Acumulados	-	3	2	2	1	2	1	1	1	1	1	25	Moderado	
Generación de Lixiviados	-	2	1	2	1	2	1	1	1	1	1	19	Irrelevante	
Generación de Biogás	-	2	1	2	1	2	1	1	1	1	1	19	Irrelevante	
Flora y Fauna	+	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	15	Irrelevante	
Incendios y Explosiones	-	2	2	2	2	2	2	1	2	1	1	25	Moderado	
Malos Olores	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No Presente	
Inestabilidad del Terreno	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No Presente	
Presencia de Asentamientos Humanos	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No Presente	
Presencia de Residuos Sólidos	-	2	2	2	2	2	1	2	1	2	1	25	Moderado	
Presencia de Pепенadores	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No Presente	
IMPACTO ACUMULADO												16	Irrelevante	

f) Matriz de Impacto para el Sitio de Disposición Final Abandonado José Cardel, Puente Nacional.

En el caso del Sitio de Disposición Final Abandonado José Cardel, el mayor impacto se presenta en la regeneración de la cubierta vegetal, ya que en el lugar han crecido gramíneas y dado el poco tiempo que estuvo en operación los impactos que tienen que ver con la generación de biogás y la emisión de lixiviados se ha determinado que tiene un carácter de irrelevantes, sin que esto no implique la necesidad de clausurar el sitio (figura 10.23).

Figura 10.23 Matriz de Impactos para el Sitio de Disposición Final No Controlado Abandonado José Cardel, Puente Nacional.

Sitio de Disposición Final Abandonado José Cardel								Municipio Puente Nacional						
Factor Ambiental	S	I	EX	MO	PE	RV	MC	SI	AC	EF	PR	I	Categoría	
Área del Sitio de Disposición Final	-	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	16	Irrelevante	
Volumen de los Residuos Acumulados	-	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	16	Irrelevante	
Cantidad de Residuos Acumulados	-	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	16	Irrelevante	
Generación de Lixiviados	-	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	16	Irrelevante	
Generación de Biogás	-	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	16	Irrelevante	
Flora y Fauna	+	2	2	2	1	2	1	1	1	1	1	22	Irrelevante	
Incendios y Explosiones	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No Presente	
Malos Olores	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No Presente	
Inestabilidad del Terreno	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No Presente	
Presencia de Asentamientos Humanos	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No Presente	
Presencia de Residuos Sólidos	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No Presente	
Presencia de Pепенadores	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No Presente	
IMPACTO ACUMULADO												9	Irrelevante	

Cabe mencionar que este sitio de disposición pertenece al ayuntamiento de La Antigua, el cual es propietario del terreno, el cual geográficamente se encuentra en el municipio de Puente Nacional.

f) Matriz de Impacto para el Sitio de Disposición Final Abandonado Mata Verde, Tlaxcoyan.

Para el sitio de disposición final no controlado de Mata Verde en el municipio de Tlaxcoyan se determinaron seis factores ambientales (Figura 10.24) presentes que, si bien en la calificación se categorizaron como irrelevantes, sin embargo, a pesar de que gran parte del sitio ha sido asimilado por el ecosistema presente, aún

existe una cantidad considerable de desechos acumulados y sin tratamiento, lo que hace necesaria su clausura adecuada de conformidad con la normatividad nacional.

Figura 10.24 Matriz de Impactos para el Sitio de Disposición Final No Controlado Abandonado Mata Verde, Tlalixcoyan.

Sitio de Disposición Final Abandonado Mata Verde								Municipio Tlalixcoyan						Categoría
Factor Ambiental	S	I	EX	MO	PE	RV	MC	SI	AC	EF	PR	I		
Área del Sitio de Disposición Final	-	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	16	Irrelevante
Volumen de los Residuos Acumulados	-	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	16	Irrelevante
Cantidad de Residuos Acumulados	-	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	16	Irrelevante
Generación de Lixiviados	-	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	16	Irrelevante
Generación de Biogás	-	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	16	Irrelevante
Flora y Fauna	+	2	2	2	1	2	1	1	1	1	1	1	22	Irrelevante
Incendios y Explosiones	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No Presente
Malos Olores	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No Presente
Inestabilidad del Terreno	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No Presente
Presencia de Asentamientos Humanos	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No Presente
Presencia de Residuos Sólidos	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No Presente
Presencia de Peperadores	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No Presente
IMPACTO ACUMULADO												8.5	Irrelevante	

f) Matriz de Impacto para el Relleno Sanitario Clausurado Abandonado del Municipio de Veracruz.

El Relleno Sanitario Clausurado Abandonado del municipio de Veracruz, localizado en terrenos de la Administración del Sistema Portuario Nacional de Veracruz, en la ex hacienda Santa Fe es el único de los sitios de disposición final abandonado que posee los doce factores de impacto sobre el ambiente (figura 10.25), tres de los

cuales se encuentran en estado crítico y son los que tienen que ver con la extensión, el volumen de los residuos y la cantidad de los mismos, cuatro factores representan impactos severos y estos son los que tienen que ver con la generación de contaminantes por medio de los lixiviados, los biogases y los incendios constantes que aún se siguen presentando en el lugar lo que hace que los residuos escapen de la zona de contención de los mismos y migren por efecto de los vientos constantes hacia la zona urbana, esto provoca una inestabilidad del terreno que como factor de impacto tiene un carácter de moderado.

Figura 10.25 Matriz de Impactos para el Relleno Sanitario clausurado Abandonado del Municipio de Veracruz.

Sitio de Disposición Final Abandonado								Municipio Veracruz						I	Categoría
Factor Ambiental	S	I	EX	MO	PE	RV	MC	SI	AC	EF	PR				
Área del Sitio de Disposición Final	-	12	7	4	3	2	3	3	4	1	4	81	Crítico		
Volumen de los Residuos Acumulados	-	12	7	4	3	2	3	4	4	1	4	82	Crítico		
Cantidad de Residuos Acumulados	-	12	7	4	3	2	3	4	4	1	4	82	Crítico		
Generación de Lixiviados	-	9	4	3	3	2	3	3	4	1	3	61	Severo		
Generación de Biogás	-	11	6	3	3	2	3	3	4	1	3	73	Severo		
Flora y Fauna	-	1	1	1	2	2	1	1	1	4	1	19	Irrelevante		
Incendios y Explosiones	-	7	4	4	2	1	3	3	1	4	3	54	Severo		
Malos Olores	-	2	2	1	2	1	3	2	1	4	2	28	Irrelevante		
Inestabilidad del Terreno	-	4	3	1	2	1	1	2	1	4	1	34	Moderado		
Presencia de Asentamientos Humanos	-	1	1	1	1	1	1	1	1	4	1	17	Irrelevante		
Presencia de Residuos Sólidos	-	11	4	1	2	1	1	2	1	4	1	58	Severo		
Presencia de Pепенadores	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	14	Irrelevante		
IMPACTO ACUMULADO												50	Severo		

Los factores que pueden determinarse como irrelevantes son la presencia de flor y fauna, toda vez de que esta ha migrado por las condiciones del sitio, y no se ha presentado salvo en periodos muy cortos una cubierta vegetal autóctona, para

finalizar los asentamientos humanos, los malos olores y la presencia de pepenadores es irrelevante, lo anterior debido a que, si bien hay algunas construcciones temporales que pepenadores utilizan como vivienda, estas son temporales.

10.5 Clausura de los Sitios de Disposición Final No Controlados Abandonados

El diseño genérico del Cierre y Clausura de los Sitios de Disposición Final No Controlados Abandonados para la región Sotavento del Estado de Veracruz, incluye:

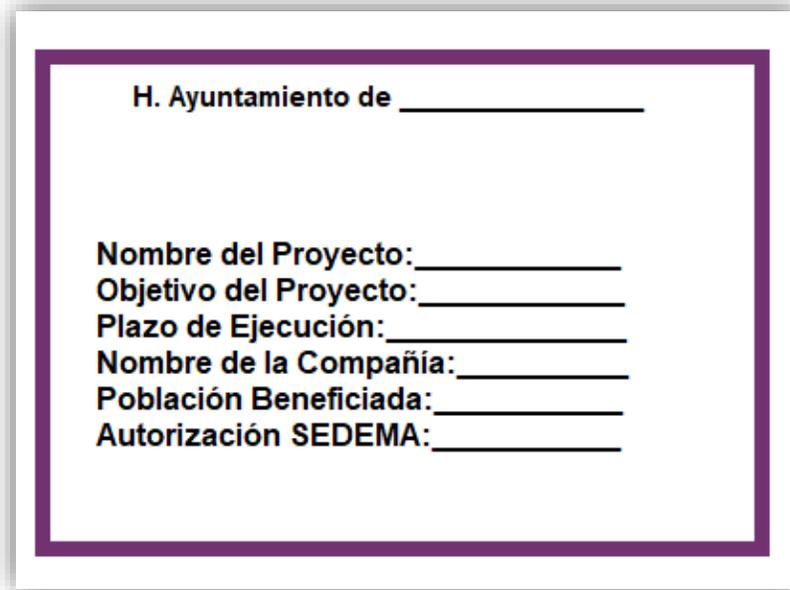
a) Etapa de Cierre o Pre clausura

Las actividades previas a la clausura que se llevarán a cabo para garantizar el desarrollo de los trabajos en los sitios de disposición final tienen como objeto informar a la comunidad, restringir el acceso, la limpieza de las zonas aledañas, así como la compactación, sellado y estabilización de los residuos.

