Instituto Tecnológico de Buenos Aires

Escuela de Postgrado

ANÁLISIS DEL EFECTO DEL TRATAMIENTO MECÁNICO BIOLÓGICO EN LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN LA ETAPA DE DISPOSICIÓN FINAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

ESTUDIO DE CASO PLANTA TMB-NORTE III

TESIS PRESENTADA

PARA EL CUMPLIMIENTO PARCIAL DE

LOS REQUERIMIENTOS PARA EL TITULO DE MAGISTER EN GESTIÓN AMBIENTAL

Tesista: Ignacio C. Marcolini
Ingeniero Industrial

Tutor: Estela M. Santalla
Ingeniero Químico Industrial
Mg. en Gestión y Auditorías Ambientales en Ingeniería y Tecnología Ambiental
Profesor Titular. Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería UNCPBA.

Director de Carrera: Ing. Julio Torti

Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Septiembre de 2017

ANÁLISIS DEL EFECTO DEL TRATAMIENTO MECÁNICO BIOLÓGICO EN LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN LA ETAPA DE DISPOSICIÓN FINAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

ESTUDIO DE CASO PLANTA TMB-NORTE III

ÍNDICE

1. RESUMEN 3

2. INTRODUCCIÓN 5

3. MARCO TEÓRICO 6

3.1. CAMBIO CLIMÁTICO 6

3.1.1. El Efecto invernadero 7

3.1.2. Gases de efecto invernadero (GEI) 10

3.1.3. Aspectos Institucionales del Cambio Climático 12

3.1.4. Historial de negociaciones a nivel global 14

3.1.5. Escenario Argentino en relación al Cambio Climático 20

3.1.6. Emisiones producto de los residuos sólidos urbanos 23

3.2. CEAMSE 24

3.2.1. Proyectos de mitigación de las emisiones de GEI en los rellenos sanitarios de CEAMSE 25

3.2.2. Tecnología de Tratamiento Mecánico Biológico 26

3.2.3. Planta TMB Norte III 27

4. OBJETIVO DEL PROYECTO 37

4.1. OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS DEL PROYECTO 37

5. METODOLOGÍA 39

6. ANÁLISIS DE LA FRACCIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS PUTRESCIBLES (FOP) 40

6.1. RESIDUOS PROCESADOS EN LA PLANTA TMB- NORTE III 40

6.1.1. Separación mecánica de la fracción orgánica en la Planta TMB Norte-III 41

6.2. TOMA DE MUESTRAS Y ANÁLISIS 43

6.2.1. Caracterización de la FOS 43

6.2.2. Estimación del tonelaje de la FOP 44

6.2.3. Análisis de las FOP y determinación del Potencial de Biometano 45

7. EMISIONES POTENCIALES DE GEI ASOCIADAS A LA FOP 47

7.1. COMPARACIÓN DE EMISIONES POTECIALES DE GEI DE LAS FOP 50

8. EMISIONES DE GEI ASOCIADAS A LA OPERACIÓN DE LA PLANTA TMB 50

8.1. ESTIMACIÓN DE EMISIONES DIRECTAS 51

8.2. ESTIMACIÓN DE EMISIONES INDIRECTAS 54

8.3. EMISIONES DE GEI ASOCIADAS A LA OPERACIÓN DE LA PLANTA TMB-NORTE III 56
9. BALANCE DE EMISIONES POTENCIALES DE GEI ENTRE ESCENARIOS 57
10. EMISIONES DÍNAMICAS DE GEI 57
10.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO Y ACLARACIONES 59
10.1.1. Suposiciones realizadas 61
10.1.2. Emisiones de GEI dinámicas - escenarios 62
11. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 63
12. CONCLUSIONES 65
12.1. LECCIONES APRENDIDAS Y APORTES: 67
13. REFERENCIAS 69
14. ANEXOS 72
14.1. ANEXO 1: DESARROLLO DE MODELIZACIÓN DÍNAMICA DE LAS EMISIONES DE GEI 72
14.1.1. Descripción del Modelo 72
14.1.2. Suposiciones realizadas 73
14.1.3. Determinación de los parámetros 74
14.1.4. Corrida del modelo 77
14.2. ANEXO 2: ENSAYOS 81

ANÁLISIS DEL EFECTO DEL TRATAMIENTO MECÁNICO BIOLÓGICO EN LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN LA ETAPA DE DISPOSICIÓN FINAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

ESTUDIO DE CASO PLANTA TMB-NORTE III

1. RESUMEN

La tecnología de Tratamiento Mecánico Biológico (TMB) combina la clasificación y proceso mecánico con el tratamiento biológico de la fracción orgánica de los residuos, surgiendo como una alternativa para reducir los impactos ambientales negativos asociados a la generación de gases de efecto invernadero en los sitios de disposición final. Si bien esta tecnología es reconocida a nivel mundial para el tratamiento de los residuos sólidos urbanos (RSU), su aplicación es aún incipiente en la Argentina, en donde su efecto sobre el potencial de producción de metano aún no ha sido analizado.