Señalamientos Restrictivos

Los señalamientos preventivos y restrictivos, el primero será una lona con la información del sitio de disposición final en proceso de clausura, la cual localizarán en la entrada, en la caseta de vigilancia o en la valla perimetral que rodea al emplazamiento, con medidas de 2.40 metros por 1.20 metros con la información (Figura 10.26).

Figura 10.26 Señalamiento del Sitio de Disposición Final
Abandonado en proceso de clausura.



H. Ayuntamiento de _____

Nombre del Proyecto: _____

Objetivo del Proyecto: _____

Plazo de Ejecución: _____

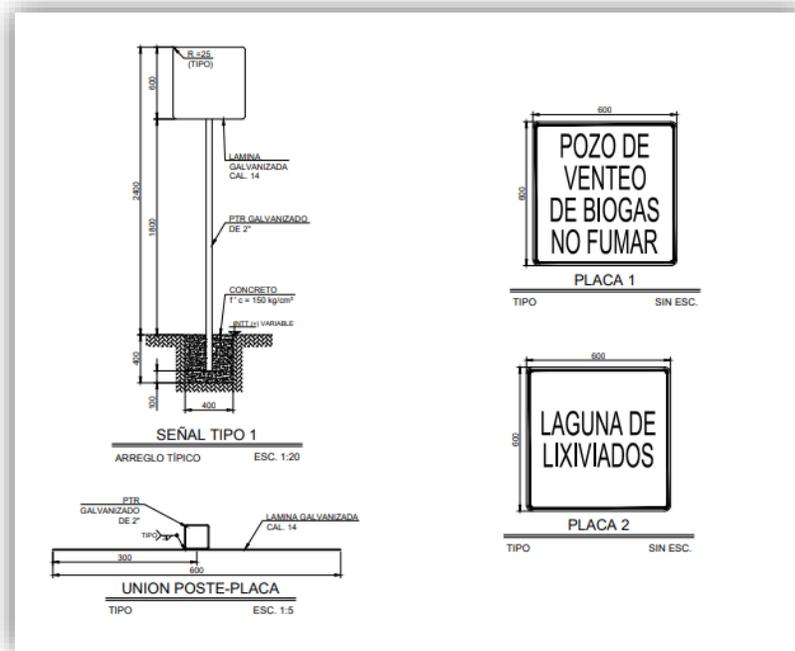
Nombre de la Compañía: _____

Población Beneficiada: _____

Autorización SEDEMA: _____

Adicionalmente se instalará una serie de señalamientos preventivos en los pozos de venteo de biogás y en el sistema de tratamiento de lixiviados en tubos de acero galvanizado de una altura de 2.4 metros con un letrero restrictivo de 0.6 metros por 0.6 metros en lámina galvanizada colocada a 1.8 metros de altura (Figura 10.27)

Figura 10.27 Señalamientos Restrictivos.



Control de Fauna Nociva

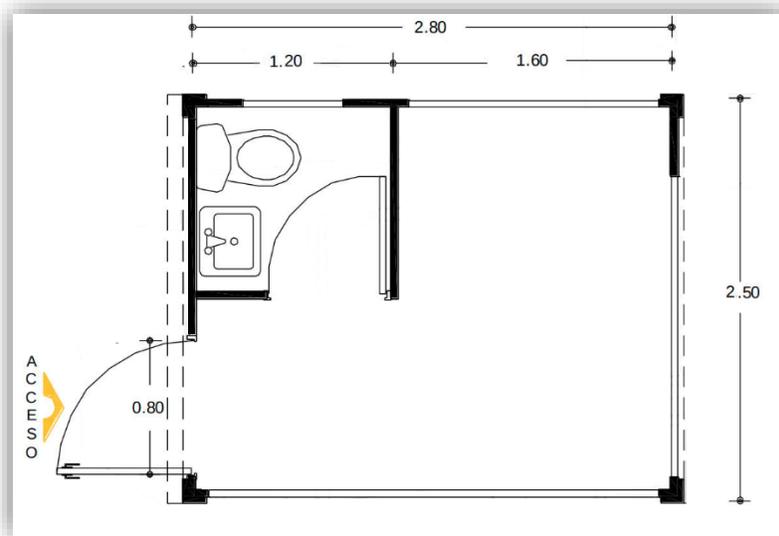
Para la eliminación de fauna nociva (roedores) se debe de contratar empresas de la Región Sotavento especializadas y que realice un trabajo inicial de colocación de trampas para ratas y ratones con cebos parafinados (a prueba de agua y pellets) a fin de recolectar a los roedores presentes en el área.

Restricción de Acceso al Sitio

La restricción del acceso al sitio será por medio de una caseta de vigilancia, puerta y control de acceso, cerca perimetral.

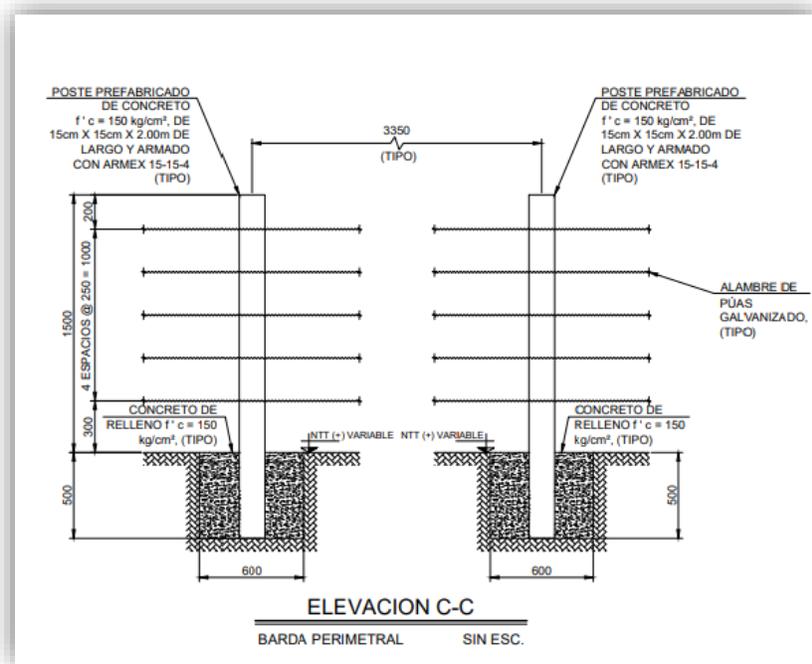
Con las características establecidas en la metodología, la caseta de vigilancia se prefabrica con 2.80 metros de largo y 2.50 metros de ancho y una altura de 2.70 metros (Figura 10.28).

Figura 10.28 Caseta de Vigilancia Prefabricada.



Para el cercado perimetral se realizarán excavaciones con la colocación de postes prefabricados de dos metros de alto de concreto $f_c' 150 \text{ kg/cm}^2$ cuadrados con medidas de 15 centímetros por 15 centímetros, anclados con un relleno de concreto y alambre de púas galvanizado, con una distancia entre ellos de dos metros a fin de cubrir todo el perímetro del sitio de disposición final abandonado y evitar el paso de personas no autorizadas (Figura 10.29)

Figura 10.29 Cerca Perimetral.



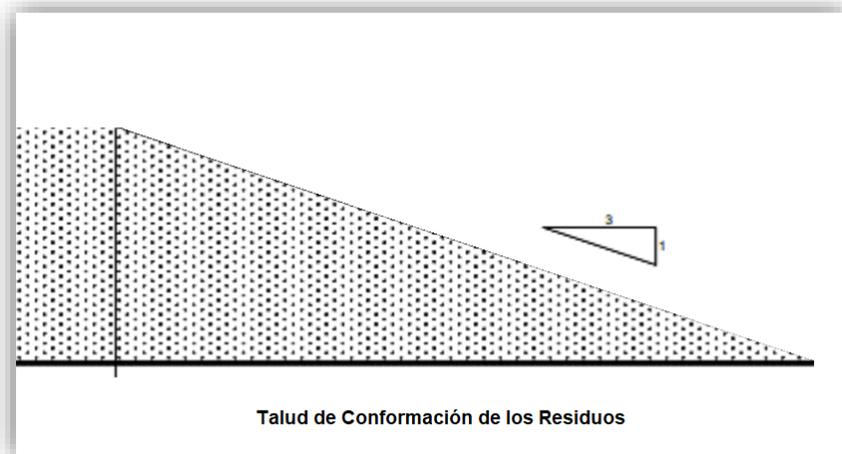
Recolección de Residuos en los predios vecinos

La recolección de los residuos sólidos que se encuentren en los predios vecinos se podrá realizar de manera manual y mecánica, esto es por medio de trabajadores con palas y carretillas en el caso de que sean pocos o por medio de trascabos de carga frontal para acomodarlos al centro del área del sitio de disposición final abandonado.

Conformación, compactación y sellado de los residuos sólidos.

Se debe de utilizar un trascabo frontal que empujará los desechos para conformar un acumulamiento de los residuos de forma de pila en el centro del terreno la cual una vez establecida se acomodará con una pendiente 3:1 de arriba hacia abajo (Figura 10.30).

Figura 10.30 Acomodo y conformación de los residuos en los sitios de disposición final no controlados abandonados.



Una vez conformados se debe realizar una compactación hasta un máximo del 60% determinado por una prueba Proctor en laboratorio de Mecánica de Suelos.

Con la pila de residuos conformados y compactados se procederá a transportar, colocar y el material de sellado, el cual dada las características de la región sotavento se propone que sea la arena de duna, el cual se encuentra en bancos a distancias cortas de los sitios, para lo cual se utilizarán camiones de volteo de 6 m³

de capacidad hasta una altura mínima de 30 centímetros por encima de los residuos.

b) Etapa de Clausura

Esta etapa está dirigida a la construcción de los mecanismos de control ambiental y debe de iniciar cuando la totalidad de los residuos sólidos hayan sido cubiertos como se indica en la NOM-083-SEMARNAT-2003.