Teniendo en cuenta esta premisa, el objetivo de este trabajo fue desarrollar las bases para el estudio local del efecto de esta tecnología sobre las emisiones potenciales de GEI tomando como caso de estudio la Planta TMB-Norte III, la cual opera desde el año 2013 en uno de los Complejos Ambientales de la Coordinación Ecológica del Área Metropolitana de Buenos Aires (CEAMSE) y es la primera experiencia de aplicación de esta tecnología en la Argentina.

Esta Tesis estimó el efecto que produce el TMB aplicado en la Planta Norte III en las emisiones de gases de efecto invernadero en la etapa de disposición final, en comparación con los que producirían los RSU directamente dispuestos en los rellenos sanitarios, estudiando su comportamiento dinámico, y a la vez analizó el balance neto de emisiones entre los posibles ahorros en las emisiones de metano y las emisiones asociadas a la operación de la Planta. El análisis realizado sobre una muestra, indicó una disminución en la producción de metano del 18% en el sustrato sometido al tratamiento biológico, a diferencia del no tratado, y un ahorro de de 15,85% en las emisiones netas en una gestión en donde opere la Planta TMB-Norte, respecto a un

escenario en donde el residuo se disponga directamente en el relleno sanitario sin previa aplicación de este tratamiento.

Las muestras analizadas resultan insuficientes para hacer una evaluación de ésta tecnología y del proceso realizado en la Planta TMB-Norte III, sin embargo, el aporte de esta tesis cobra importancia desde el punto de vista que propone una metodología de análisis basada en la selección y aplicación de técnicas de ensayo estandarizadas y herramientas de cálculo presentadas por organismos idóneos en la temática, que podrá servir a próximos estudios complementarios, en donde se cuente con mayor número de muestras analizadas que permitan disminuir el grado de incertidumbre y generar nuevas conclusiones sobre este caso en particular u otros, aportando también información para la elaboración de inventarios nacionales de emisiones de GEI, y estudios de factibilidades técnicas de proyectos de captación de biogas, digestión anaeróbica y de aprovechamiento del biogás como una fuente de energía renovable.

2. INTRODUCCIÓN

El cambio climático se ha identificado como uno de los máximos retos que afrontan las naciones, los gobiernos, las industrias y los ciudadanos en las próximas décadas. Éste tiene implicaciones tanto para los humanos como para los sistemas naturales y puede originar cambios en el uso de recursos, la producción y la actividad económica. En respuesta a esta situación, la tendencia mundial observada es que se están desarrollando e implementando iniciativas internacionales, regionales, nacionales y locales para limitar las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera terrestre. Dichas iniciativas sobre GEI se basan en la cuantificación, el seguimiento, el informe y la verificación de emisiones y/o remociones de GEI.

A escala global, el sector de los residuos tiene una contribución relativamente pequeña a las emisiones de GEI, estimada entre un 3 % y un 5 % en 2004 [1]. En la Argentina el inventario realizado para la 3da Comunicación Nacional para la Mitigación del Cambio Climático, arroja un porcentaje de 5% para el año 2012 [2]. No obstante, el sector de los residuos, en la Argentina, se encuentra en una posición única para reducir las emisiones de GEI a partir de la transformación de materiales en nueva materia prima para la industria a través del reciclado, el tratamiento de la materia orgánica y el aprovechamiento energético de sus fracciones restantes.

La tecnología de Tratamiento Mecánico Biológico (TMB) combina la clasificación y proceso mecánico con el tratamiento biológico de la fracción orgánica de los residuos y surge como una alternativa para la valorización de los residuos sólidos urbanos (RSU) a través de la recuperación de materiales para su reutilización y reciclado, la reducción del volumen de los residuos enviados a rellenos sanitarios, y también se la considera como una tecnología adecuada para reducir impactos ambientales negativos tales como la generación de lixiviados y de gases de efecto invernadero generados en la etapa de disposición final [3].

Si bien esta tecnología es reconocida a nivel mundial para el tratamiento de RSU, su aplicación es aún incipiente en la Argentina, y en donde su efecto sobre el potencial de producción de metano aún no ha sido analizado.

Teniendo en cuenta esta premisa, surge el interés de aportar con esta Tesis de Maestría al análisis de esta tecnología, con la convicción de que se debe avanzar con la evaluación de los impactos en el medio ambiente de ciertas actividades, específicamente en lo que es la emisión de gases de efecto invernadero.

El presente trabajo analiza el efecto de esta tecnología sobre las emisiones potenciales de GEI tomando como caso de estudio la Planta TMB-Norte III, que opera desde el año 2013 en uno de los Complejos Ambientales de la Coordinación Ecológica del Área Metropolitana de Buenos Aires (CEAMSE) y es la primera experiencia de aplicación de esta tecnología en la Argentina.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Cambio Climático

El Artículo Nº1 de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) define al cambio climático como “un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables” [4].

El clima de la tierra ha variado muchas veces a lo largo de su historia, debido a cambios naturales que se han producido en el equilibrio entre la energía solar entrante y la reemitida hacia el espacio. Algunas de las causas naturales de esas variaciones son: las erupciones volcánicas, los cambios en la órbita de traslación de la tierra, las variaciones en la composición de la atmósfera [11].

Sin embargo, la temperatura media de la superficie terrestre ha aumentado en promedio unos 0,74 ºC desde 1906 hasta el 2005 [5] y existen evidencias científicas cada vez más contundentes, que demostrarían que la razón principal del aumento de

temperatura global, sería las emisiones antrópicas de los gases de efecto invernadero (GEI), que comenzaron a crecer en forma exponencial con el proceso de industrialización iniciado en el siglo pasado.

Actividades realizadas por el hombre que producen la combustión de cantidades cada vez mayores de petróleo y carbón, la tala de bosques y algunos métodos de explotación agrícola han aumentado el volumen de "gases de efecto invernadero". La mayoría de estos gases se producen naturalmente y son fundamentales para la vida en la Tierra; ya que impiden que parte de la radiación solar que llega a la tierra, regrese al espacio, y sin ellos la Tierra tendría una temperatura media global muy inferior a la actual. Pero cuando el volumen de estos gases aumenta debido a la acción antrópica, se produce un aumento de la temperatura del planeta y se modifica el clima, generando diferentes impactos asociados [11].

Las principales consecuencias de los cambios es el incremento de la temperatura producto del efecto invernadero son alteraciones en la duración de las estaciones de cultivo o en la disponibilidad de agua, crecidas, sequías e incendios. Esta cadena de fenómenos repercutirá notablemente en la estructura y función del medio ambiente. Los ecosistemas más sensibles a estos cambios y que se encuentran vulnerables por el riesgo que corren de soportar un desequilibrio en esta armonía que poseen son los bosques, los ecosistemas montañosos, acuáticos y costeros principalmente. Esta alteración climática global provocará no solamente serios impactos en el medio ambiente, sino también en los sistemas socioeconómicos [12].

En definitiva, el cambio climático no es un fenómeno sólo ambiental sino de profundas consecuencias económicas y sociales. Los países más pobres, que están peor preparados para enfrentar cambios rápidos, serán los que sufrirán las peores consecuencias.

3.1.1. El Efecto invernadero

El efecto invernadero se produce por la acción del Sol, que activa el clima de la Tierra, irradiando energía en longitud de ondas cortas predominantemente en la parte

visible o casi visible (por ejemplo ultravioleta) del espectro. Aproximadamente una tercera parte de la energía solar que alcanza la zona superior de la atmósfera terrestre se refleja directamente de nuevo al espacio. Las dos restantes terceras partes son absorbidas por la superficie y, en menor magnitud, por la atmósfera.

Para equilibrar la energía entrante absorbida, la Tierra debe, como promedio, irradiar la misma cantidad de energía al espacio. Como la Tierra es mucho más fría que el sol, ésta irradia en longitudes de onda mucho más largas, sobre todo en la parte infrarroja del espectro. La atmósfera, con la participación de las nubes, absorbe gran parte de esta radiación térmica emitida por los suelos y el océano y la vuelve a irradiar a la Tierra. Esto es lo que se denomina efecto invernadero. Las paredes de vidrio de los invernaderos reducen el flujo del aire e incrementan la temperatura del aire dentro. De forma análoga, pero mediante un proceso físico diferente, el efecto invernadero de la Tierra calienta la superficie del planeta.