Las obras de control que se construirán durante esta etapa son:

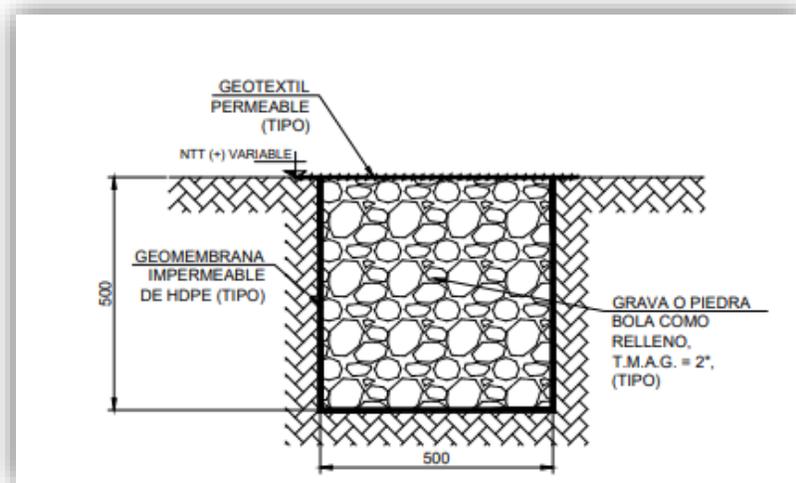
Conformación y Estabilidad de Taludes

A fin de que los taludes no se vean afectados por diversas causas se deben de tomar precauciones para evitar fallas por deslizamiento, esto evitando que los taludes tengan inclinaciones mayores a 3:1, a fin de prevenir fallas por movimiento del cuerpo del talud se ha recomendado la compactación de la pila hasta un 45% y finalmente para evitar fallas por licuefacción es que el material de cobertura que se propone son arena de dunas.

Construcción del Drenaje Superficial (Sistemas de control de escurrimientos)

La zanja donde se construirá el drenaje pluvial (Figura 10.31) debe de ser perimetral al predio del a una distancia de un metro de la malla de protección a fin de evitar que el agua de lluvia proveniente de los predios vecinos escurra hacia el sitio de disposición final clausurado.

Figura 10.32 Sistema de Drenaje Pluvial.



Sistema de Control de Biogás.

Los pozos de venteo pasivo consisten en una perforación de 40 centímetros de diámetro, a una profundidad desde 4.5 hasta 5.9 metros dependiendo del sitio de disposición final no controlado abandonado, en los cuales se coloca un tubo de PVC de 4 pulgadas ranurado y empacado con grava diámetro controlado de 2 pulgadas como mínimo, en la pared del pozo se colocará un recubrimiento de malla electrosoldada de 6 x 6/10-10. En la parte superior del pozo se coloca un sello con arcilla, arena limpia y un sello de bentonita que impida la salida descontrolada del biogás y/o la entrada de agua hacia el interior del pozo, la altura del tubo de PVC por la parte exterior de los residuos será de 1.6 metros (Figura 10.33), sobre el cual se coloca un tubo de PVC en U para evitar la entrada de agua.

Es importante mencionar que por la cantidad de Biogás que aún se genera no es recomendable la colocación de quemadores, ya que por la maduración de los residuos estos cada vez generarán menos gas.

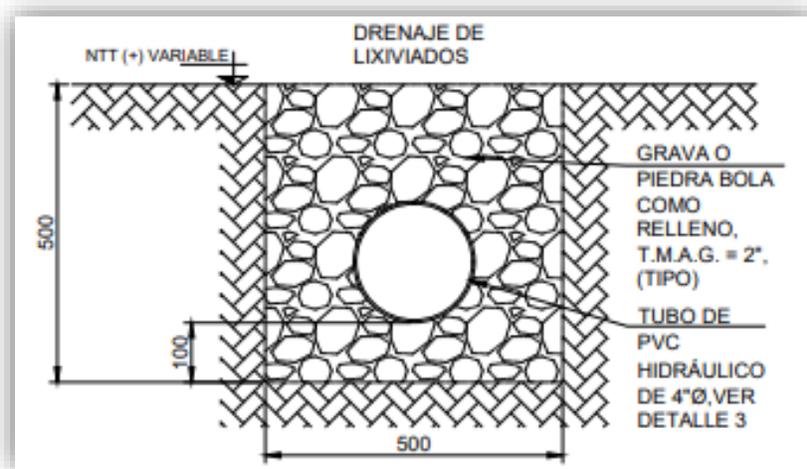
mínima de 3% para que estos migren hacia el sistema de tratamiento de los mismos el cual consiste en un filtro de arena sílica activada y una laguna de oxidación.

La construcción de una laguna de lixiviados en la parte más baja del predio, por medio de excavación e impermeabilización con geomembrana, y sistema de captación de contaminantes con Barreras Reactivas Permeables de Arena Sílica.

Drenaje de Lixiviados.

El drenaje de Lixiviados consiste en una zanja 50 x 50 centímetros donde se colocará una capa de 10 cm de grava y un sistema de tuberías de PVC hidráulico de 8 pulgadas de diámetro ranurado al tres bolillo y recubierto por grava a fin de permitir el paso de solo los líquidos como se muestra en la figura 10.34.

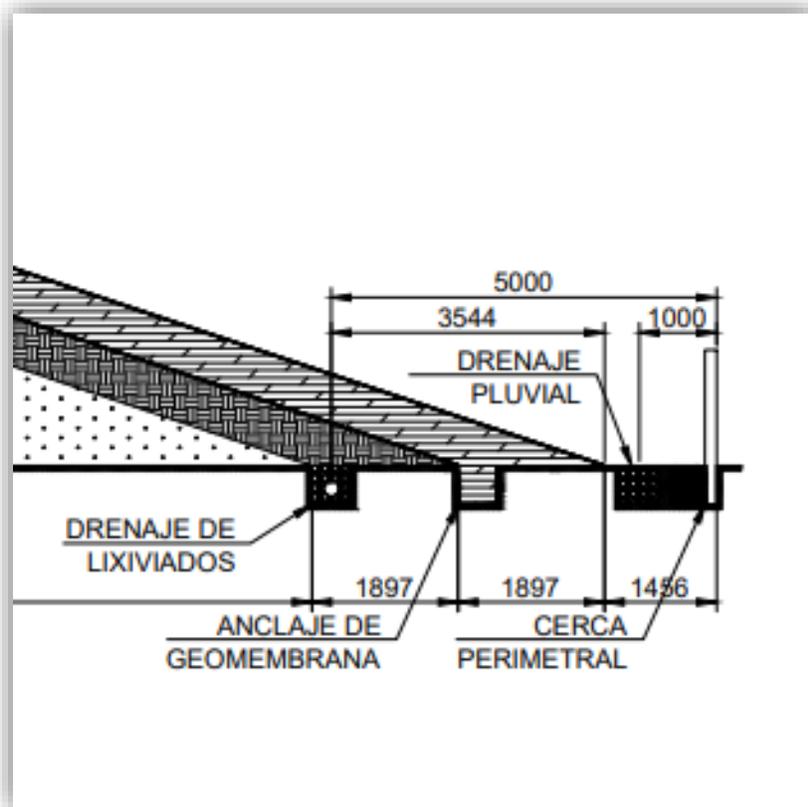
Figura 10.34 Drenaje de Lixiviados



La grava a ser utilizadas debe ser de 2 pulgadas de diámetro y no contener partículas finas a fin de asegurar una buena permeabilidad hidráulica y su espesor de 10 centímetros con el fin de proteger la permeabilidad.

El drenaje de lixiviados discurrirá soterrado y aislado de la lluvia como se muestra en la figura 10.35, este estará conectado al sistema de tratamiento de lixiviados.

Figura 10.34 Drenaje de Lixiviados

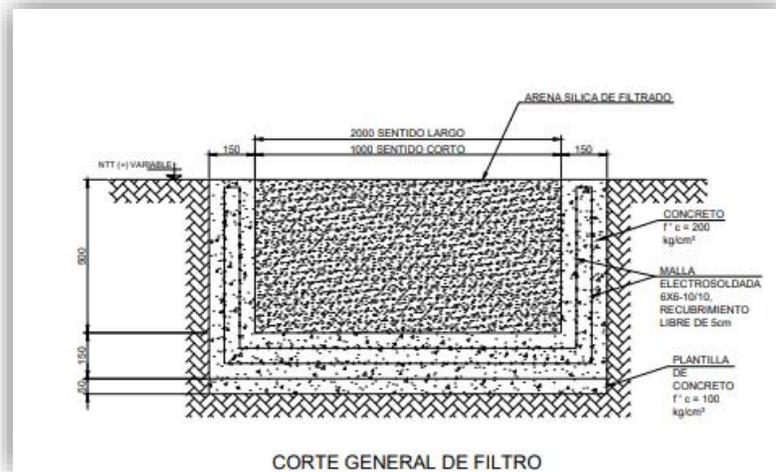


Sistema de Tratamiento de Lixiviados.