Sin el efecto invernadero natural, la temperatura promedio de la superficie terrestre estaría por debajo del punto de congelamiento del agua. Por tanto, este efecto hace posible la vida tal como la conocemos. Sin embargo, un sobrecalentamiento de la Tierra produce los importantes impactos antes mencionados [6].

En la Figura 1 se muestra el comportamiento de la Tierra y la atmósfera a partir de las emisiones de radiación del sol y el efecto invernadero que en consecuencia se produce.

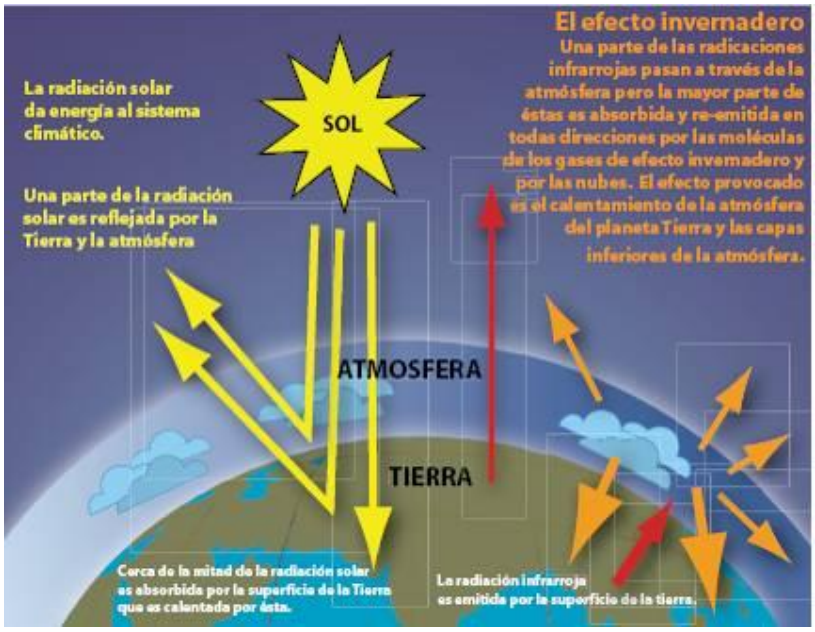

Figura 1. Modelo idealizado del efecto invernadero natural.

Fuente: http://unfccc.int/ghg_data/items/3825.php

Los dos gases más abundantes en la atmósfera, el nitrógeno (que abarca el 78% de la atmósfera seca) y el oxígeno (que abarca el 21%), apenas ejercen efecto invernadero. El efecto invernadero proviene de las moléculas más complejas y mucho menos comunes. El vapor de agua es el gas de efecto invernadero más importante y el dióxido de carbono (CO_2) es el segundo en importancia. El metano, el óxido nitroso, ozono y varios otros gases presentes en la atmósfera en pequeñas cantidades contribuyen también al efecto invernadero [6].

En las regiones ecuatoriales húmedas donde hay tanto vapor de agua en el aire y el efecto invernadero es tan grande, la adición de una pequeña cantidad de CO_2 o de vapor de agua tiene solo un impacto directo pequeño en la radiación infrarroja descendente. Sin embargo, en las regiones frías y polares, el efecto de un pequeño incremento de CO_2 o vapor de agua es mucho mayor. Lo mismo ocurre con la atmósfera superior fría y seca donde un pequeño incremento del vapor de agua tiene una mayor influencia en el efecto invernadero de lo que el mismo cambio en el vapor de agua tendría cerca de la superficie [6].

Varios componentes del sistema climático, a saber, los océanos y los elementos vivos, afectan las concentraciones atmosféricas de los gases de efecto invernadero. Un ejemplo importante de ello son las plantas que obtienen el CO_2 de la atmósfera y lo convierten (junto con el agua) en carbohidratos mediante la fotosíntesis.

En la era industrial, las actividades humanas han añadido gases de efecto invernaderos a la atmósfera, básicamente a través de la quema de combustibles fósiles y la eliminación de bosques. La adición de más gases de efecto invernadero, digamos CO_2, a la atmósfera, intensifica el efecto invernadero y, por tanto, calienta el clima de la Tierra. [6]

3.1.2. *Gases de efecto invernadero (GEI)*

De acuerdo a la CMNUCC (1992), se entiende como gases de efecto invernadero aquellos componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropógenos, que absorben y remiten radiación infrarroja. [7].