Al término del sistema de drenaje de lixiviados estos serán colectados y enviados a un filtro de arena sílica activada, el cual permitirá la remoción de metales pesados, reducir la DQO y la DBO₅, este colector será cuadrado construido con concreto armado con una profundidad de 50 centímetros y un canal de dos metros de largo

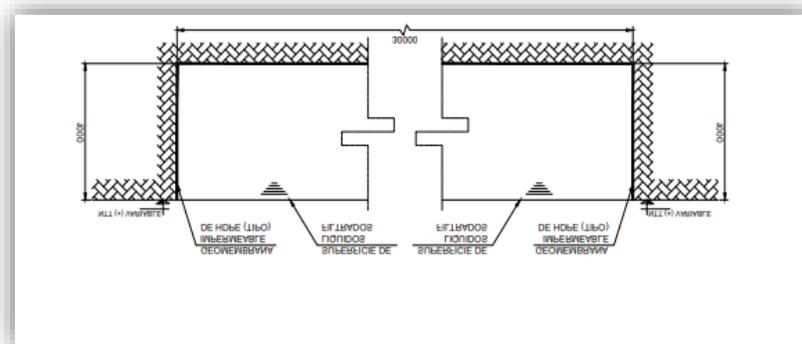
por uno de ancho, empackado con Arena Sílica como Barrera Reactiva Permeable (Figura 10.35).

Figura 10.35 Filtro de Arena Sílica.



La laguna de estabilización de lixiviados tendrá una profundidad de un metro, será cuadrada con dimensiones de 30 metros por treinta metros con una interconexión final hacia el vaso regulador final y un metro de profundidad (Figura 10.36).

Figura 10.36 Laguna de Estabilización de Lixiviados

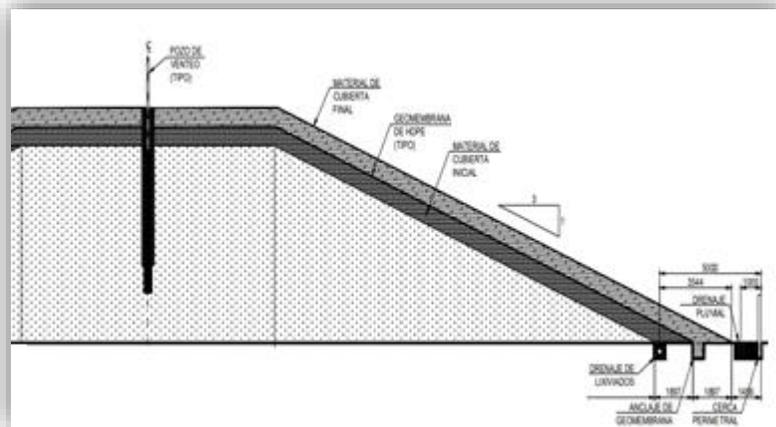


Cobertura del Sitio de Disposición Final Abandonado.

La cobertura final del sitio de disposición será mediante un sellado con membrana sintética con espesor de 40 milésimas de pulgada evitando el rompimiento de la misma con elementos punzocortantes, los rollos de geomembrana serán colocados por medio de un desenrollado manual o mecánicamente, dejando un traslape de 10 centímetros entre ellos para que estos sean unidos por termofusión.

Una vez colocada y anclada la geomembrana, se colocará otra capa de arena de banco de 30 centímetros de espesor utilizando personal manual o maquinaria sobre neumáticos para evita que se dañe la membrana (Figura 10.37) consiguiendo con esto la cobertura del sitio de disposición final.

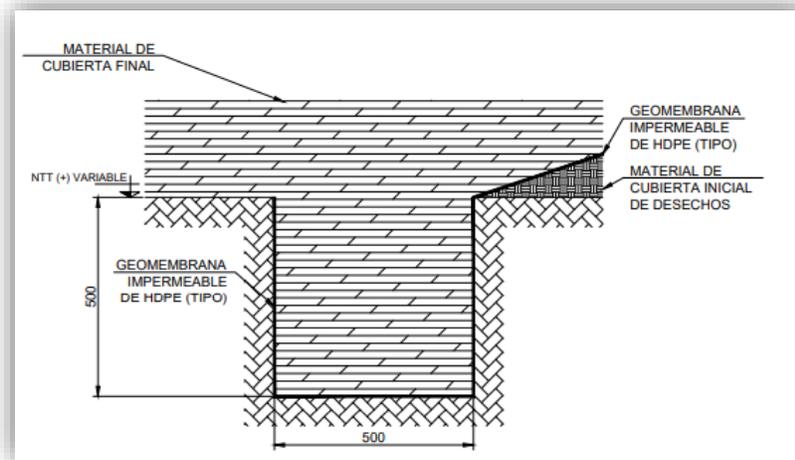
Figura 10.37 Conformación de la cobertura final del sitio de disposición abandonado.



Anclaje de la Geomembrana.

La geomembrana será anclada y fijada a la superficie del terreno mediante la excavación de una zanja perimetral a la zona a impermeabilizar con una profundidad de 50 cm x 50 cm y que se realizará por todo el contorno por donde se colocará la membrana (Figura 10.37).

Figura 10.37 Anclaje de Geomembranas.



La membrana será colocada en uno de sus extremos en la zanja de anclaje, luego de lo cual se rellenará esta con el material que será utilizado para la cobertura final, el cual evitará la inestabilidad de la misma.

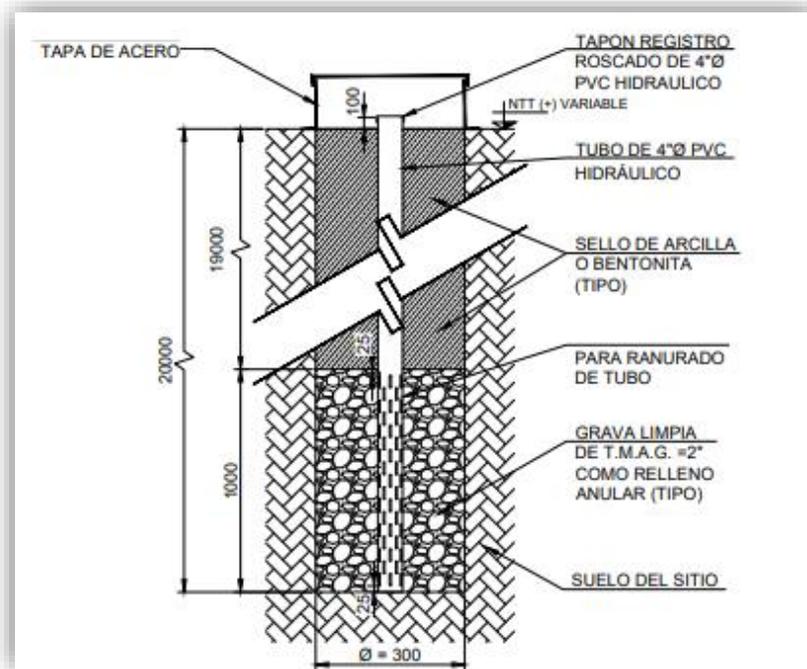
Construcción de sistemas de Control Ambiental.

El sistema de control ambiental está conformado por los mecanismos de monitoreo del agua subterránea, lixiviados, biogás y de los asentamientos diferenciales que afectan la estabilidad de los taludes.

Sistemas de monitoreo de agua subterránea

El sistema de monitoreo de agua subterránea será mediante la excavación un pozo de 30 centímetros de diámetro y dos metros de profundidad donde se colocará un tubo de PVC hidráulico de 4 pulgadas de diámetro ranurado en su extremo inferior hasta la altura de un metro al tres bolillo, con un relleno de grava limpia de 2 pulgadas de diámetro en la base del pozo con un metro de altura, sobre la cual se colocará un sello de bentonita o de arcilla y una tapa de acero o del mismo material del tubo (Figura 10.38).

Figura 10.38 Pozo de Monitoreo de Aguas Subterráneas



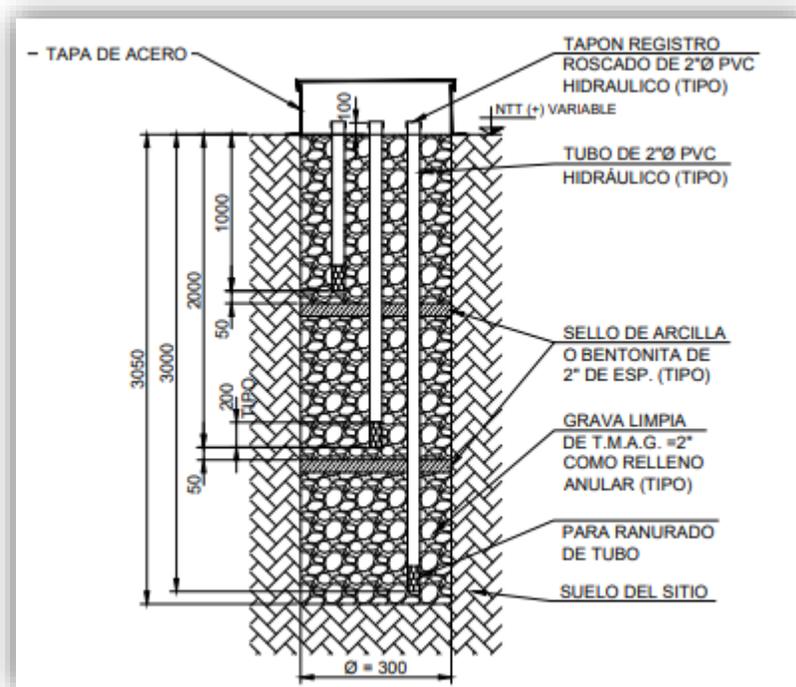
Cabe mencionar que este sistema consta de un solo pozo el cual se construirá en la parta más baja del terreno donde se localiza el sitio de disposición final no

controlado abandonado, en la parte piezométrica en dirección de la escorrentía subterránea.