El IPCC, los define como componente gaseoso de la atmósfera, natural o antropógeno, que absorbe y emite radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación infrarroja térmica emitida por la superficie de la Tierra, por la propia atmósfera y por las nubes.

El vapor de agua (H_2O), el dióxido de carbono (CO_2), el óxido nitroso (N_2O), el metano (CH_4) y el Ozono (O_3) son los gases de efecto invernadero primarios de la atmósfera terrestre. La atmósfera contiene, además, cierto número de gases de efecto invernadero enteramente antropógenos, como los halocarbonos u otras sustancias que contienen cloro y bromo, contemplados en el Protocolo de Montreal. Además del CO_2, del N_2O y del CH_4, el Protocolo de Kioto contempla los gases de efecto invernadero hexafluoruro de azufre (SF_6), los hidrofluorocarbonos (HFC) y los perfluorocarbonos (PFC).

Las actividades humanas traen como consecuencia la emisión de cuatro gases de efecto invernadero principales: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido

nitroso (N_2O) y los halocarbonos (grupo de gases que contienen flúor, cloro y bromo). Estos gases se acumulan en la atmósfera, provocando un incremento de sus concentraciones con el paso del tiempo. En la era industrial se han producido incrementos significativos de todos estos gases. [8]

Los gases de efecto invernadero de larga vida (GEILV), por ejemplo, el CO_2, el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O), son químicamente estables y persisten en la atmósfera durante escalas de tiempo desde décadas hasta siglos o más, de modo que sus emisiones ejercen su influencia en el clima a largo plazo. Debido a su larga vida, estos gases se mezclan bien en la atmósfera, mucho más rápido de lo que se eliminan, y los datos de sus concentraciones mundiales se pueden calcular con exactitud en pocas localidades. El dióxido de carbono no tiene un período específico de vida porque está en ciclo continuo con la atmósfera, los océanos y la biosfera terrestre y su eliminación neta de la atmósfera involucra una gama de procesos con escalas de tiempo diferentes.

Los gases de corta vida (por ejemplo, el dióxido de azufre y el monóxido de carbono) son químicamente reactivos y se eliminan por lo general mediante procesos naturales de oxidación en la atmósfera, eliminándolos en la superficie o gracias a las precipitaciones. Por eso sus concentraciones son muy variables. El ozono es un gas de efecto invernadero importante que se forma y destruye por reacciones químicas que implican a otras especies en la atmósfera. En la troposfera, el ser humano influye sobre el ozono principalmente mediante cambios en los gases precursores que conducen a su formación, mientras que en la estratosfera, el ser humano influye principalmente a través de cambios en las tasas de eliminación del ozono causados por los clorofluorocarbonos (CFC) y otras substancias que eliminan el ozono. [8]. En la Tabla 1 se presentan los principales gases causantes de efecto invernadero, sus fuentes de emisión y efecto en la atmósfera.

Tabla 1. Gases de Efecto Invernadero

Gas	Fuente Emisora	Persistencia de las Moléculas en la Atmósfera (años)	Potencial de Calentamiento Global (PCG CO2= 1) Horizonte de tiempo: 100 años
Dióxido de Carbono (CO_2)	Quema de combustibles fósiles, cambios en el uso del suelo, producción de cemento	500	1
Metano (CH_4)	Quema de combustibles fósiles, agricultura, ganadería, manejo de residuos	7 - 10	21-23
Óxido Nitroso (N_2O)	Quema de combustibles fósiles, agricultura, cambios en el uso del suelo	140-190	230-310
Clorofluorocarbonos (CFC)	Refrigerantes, aerosoles, espumas plásticas.	65-110	6200-7100
Hidrofluorocarbonos (HFC)	Refrigerantes líquidos	12	140 – 11700
Hexafloruro de Azufre (SF_6)	Aislantes eléctricos	3200	23.900

Elaboración: SAyDS

Fuente: http://unfccc.int/ghg_data/items/3825.php

3.1.3. Aspectos Institucionales del Cambio Climático

La convención Marco de las Naciones Unidas sobe el Cambio Climático (CMUUCC) se firmó durante la Cumbre de la Tierra en Río de Janeiro en 1992. Entró en vigor en 1994, y en un poco más de diez años la Convección ha recibido 189 instrumentos de ratificación.

Su objetivo primario es estabilizar las concentraciones de los gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático (no especifica cuáles deberían ser esos niveles de concentración). Ese nivel debería lograrse en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, asegurar que la producción de alimentos no se vea amenazada y permitir que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible.

En pos de cumplimentar esta meta, todos los países tienen un compromiso general de confrontar el cambio climático, adaptarse a sus efectos y reportar sobre sus acciones para implementar la convención.

Los países se dividen en dos grupos principales, 40 industrializados los cuales se enumeran en la lista del Anexo I del Convenio y los restantes se consideran países no del Anexo I. El Anexo I incluye los 24 países industrializados relativamente ricos que eran miembros de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE) en 1992, los 15 primeros Estados miembros de la UE y 11 países con economías en transición hacia una economía de mercado, incluida Rusia. Al distinguir entre países industrializados y países en vías de desarrollo, la Convención reconoce que los países industrializados son responsables de la mayoría de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero y también que poseen las capacidades institucionales y financieras para reducirlos. Las Partes se reúnen anualmente para comprobar los avances y debatir otras medidas.

Tanto los países en desarrollo como los desarrollados se han comprometido, entre otras obligaciones, a presentar comunicaciones nacionales que informen sus inventarios a adoptar programas nacionales para mitigar el cambio climático a desarrollar estrategias para adaptarse a los impactos a promover la transferencia de tecnología; a cooperar en la investigación científica y tecnológica; y a promover la conciencia en la opinión pública, la educación y la capacitación.

Conferencia de las Partes

La Conferencia de las Partes (COP), esta conformada por todos los países que son partes de la Convención de Cambio Climático y que representa la autoridad máxima con capacidad de decisión. Sus principales funciones son la de examinar y evaluar: la aplicación de la Convención y los compromisos asumidos; los nuevos descubrimientos científicos y la experiencia conseguida en la aplicación de las políticas relativas al cambio climático; las comunicaciones nacionales e inventarios de emisiones presentados por las Partes; los efectos de las medidas adoptadas por las

Partes; los progresos realizados en el marco de las metas acordadas en la Convención.

Panel Intergubernamental para el Cambio Climático

El IPCC fue establecido por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) en 1988. El papel del IPCC es de aconsejar a los responsables de tomar decisiones políticas acerca del estado actual del conocimiento y proporcionar información pertinente y fiable del cambio climático. No realiza ninguna investigación científica por si mismo, pero en cambio revisa millares de publicaciones científicas relativas al cambio climático esforzándose por revisar toda la literatura publicadas todos los años y resume el 'estado del conocimiento' en lo relativo al cambio climático en los Informes de Evaluación que se publican cada cinco años aproximadamente.

3.1.4. Historial de negociaciones a nivel global

Las negociaciones sobre Cambio Climático se desarrollan en el ámbito de las Naciones Unidas, pudiendo distinguir varias etapas. En la etapa inicial se crea el IPCC Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (1988) y la Convención Marco de las NU sobre Cambio Climático (CMCC) conocida luego como “la Convención ” (1992) que entraría en funciones en 1994.

En una segunda etapa, que se inicia en 1995 con una primera reunión de las partes (los países) en Berlín (la COP 1). En una primera etapa las negociaciones se orientan con una estrategia llamada de “promesa-y-evaluación” donde los países presentarían sus planes de reducción de emisiones y los organismos especializados de la Convención evaluarían anualmente su marcha. Este enfoque de abajo hacia arriba fue pronto reemplazado por la búsqueda de un acuerdo integral obligante (de arriba hacia abajo) que conduce al Protocolo de Kioto en 1997. Entre 1995 y 2002, las reuniones de la partes (ver cronograma resumen) se dedicaron a negociar los detalles del acuerdo y sus mecanismos. Finalmente, en 2002 en la COP 7 en Marrakech, se

logran acuerdos decisivos, basados en múltiples concesiones, y el PK queda a la espera de la ratificación por los países firmantes. El PK se inicia formalmente en 2005, luego de la ratificación por parte de Rusia a fines del año anterior.