Sistemas de monitoreo de biogás

El monitoreo de biogás se realizará con la construcción de una serie de pozos de 30 centímetros de diámetro con tres metros con cinco centímetros de profundidad donde se colocarán tres tubos de PVC hidráulico de 2 pulgadas de diámetro, de uno, dos y tres metros de largo con un pequeño ranurado en la parte inferior de los tres y colocados sobre un sello de arena, arcilla o bentonita de 2 pulgadas de espesor y relleno con grava hasta dejar una altura libre de diez centímetros en la parte superior de los tubos donde se colocará una tapa roscable de acero o del mismo material de la tubería (Figura 10.39)

Figura 10.39 Pozos de monitoreo de Biogás

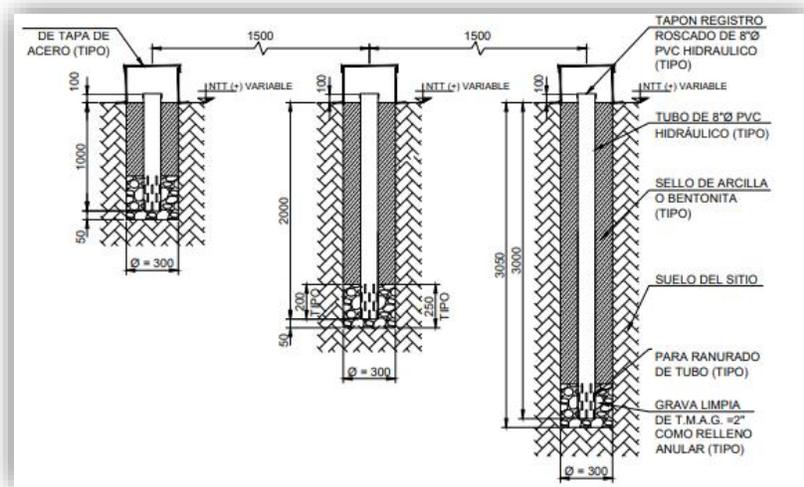


Se recomienda la construcción de un pozo de biogás por cada cuatro hectáreas de sitio clausurado.

Sistema de monitoreo de lixiviados

Este constará de tres pozos de monitoreo de 30 centímetros con profundidades de uno, dos y tres metros en donde se colocará en cada uno un tubo de PVC hidráulico, ranurado al trs bolillo con la misma longitud de los pozos con un sello de grava de 20 centímetros en la parte inferior de cada pozo, los cuales se rellenarán con una arena, arcilla o bentonita a fin de rodear los tubos y estos estarán protegidos con una tapa de acero o de PVC roscada en la parte superficial (Figura 10.40).

Figura 10.40 Sistema de Monitoreo de Lixiviados



Sistema de monitoreo de asentamientos diferenciales y estabilidad de taludes

Para el monitoreo de los asentamientos diferenciales se construirán estructuras de cemento de 30 centímetros por treinta centímetros a cada 100 metros, con georeferenciación y numeración a fin de verificar cada año si existe movimiento en el talud por el acomodo de los residuos.

Colocación de suelo orgánico (tierra orgánica) sobre la cubierta del sitio saneado.

Para el cierre definitivo del sitio de disposición final no controlado abandonado y para el uso eventual que se le dé al mismo se preparará el mismo mediante una cubierta final de suelo orgánico que se colocará sobre la capa de cobertura y que será soporte para la reforestación o empastado del área.

Capa de Soporte

La capa de soporte o capa de tierra común se colocará en dos etapas con un espesor de 20 centímetros en la primera etapa y de 30 centímetros en la segunda etapa para un total de 50 centímetros con un intervalo de un mes entre ambas con la finalidad de que esta se estabilice y no se produzcan asentamientos, esta capa debe tener una inclinación del 3% para permitir el flujo del agua de lluvia hacia el drenaje del sitio clausurado

Capa impermeable (Geotextil)

Una vez terminada la capa de soporte se colocará una malla de geotextil no tejido de fibras o filamentos de polipropileno de 1 a 1.5 cm de espesor, el cual servirá para reforzar los taludes conformados para mejorar su estabilidad, este procedimiento se desarrollará mediante el desenrollado de los mismos desde la parte superior del talud, impermeabilizando todo el sitio hasta una distancia no menor a un metro del borde del talud.

Capa de Tierra Vegetal

Se colocará sobre el geotextil una capa de tierra vegetal en dos etapas, una de 50 centímetros enriquecida con composta o humus y posteriormente una de 30 centímetros, la cual será extendida y compactada sobre la capa impermeable.

Colocación de cubierta vegetal. (Pasto y especies vegetales).

Se realizará la siembra de especies herbáceas sobre la capa de suelo orgánico, las cuales deben de ser nativas, con poca raíz y que tengan un crecimiento acelerado, pudiendo ser pasto o zacate nativo de México como el *Paspalum Notatum*, el cual se adquiere de viveros especializados en secciones de un metro por un metro y se coloca directamente en el sitio sobre los taludes.

c) Etapa de Post Clausura

Los programas de monitoreo que se deben de realizar a la cubierta para el caso de asentamientos y de aguas superficiales, lixiviados y biogás deben de planearse

para que tengan una duración de 20 años tal como lo marca la NOM-083-SEMARNAT-2003, por lo que se desarrollarán de la siguiente manera:

Mantenimiento de cubierta e instalaciones de control.

El mantenimiento de la cubierta y de las instalaciones de control es un proceso cotidiano que se debe fundamentalmente a la acción del ambiente sobre el sitio de disposición final, ya sea por condiciones climática o geotectónicas, las principales acciones que se deben de incluir son la detección y reparación de alteraciones tales como:

Depresiones.

Para la reparación de las depresiones se rastrilla el área afectada hasta una profundidad de 10 centímetros, luego de lo cual se le coloca una cubierta en capas de no más de 40 centímetros hasta alcanzar el nivel del sitio conformado, se humedece el suelo y se compacta ligeramente con un apisonador manual.

Grietas.

La reparación de las grietas es excavando de cada lado de la misma aproximadamente 20 centímetros por lado y la profundidad que tenga la misma, posteriormente se humedecerá el área y se colocará material de cobertura hasta alcanzar el nivel de conformación y se procederá a compactar a mano con un pizón manual hasta llegar a la superficie original.

Programa de Monitoreo ambiental.

El programa de monitoreo debe de considerar los procesos periódicos y los procesos continuos, los cuales dependerán de las condiciones específicas del sitio clausurado y del objetivo del mismo, los cuales se calendarizarán por cada uno de los sistemas diseñados.

Monitoreo de las aguas subterráneas.

El monitoreo del agua subterránea se debe de calendarizar y programar al menos una vez al mes para colectar muestras y ser analizadas en laboratorios acreditados ante la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA), solicitando que se evalúen los parámetros que marca la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, entre los cuales se encuentran:

- pH
- Conductividad eléctrica o sólidos disueltos totales
- DBO o DQO
- Alcalinidad total
- Dureza total

Monitoreo del lixiviado:

Para el muestreo de lixiviados se utilizará el método para aguas residuales establecido en la norma NMX-AA-003-1980 con una frecuencia de dos veces al año y solicitando los parámetros que se establecen en la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021 entre los cuales se pueden mencionar:

- pH.
- Metales Pesados.
- Conductividad.
- Nitratos y Nitritos.
- DQO y DBO
- Coliformes.

Monitoreo de Biogás

Las muestras se tomarán cada semana mediante la ayuda de una bomba de vacío y almacenadas en globos metalizados para el análisis en el laboratorio de los siguientes gases:

- Metano.
- Dióxido de Carbono.
- Monóxido de Carbono.
- Nitrógeno.
- Hidrógeno.
- Ácido Sulfhídrico.

Además, es recomendable medir los niveles de explosividad y temperatura.

11. DISCUSIÓN.

El incremento en la generación de los R.S.U en la Región Sotavento del Estado de Veracruz, México presenta variaciones significativas dependiendo del grado de urbanización, los municipios de Veracruz, Boca del Río y Medellín forman en su conjunto la zona metropolitana más poblada del estado de Veracruz (SEDATU, 2015) por el aumento de la población, la rápida urbanización, progreso económico y el incremento en el nivel de vida se ha acelerado la generación de desechos (Abdel-Shafy y Mansour, 2018), Tlalixcoyan si bien no se encuentra en la corona urbana de la Ciudad de Veracruz, ha logrado eficientizar su sistema de recolección, dada la mejora de los servicios de Limpia.

Para los municipios de Paso de Ovejas, Cotaxtla y Puente Nacional los decrementos en la generación de residuos, se debe principalmente a los problemas que presentan en sus sistemas de limpia, ya que son los municipios con el mayor número de comunidades rurales, con una mala planificación en la recolección (Hazra y Goel, 2009) un número insuficiente de vehículos de recolección y con caminos en mal estado (Henry et al., 2006).

Jamapa, La Antigua, Manlio Fabio Altamirano, Soledad de Doblado y Úrsulo Galván son municipios periféricos a la Ciudad de Veracruz, presentan un leve incremento en la disposición de Residuos Sólidos Urbanos, y se debe a que cuentan como muchas comunidades rurales con recursos financieros insuficientes (Pokhrel y Viraraghavan, 2005). tienen sitios de disposición final no adecuados los cuales no cuentan con mecanismos que limiten la contaminación ambiental

Es importante mencionar que no se cuenta con información sobre la concentración de los principales contaminantes presentes en los lixiviados, ni su evolución anual, salvo para el caso del Basurero Municipal de Veracruz y el Guayabo en Medellín de Bravo por parte del Instituto Tecnológico de Veracruz y del Instituto Tecnológico de Boca del Río respectivamente, además de que el grado de impacto es diferenciado para el Tiradero de Veracruz, toda vez de que fue un relleno sanitario y que cuenta casi en la totalidad de su extensión de membrana plástica y que la emanación de lixiviados está direccionada y focalizada (Susunaga y Estévez, 2018)

Al tener diferentes tipos de manejo y alturas los sitios de disposición final no controlados abandonados, los valores del factor de corrección de metano (MCF) tienen los tres diferentes rangos propuestos para el modelo mexicano de Biogás 2.0 (Aguilar-Virgen et al., 2014), el Relleno Sanitario clausurado del Municipio de Veracruz tiene el más alto valor del factor de corrección de metano que es comparable con los de otras ciudades costeras como Acapulco en el estado de Guerrero (Salmerón-Gallardo et al., 2017), como se puede observar la k ponderada es más alta debido a la humedad elevada presente en los residuos de la región comparados con Mexicali (0.0307) y Tijuana (0.0584) en la región Noreste del País con clima cálido y seco (Aguilar-Virgen et al., 2014) y además de que potencial de generación de metano (L_0) es más bajo en comparación de lo propuesto para la región sureste propuesto por el mismo modelo (Aguilar-Virgen et al., 2014), ahora bien, si se comparan las curvas de generación con otros modelos podemos apreciar que este es muy similar a los desarrollados en Colombia (Andrade et al., 2018).

También es importante mencionar que el nivel de impacto hacia el ambiente de cada uno de los sitios de disposición final es diferente, toda vez de que algunos fueron utilizados por poco tiempo y que se originaron en municipio rurales con una

baja generación de residuos, lo que permitió distinguir a algunos con un nivel irrelevante hasta un nivel crítico.

Ahora bien, si se comparan los procedimientos que se llevaron a cabo por las diversas autoridades como el Gobierno del estado de Yucatán con el programa de saneamiento y rehabilitación de los sitios de disposición final de RSU en los municipios ubicados en la Reserva Estatal Geohidrológica “Anillo de Cenotes” (SDS Yucatán, 2019 a) y el plan de cierre, rehabilitación y abandono del Relleno Sanitario “Los Laureles” en el municipio de Tonalá en Jalisco (SEMADET, 2020) y el que se propone en este estudio, los dos primeros no cumplirían a cabalidad con lo que establece la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAR-2003 toda vez de que son mecanismos muy someros para el primer caso y con falta de capacidad técnica en el segundo.

12. CONCLUSIONES.

El incremento de la población, los cambios en los hábitos de consumo y el desarrollo económico de la Región Sotavento del Estado de Veracruz ha provocado un aumento en la generación de RSU, lo que trae consigo la saturación de los sitios de disposición final de residuos, que en su mayor parte son no controlados, con ausencia de instalaciones adecuadas por lo que representan una amenaza potencial para la calidad de vida dada su generación de contaminantes que afectan el aire, el agua, el suelo y a la naturaleza; es por esto que la gestión de los residuos debe ser una prioridad para las autoridades municipales, las cuales por ley son las responsables de la disposición de los mismos.

Si bien existen algunos intentos de los tres órganos de gobierno para paliar la falta de Sitios de Disposición Final adecuados, esto se podría subsanar con mecanismos de transferencia hacia el único Relleno Sanitario en operación que se localiza en la comunidad de El Guayabo en el municipio de Medellín de Bravo o con la puesta en marcha del que ya se encuentra construido en Loma Iguana en el Municipio de La Antigua y servir a los municipios al norte de la región como La Antigua, Úrsulo Galván e incluso Puente Nacional.

En el caso de los sitios abandonados en los municipios de La Antigua, Manlio Fabio Altamirano, Medellín de Bravo y Tlaxiaco y (Chichicastle, José Cardel, La Plataforma, El Guayabo y Mata Verde) estos no han tenido procesos de rehabilitación como marca la Ley Federal de Responsabilidad Ambiental, que en su artículo 10 establece que Toda persona física o moral que con su acción u omisión ocasione directa o indirectamente un daño al ambiente, será responsable y estará

obligada a la reparación de los daños. En el caso particular del Basurero de Boca del Río, es importante que el Gobierno del Estado o el Ayuntamiento hagan una intervención administrativa sobre el uso de suelo para evitar que siga el asentamiento humano sobre este e iniciar el procedimiento de saneamiento del lugar. En cuanto a la Clausura del Relleno Sanitario de la Ciudad de Veracruz, se debe de hacer un esfuerzo entre las diferentes autoridades para su cierre adecuado, es imperativo contar con un mecanismo adecuado de Rehabilitación de estos Sitios Abandonados de Disposición Final en el que intervengas las mejores prácticas y técnicas de Saneamiento.

La evaluación del paisaje colindante y de los usos de suelo en los alrededores son fundamentales para analizar las características predominantes de la clausura de los sitios de disposición final abandonados, sobre todo si el contexto es agrícola o urbano, ya que esto permitirá ajustar el diseño del proceso de la clausura para establecer un uso de suelo específico, sobre todo el análisis de los componentes ambientales que serán involucrados en el proyecto.

Es importante mencionar que, si bien el proceso de clausura de los sitios de disposición final no controlados abandonados es oneroso, los costos económicos no se comparan con los beneficios ambientales y a la salud de las personas de los municipios de la región y además permitirá una mejora en la calidad de vida y del mejoramiento del ambiente, ya que se podría controlar la emisión de contaminantes que perjudican al entorno.

13. REFERENCIAS

Abdel-Shafy H., Mansour M (2018), Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization, Egyptian Journal of Petroleum, 27 (4) 1275-1290 <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2018.07.003>

Agbeshie A., Adjei R., Anokye J., Banunle A., (2020) Municipal waste dumpsite: Impact on soil properties and heavy metal concentrations, Sunyani, Ghana, Scientific African, Volume 8. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00390>

Aguilar-Virgen Q., Ojeda-Benítez S., Taboada-González P., Quintero-Núñez M. (2012). Estimación de las constantes k y L0 de la tasa de generación de biogás en sitios de disposición final en Baja California, México. Rev. Int. Contam. Ambie. 28 Sup. (1) 43-49

Aguilar-Virgen Q., Taboada-González P., Ojeda-Benítez S. (2014) Analysis of the feasibility of the recovery of landfill gas: a case study of Mexico, Journal of Cleaner Production, Volume 79, Pages 53-60, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.025>.

Aguirre R. (2016). Prevén dispendio millonario para retirar concesión del relleno sanitario del Puerto a Proactiva. La Jornada Veracruz. Recuperado el 15 de febrero del 2020 de http://www.jornadaveracruz.com.mx/Post.aspx?id=160410_184002_526

Andrade A., Tibaquirá J., Restrepo A. (2018). Estimación de biogás de relleno sanitario, caso de estudio: Colombia. Entre ciencia e ingeniería. 12. 40. <https://doi.org/10.31908/19098367.3701>.

Arán M. (2014) Clausura del vertedero municipal de Venado Tuerto, Ingeniería Civil, Facultad Regional de Venado Tuerto, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina. Recuperado el 23 de octubre del 2022 de file:///C:/Users/susun/Downloads/UTN_FRVT_PFC_IC046.pdf

Artuso A., Cossu E., Stegmann R. (2018). Afteruse of Landfills. Solid Waste Landfilling <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407721-8.00044-9>.

Ayaim M., Fei-Baffoe B., Sulemana A., Miezah K., Adams F., (2019). Potential sites for landfill development in a developing country: A case study of Ga South Municipality, Ghana. Heliyon, Volume 5, Issue 10, e02537. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02537>

AVC (2022), Controlado al 100% incendio en ex basurero de Veracruz: PC, AVC Noticias del 22 de Febrero del 2022, recuperado el 22 de octubre del 2022 de <https://www.avcnoticias.com.mx/resumen2.php?idnota=315932>

Barranco R. (2017) Alcaldía de Tlaxicoyan usa predio de comunidad como basurero al aire libre, Al Calor Político, Recuperado el 24 de Febrero del 2020 de <https://www.alcalorpolitico.com/informacion/alcaldia-de-tlaxicoyan-usa-predio-de-comunidad-como-basurero-al-aire-libre-245110.html#.XIR3JqqzblU>

Bernaché G. (2015) La gestión de los residuos sólidos: un reto para los gobiernos locales. Sociedad y Ambiente, año 3, vol. 1, núm. 7, marzo-junio, 72-101

Calva-Alejo C., Rojas-Caldelas R. (2014). Diagnóstico de la Gestión de Residuos Sólidos Urbanos en el Municipio de Mexicali, México: Retos para el Logro de una Planeación Sustentable. *Información tecnológica*, 25(3), 59-72

Chacón B., Pinilla L. (2018). Propuesta de una guía metodológica para la realización de la evaluación de impacto ambiental aplicable en ecoparque sabana (Jaime Duque). Consultado el 31 de Diciembre del 2021 de https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/1097

Chakrabarti M., Dubey A. (2016) Remediation Techniques, for Open Dump Sites, used for the Disposal of Municipal Solid Waste in India. *Journal of Basic and Applied Engineering Research*, Volume 2, Number 17; pp. 1510-1513

COCEF-BECC (2016) Proyecto Ejecutivo de la Clausura del Tiradero en el Municipio de Sabinas Hidalgo, Nuevo León, Comisión de Cooperación Fronteriza, recuperado el 20 de octubre del 2022 de http://virtual.cocef.org/Discos_documentos_consultores/Disco_264/Sabinas/Proyecto_ejecutivo_clausura/memoria_descriptiva/Cap06_cl_ma_sab_nl_VI.doc

CONAGUA (2021) Información de Estaciones Climatológicas, consultado el 23 de junio del 2021 de <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>

CONAM/CEPIS/OPS (2004) Guía técnica para la clausura y conversión de botaderos de residuos sólidos, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Organización Panamericana de la Salud, Lima Perú

Conesa Fernández - Vitora V., Conesa Ripol V., Conesa Ripoll L., Estevan Bolea M. (2010). Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental: Conesa Fernández -Vitoria, Vicente (4a. ed.). Madrid: Mundi-Prensa.