En una tercera etapa, la Convención se centró en la discusión sobre los acuerdos post-Kioto que debían entrar en vigencia en 2012. Central en esta etapa fue la COP 15 celebrada en Copenhague en 2009. Con una gran expectativa mundial por un acuerdo general, la reunión terminó en un rotundo fracaso. En las COPs subsiguientes se produce un giro, o un retorno, hacia la estrategia de "promesa-y-evaluación" (enfoque abajo-hacia-arriba) que sin descartar un posible acuerdo global en el futuro, permitiera ir trabajando los distintos componentes de la llamada arquitectura de los acuerdos. Esta etapa, en la que se han producido avances interesantes, debe concluir en la COP XXI en Paris en 2015.

Se presenta a continuación una cronología de los avances y las negociaciones que han ido sucediendo para dirigirse hacia un conocimiento global de la problemática y búsqueda de acuerdo sobre el cambio climático.

Cronología [10]

1988 - El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Organización Meteorólogica Mundial (WMO) crean el (IPCC) para evaluar el conocimiento científico sobre el calentamiento global

1990 - El IPCC produce su primer reporte, donde señalan la creciente concentración de gases de efecto invernadero en la atmosfera, posiblemente como consecuencia de las actividades humanas. Llaman a unir esfuerzos en la cooperación internacional para estabilizar las concentraciones.

1992 - Se celebra la Cumbre de la Tierra de Rio de Janeiro, Brasil. Se establece la Convención Marco de las NU sobre Cambio Climático (CMCC) conocida luego como "la Convención".

1994 - Comienzan las funciones de la Convención: se compromete a iniciar las negociaciones para estabilizar los niveles de GEI en la atmósfera y reconoce la responsabilidad primaria de las naciones industrializadas

1995 - COP 1, Se inician las negociaciones en Berlín, en la primera Conferencia de las Partes (naciones) llamada COP 1. Se aprueba el presupuesto, el Secretariado y los mecanismos institucionales. El "Mandato de Berlín" establece una fase piloto hasta el año 2000. Segundo Reporte del IPCC.

1996 - COP 2, En Ginebra, Suiza. Endorsan al IPCC2 y a los acuerdos de la COP1 . La OPEP deja de oponerse a las acciones de la Convención.

1997 - COP 3, en Kioto, Japón. Se logra un acuerdo sobre el Protocolo de Kioto (PK), con que establece metas de reducción para países desarrollados (Anexo I) hasta 2012 y mecanismos de mercado para lograr esas metas. El PK debe ser ratificado por cada país.

1998 - COP 4, en Buenos Aires, Argentina. Se acuerda un "Plan de Acción" para el seguimiento del PK, incluyendo los estímulos para la transferencia tecnológica. No se logran avances en los llamados "mecanismos de Kioto" que quedan pendientes para futuras COPs.

1999 - COP 5, en Bonn, Alemania. No hay avances en los acuerdos sobre los mecanismos de Kioto.

2000 - COP 6, en La Haya, Holanda. Fracasan las negociaciones sobre los mecanismos de Kioto. La reunión es suspendida y se resuelve continuarla al año siguiente. Tercer Reporte del IPCC.

2001 - COP 6bis, en Bonn, Alemania. Se logran avances en los acuerdos, en parte motivados por el rechazo definitivo de los EEUU al PK. Estos avances, contenidos en el "Acuerdo de Bonn" se concretarán en la COP 7.

2001 - COP 7, en Marrakech, Marruecos. Se concretan los acuerdos para poner en marcha el PK, con grandes concesiones que debilitan notablemente los efectos del PK. Los detalles del "acuerdo de Marrakech" se perfeccionarán en los siguientes

COPs. En Johannesburgo en Sur África se reúne una segunda Cumbre Mundial sobre el Clima, llamada RIO+10. En esta cumbre no se ratifica el PK.

2002 - COP 8, en Nueva Delhi, India. Las negociaciones continúan sin lograrse la ratificación de PK y sin progreso evidente.

2003 - COP 9 en Milán, Italia. Progreso modesto en algunos aspectos técnicos, como normas y procedimientos para proyectos forestales dentro de los Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL). Los aspectos básicos relacionados con el compromiso internacional sobre el CC permanecen sin avance. El PK continúa sin entrar en vigor.

2004 - COP 10 en Buenos Aires, Argentina. Las Partes se reunieron en diciembre, ya conocida la ratificación del PK por Rusia, lo que implicaba que entraría en vigor en febrero del 2015. En esta COP se precisaron detalles inconclusos sobre la implementación del PK (Mecanismo de Desarrollo Limpio, uso de la tierra, mecanismos de reporte y contabilidad, etc). Se convocó a un seminario de expertos de los distintos países como “un intercambio informal de información sobre medidas a tomar por los gobiernos para implementar sus compromisos actuales y sobre posibles vías para continuar con el desarrollo de sus esfuerzos climáticos”.