Cruz R., Orta T., Sánchez G., Rojas-Valencia. M. (2002). "Metodología propuesta para la clausura de un Tiradero a Cielo Abierto. Caso de estudio." XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Cancún, México, 27 al 31 de octubre, pp 1-8. Recuperado el 18 de Julio del 2019 de <http://www.ingenieroambiental.com/4014/iv-015.pdf>

De Wet A. (2016). Discovering and Characterizing Abandoned Waste Disposal Sites Using LIDAR and Aerial Photography. Environmental & Engineering Geoscience, 22(2), 113–130. <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.22.2.113>

DOF (1996) Norma Oficial Mexicana NOM-083-ECOL-1996, Que establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de los residuos sólidos municipales. Diario Oficial de la Federación del 25 de Noviembre de 1996.

DOF (1999), Decreto por el que se declara reformado y adicionado el artículo 115 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (1999), Diario Oficial de la Federación del 23 de diciembre de 1999.

DOF (2003) Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos Diario Oficial de la Federación de 8 de octubre de 2003.

DOF (2004) Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT 2003, 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. Diario Oficial de la Federación 20 de octubre de 2004

DOF (2021) PROYECTO de Modificación de la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, 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. Diario Oficial de la Federación del 10 de mayo del 2021.

Escamilla P. (2019). Eficiencia y confiabilidad de modelos de estimación de biogás en rellenos sanitarios. La Granja. Revista de Ciencias de la Vida, 29(1),32-44 ISSN: 1390-3799.: <https://doi.org/10.17163/lgr.n29.2019.03>

FEAM (2010), Caderno técnico de reabilitação de áreas degradadas por resíduos sólidos urbanos, Fundação Estadual do Meio Ambiente, Governo de Minas Gerais, Brazil consultado el 24 de Mayo del 2021 de http://www.feam.br/images/stories/arquivos/minassemlixoes/cadernotecnico2010/areas_degradadas.pdf

Ferronato N., Torretta V., (2019) Waste Mismanagement in Developing Countries: A Review of Global Issues. Int. J. Environ. Res. Public Health 16, 1060 <https://doi.org/10.3390/ijerph16061060>

Gala A. (2019) Enviro-Economic Evaluation of Dumpsite Rehabilitation Solutions in Developing Countries. In: Ameen H., Sorour T. (eds) Sustainability Issues in Environmental Geotechnics. GeoMEast 2018. Sustainable Civil Infrastructures. Springer, Cham

García (2018) Tiradero a Cielo Abierto supuestamente fue clausurado; ahora arde. Diario de Xalapa del 3 de Marzo del 2018, recuperado el 22 de marzo del 2022 de <https://www.diariodexalapa.com.mx/local/tiradero-a-cielo-abierto-supuestamente-fue-clausurado-ahora-arde-1039308.html>

Gaudie-Ley M., Junior R., Mendonça H., Lioi Nascentes A., Silva L. (2021). Comparison between Prediction Models and Monitored Data on Leachate Generation from a Sanitary Landfill in the Metropolitan Region of Rio de Janeiro, Brazil. 5. 58. <https://doi.org/10.15406/ijh.2021.05.00266>.

Hanson J., Yesiller N., Stockhausen S., Wong W. (2010). Compaction Characteristics of Municipal Solid Waste. Civil and Environmental Engineering. 136. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000324](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000324).

Hazra T., Goel S. (2009) Solid waste management in Kolkata, India: Practices and challenges. J. Waste Manage 29 470-478 <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.01.023>

Henry R., Yongsheng Z., Jun D. (2006) Municipal solid waste management challenges in developing countries – Kenyan case study, J. Waste Manage 26 92-100 <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.03.007>

HidroAr (2015) Metodología para el cálculo de las matrices ambientales, Ministerio de Ambiente y Control del Desarrollo Sustentable, Provincia de Chubut, Argentina. Recuperado el 14 de abril del 2022 de <http://www.ambiente.chubut.gov.ar/wp-content/uploads/2015/01/Metodolog%C3%ADa-para-el-Calculo-de-las-Matrices-Ambientales.pdf>

Inclán L. (2019) Relleno Sanitario de Medellín recibe basura de Veracruz, Meganoticias, recuperado el 20 de octubre del 2021 de <https://www.facebook.com/elsemanariodelacuena/posts/1265584623613172>

INEGI (2020) Sistema de Consulta de Estadísticas Ambientales. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Consultado el 6 de febrero del 2020 de <http://mapserver.inegi.org.mx/ambiental/map/indexV3FFM.htm>.

INEGI (2021a) Panorama Sociodemográfico de Veracruz de Ignacio de la Llave, Censo de Población y Vivienda 2020, consultado el 30 de abril del 2021 de https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvini/egi/productos/nueva_estruc/702825198039.pdf

INEGI (2021b) Climatología, consultado el 13 de Junio del 2021 de <https://sinegi.page.link/ueiu>

Irfan, M., Houdayer, B., Shah, H. et al. GIS-based investigation of historic landfill sites in the coastal zones of Wales (UK). Euro-Mediterr J Environ Integr 4, 26 (2019). <https://doi.org/10.1007/s41207-019-0116-y>

Jordan C.; Lausset C.; Cherubini F. (2016) Life-Cycle Assessment of a Biogas Power Plant with Application of Different Climate Metrics and Inclusion of Near-Term Climate Forcers. J. Environ. Manage. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.10.030>.

Lara P. (2010) Basura, amenaza latente en Cardel. Cambio Digital. Recuperado el 16 de febrero del 2020 de <https://cambiodigital.com.mx/mosno.php?nota=47118>

Lezak R., Krzystek L., Ledakowicz S. (2015). Degradation of municipal solid waste in simulated landfill bioreactors under aerobic conditions. *Waste management (New York, N.Y.)*, 43, 293–299. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.017>

Lobo A., Szantó M., Llamas S., (2016) Cierre, sellado y re inserción de antiguos vertederos. experiencias en Iberoamérica, *Rev. Int. Contam. Ambie.* 32 (Especial Residuos Sólidos) 123-139.

López S., Sámano H., (1996). Clausura del relleno sanitario de Prados de la Montaña: Primera Experiencia Mexicana Apegada a una Rigurosa Normatividad. *Memorias del XXV Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Volumen III, Tratamiento y Disposición de Residuos Sólidos, Celanese Mexicana, México, D.F,* pp 1-9.

López-Vega M, Ramírez-González S., Santos-Herrero R. (2021). Predicción de la generación de lixiviados en rellenos sanitarios de Residuos Sólidos Urbanos en la ciudad de Santa Clara Cuba. *Tecnología Química*, 41(1), 47-59. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852021000100047&lng=es&tlng=es.

López-Portillo J. Gómez L., Lara-Domínguez A., Ávila-Ángeles A., Vázquez-Lule A. (2009). Caracterización del sitio de manglar Arroyo Moreno, en Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). *Sitios de manglar con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica. CONABIO, México, D.F*

Madrigal J. (2019) PMA clausura de forma definitiva basurero a cielo abierto de la ciudad de Veracruz. Radio Televisión de Veracruz RTV, Recuperado el 15 de

febrero del 2020 de <http://www.masnoticias.mx/pma-clausura-de-forma-definitiva-basurero-a-cielo-abierto-de-la-ciudad-de-veracruz/>

MINAM (2019), Taller de capacitación y asistencia técnica en la formulación de proyectos de inversión pública ambientales. Ministerio del Ambiente, Perú, recuperado el 25 de octubre del 2022 de <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/351757/1.2. DGRS - Criterios tecnico AREAS DEGRADADAS 2019.pdf>

MFE (2001) A Guide for the Management of Closing and Closed Landfills in New Zealand, Ministry for the Environment, Wellington, New Zealand, recuperado el 28 de octubre del 2022 de https://environment.govt.nz/assets/Publications/Files/closed-landfills-guide-may01_0.pdf

Méndez O., (2010) Sellado y Clausura del Vertedero de R.S.U. de Fuenlabrada de los Montes para la Recuperación de su Emplazamiento, Master Profesional en Ingeniería y Gestión Medioambiental, Escuela de Organización Industrial, Ministerio de Industria, Comercio y Turismo, España

Mekuria T., Muralitharan J., Abdulkadir Y., (2019). GIS and Remote Sensing Based Suitable Site Selection for Solid Waste Disposal: A Case Study of Gondar Town, North West Ethiopia. 8. 38.

MoE (2021) Guidelines for Safe Closure and Rehabilitation of Municipal Solid Waste Dumpsites in Sri Lanka, Ministry of Environment (MoE), Sri Lanka, recuperado el 25 de octubre del 2022 de <https://www.unep.org/ietc/resources/toolkits-manuals-and-guides/guidelines-safe-closure-and-rehabilitation-municipal-solid>

Morita A., Pelinson, N., Wendland, E. (2020a). Persistent impacts of an abandoned non-sanitary landfill in its surroundings. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(7). <https://doi:10.1007/s10661-020-08451-7>

Morita A.; Pelinson, N.; Elis V.; Wendland E. (2020b) Long-term geophysical monitoring of an abandoned dumpsite area in a Guarani Aquifer recharge zone. *Journal of Contaminant Hydrology*, Volume 230, 103623. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2020.103623>

Nagendran R., Selvam A., Kurian J., Chiemchaisri. (2006) Phytoremediation and rehabilitation of municipal solid waste landfills and dumpsites: A brief review, *Waste Management*, Volume 26, Issue 12, Pages 1357-1369, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.05.003>

Njoku P., Edokpayi J., Odiyo, J. (2019). Health and Environmental Risks of Residents Living Close to a Landfill: A Case Study of Thohoyandou Landfill, Limpopo Province, South Africa. *International journal of environmental research and public health*, 16(12), 2125. <https://doi.org/10.3390/ijerph16122125>

Paolini V., Petracchini F., Segreto M., Tomassetti L., Naja N., Cecinato A. (2018) Environmental impact of biogas: A short review of current knowledge, *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 53:10, 899-906, <https://doi.org/10.1080/10934529.2018.1459076>

PEPGIRS (2014), Programa Estatal para la Prevención y la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial del Estado de Veracruz (PEPGIR-Ver). Gobierno del Estado de Veracruz, consultado el 16 de junio del 2021 de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/187445/Veracruz.pdf>

Pérez I. (2020) Secretario del Ayuntamiento de Manlio Fabio Altamirano, 2018-2021 Comunicación Personal.

Pokhrel D., Viraraghavan T. (2005) Municipal solid waste management in Nepal: practices and challenges. *J. Waste Manage* 25 555-562
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.01.020>

Resta B., Dotti, S. (2015). Environmental impact assessment methods for textiles and clothing. *Handbook of Life Cycle Assessment (LCA) of Textiles and Clothing*, 149–191. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100169-1.00008-3>

Rodic-Wiersma, L., Sanjay G., (2012). Closure and Rehabilitation of Waste Dumpsites in Indian Megacities Delhi and Mumbai. *World Solid Waste Congress Florence Italy*

Rojas-Valencia M., Sahagún-Aragón C., (2012) Sitio de Disposición Final No Controlado, *Ciencia y Desarrollo* Mayo-Junio 2012.

Salmerón-Gallardo Y., Cabrera-Cruz R., Juárez-López A., Sampedro-Rosas M., Rosas-Acevedo J., Rolón-Aguilar J., Valera-Pérez M., (2017) Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en Vertederos de Residuos Sólidos Urbanos Parte B: Mitigación de Biogás en Acapulco, México. *RelbCi*, Abril 38-49 consultado el 4 de Agosto del 2021 de <http://www.reibci.org/publicados/2017/abr/2200107.pdf>

Sasaki S.; Araki T. (2014) Estimating the possible range of recycling rates achieved by dump waste pickers: The case of Bantar Gebang in Indonesia. *Waste Manag. Res.*, 32, 474–481 <http://doi:10.1177/0734242X14535651>

SDS Yucatán (2019 a) Saneamiento y Rehabilitación de sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos en los municipios ubicados en la reserva estatal geohidrológica anillo de cenotes., Secretaría de Desarrollo Sustentable, Gobierno del Estado de Yucatán consultado el 30 de diciembre del 2021 de http://sds.yucatan.gob.mx/residuos-solidos/documentos/sanamiento_sdfrsu_anillocenotes.pdf

SDS Yucatán (2019 b) Saneamiento y Rehabilitación del sitio de disposición final del municipio de Homún, Secretaría de Desarrollo Sustentable, Gobierno del Estado de Yucatán consultado el 30 de diciembre del 2021 de https://sds.yucatan.gob.mx/residuos-solidos/documentos/sanamiento_sdfrsu_homun.pdf

SDSMA (2006). Programa de Manejo del Área Natural Protegida “Arroyo Moreno” Boca del Río-Medellín de Bravo, Ver. Serie: “Protejamos Nuestro Medio Ambiente” Registro Estatal de Espacios Naturales Protegidos. Secretaría de Desarrollo Social y Medio Ambiente. Gobierno del Estado de Veracruz.

SEDATU (2015), Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2015, Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano, Consejo Nacional de Población, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Primera edición: febrero 2018, México

SEDESOL (2005) Manual para la rehabilitación y clausura de tiraderos a cielo abierto, Secretaría de Desarrollo Social consultado el 23 de mayo del 2021 de <https://es.scribd.com/document/192384336/Manual-Para-La-Rehabilitacion-y-Clausura-de-Tiraderos-a-Cielo-Abierto>

SEDESOL (2011), Atlas de Riesgo del Municipio de La Antigua, Veracruz, Consultado el 7 de Febrero de 2020 http://rmgir.proyectomesoamerica.org/PDFMunicipales/2011/vr_30016_AR_LA_A NTIGUA.pdf

SEFIPLAN (2011) Estudios regionales para la planeación región Sotavento, Gobierno del Estado de Veracruz, consultado el 23 de agosto del 2020 de <http://www.veracruz.gob.mx/wp-content/uploads/sites/2/2012/01/tf07-er-07-sotavento-reg.pdf>

SEFIPLAN (2013) Programas Regionales Veracruzanos, Región Sotavento 2013-2016, Gobierno del Estado de Veracruz, consultado el 23 de agosto del 2020 de <http://www.veracruz.gob.mx/wp-content/uploads/sites/2/2014/04/tf07-pr-sotavento.pdf>.

SEFIPLAN-a (2019) Cuadernillos Municipales Edición 2019, Secretaria de Finanzas y Planeación, Gobierno del Estado de Veracruz. Recuperado el 7 de febrero del 2020 de <http://ceieg.veracruz.gob.mx/2019/05/09/cuadernillos-municipales-2019>

SEFIPLAN-b (2019) Cuadernillos Municipales Edición 2015, Secretaria de Finanzas y Planeación, Gobierno del Estado de Veracruz. Recuperado el 7 de febrero del 2020 de <http://ceieg.veracruz.gob.mx/2019/05/09/cuadernillos-municipales-2015>

SEMARNAT (2015) Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde. Edición 2015. SEMARNAT. México. Consultado el 17 de mayo del 2021 de

https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Informe15_completo.pdf

SEMARNAT (2005) Guía para la realización de planes de regularización conforme a la NOM-083-SEMARNAT-2003, SEMARNAT, recuperado el 23 de octubre del 2022 de

http://centro.paot.org.mx/documentos/semarnat/Guia_regularizacin_NOM_083.pdf

SEMARNAT (2017). Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial, Acciones y Programas, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Consultado el 23 de agosto del 2020 de <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/residuos-solidos-urbanos-rsu>

SEMARNAT (2018) Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde. Edición 2018. SEMARNAT. México. Consultado el 17 de mayo del 2021 de <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/index.html>

SEMARNAT (2019) Cero Residuos, Visión Nacional hacia una Gestión Sustentable, Secretaría del Medioambiente y Recursos Naturales, Gobierno de México, consultado el 1 de Diciembre del 2019 de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/435917/Vision_Nacional_Cero_Residuos_6_FEB_2019.pdf

SEMARNAT (2020) Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos. Secretaría del Medioambiente y Recursos Naturales, Gobierno de México consultado el 18 de octubre del 2021 de

<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/554385/DBGIR-15-mayo-2020.pdf>

Sillet A., Royer S., Coque Y., Bourgois J., Thomas O. (2015). Les lixiviats de décharges d'ordures ménagères Genèse, composition et traitements. Déchets, sciences et techniques. <http://doi:10.4267/dechets-sciences-techniques.1341>.

Susunaga-Miranda M.A., Estévez-Garrido B.M. (2018). Metales pesados en los lixiviados provenientes del basurero no controlado de la Ciudad de Veracruz. Revista Iberoamericana de Ciencias, 5, 164-171.

Susunaga-Miranda M., Ortiz Muñoz B., Castañeda Chávez M., Lango Reynos F., Hernández Berriel. (2022). Sitios de disposición final de residuos sólidos abandonados en la Región de Sotavento del estado de Veracruz, México, utilizando herramientas SIG. Enfoque UTE, 13(4). <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.853>

Tamrat, M., Muralitharan, J. and Yahya, A. (2019). GIS and Remote Sensing Based Suitable Site Selection for Solid Waste Disposal: A Case Study of Gondar Town, North West Ethiopia. J. Acad. Indus. Res. 8(2): 38-44. <https://doi.org/10.1080/19376812.2020.1770105>

Troncoso-Pantoja C., Amaya-Plasecencia A. (2016) Entrevista: guía práctica para la recolección de datos cualitativos en investigación de salud, Rev. Fac. Med. 2017 Vol. 65 No. 2: 329-32 : <http://dx.doi.org/10.15446/revfacmed.v65n2.60235>

U. S. EPA (1994), Design, Operation and Closure of Municipal Solid Waste. EPA/625/R-94/008, Office of Research and Development, Washington, D. C. O460.

Vian-Pérez J., Velasco-Pérez A., García-Herrera T. (2019) Residuos Sólidos Urbanos. Una problemática ambiental y oportunidad energética. CIENCIA UANL 95, 44-51

Yadav H., Kumar P., Singh V.P. (2019) Hazards from the Municipal Solid Waste Dumpsites: A Review. In: Singh H., Garg P., Kaur I. (eds) Proceedings of the 1st International Conference on Sustainable Waste Management through Design. ICSWMD 2018. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 21. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-02707-0_39

Zhang C.; Xu T.; Feng H.; Chen S. (2019) Greenhouse Gas Emissions from Landfills: A Review and Bibliometric Analysis. Sustainability, 11, 2282. <https://doi.org/10.3390/su11082282>

Zekkos D., Bray J. Kavazanjian E., Matasovic N., Rathje E., Riemer M., Stoko K. (2006). Unit Weight of Municipal Solid Waste. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering - J GEOTECH GEOENVIRON ENG. 132. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:10\(1250\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:10(1250)).

14 ANEXOS.