2005 - COP 11 en Montreal, Canadá. Reunión simultánea con la 1a. Reunión de las Partes del Protocolo de Kioto (MOP 1). Lo más importante de esta reunión fue el acuerdo de las Partes (excepto EUA y Australia) de continuar negociando futuros acuerdos de reducción de emisiones para cuando el PK expire en 2012. Se avanzó en la implementación de los mecanismos del PK, considerados esenciales para lograr las reducciones previstas. “En todo caso el Protocolo de Kioto sigue vivo” y “Montreal ha dado nuevos ímpetus para moverse hacia futuras discusiones.”

2006 - COP 12 en Nairobi, Kenya. Se continuaron los dos procesos iniciados en Montreal para considerar los pasos siguientes en el esfuerzo climático internacional. Se abrió una nueva vía para revisar el PK. Se acordó un plan de cinco años para elaborar un programa de adaptación para países en desarrollo, así como procedimientos y modalidades para el Fondo de Adaptación. Se acordaron mejoras en el Mecanismo de Desarrollo Limpio.

2007 - COP 13, Bali, Indonesia. Se aprueba el “Plan de Acción de Bali” que crea dos mecanismos paralelos, un grupo de negociación dentro del PK (AWG-KP) y otro grupo de negociación para la acción cooperativa dentro de la Convención (AWG.LCA) que impulsará y mejorará la implementación de los programas hasta 2012 y más allá. Cuarto Reporte del IPCC.

2008 - COP14, Poznan, Polonia. Siguiendo al Plan de Acción de Bali se reúnen los dos grupos paralelos, AWG-KP yAWG.LCA. Grandes expectativas por la reunión de Copenhague el año siguiente y por la inauguración de Obama en los EEUU y las deliberaciones de la EU en Bruselas sobre recortes en sus emisiones. El AWG-KP no llegó a conclusiones en relación al rango de reducción en las emisiones y se comprometió a concluir antes de Copenhague. La AWG.LCA tampoco hizo progresos. Sobre la revisión del PK, centrados en los mecanismos de adaptación y el financiamiento no hubo acuerdo.

2009 - COP15 en Copenhague, Dinamarca. Después de la gran expectativa creada en torno a alcanzar un nuevo acuerdo, la reunión concluye en un ruidoso fracaso. Un borrador de Declaración es preparado en el último minuto por un grupo de dirigentes de países industrializados, pero se queda sin aprobación por la COP.

2010 - COP16 en Cancún, México. No se intentó lograr ningún acuerdo global. Más bien se puso de manifiesto un cambio de estrategia hacia el enfoque de abajo hacia arriba. Se inicia un proceso que diverge de Kioto y de lo que se había procurado desde entonces.

2011 - COP17, Durban, Sur África. En Durban, las partes adoptaron la llamada “Plataforma de Durban para la Acción Ampliada” (o intensificada), que inicia una nueva ronda de negociaciones destinadas a producir “un protocolo, u otro instrumento legal o un acuerdo con fuerza legal” para el período 2020, negociaciones que deben concluir en el 2015 (COP21, Paris). Otros logros son el establecimiento del Fondo Verde para el Clima (Green Climate Fund) y los procedimientos para reportar, medir y verificar (MRV) las acciones de los países.

2012 - COP18 en Doha, Qatar. Se alcanzan acuerdos mínimos en un pliego llamado “Puerta Climática de Doha”. Se prorroga hasta 2020 la vigencia del PK, pero con muy pocos países obligados, que representan apenas el 15% de las emisiones actuales. Se da por terminada la doble vía promovida en Bali y se reafirma el compromiso de la Plataforma de Durban de alcanzar un acuerdo que sea obligante para todas las partes. Este compromiso deberá lograrse en 2015 en Paris. Según algunos comentaristas, Doha fue un desastre. En Rio de Janeiro se reunió la cumbre mundial llamada RIO+20 para el desarrollo sostenible.

2013 - COP 19 Varsovia, Polonia. Quinto Reporte del IPCC. Se acordó que las Partes tienen hasta el primer trimestre del 2015 para establecer sus cuotas de reducción de emisiones a partir del 2020. Estas reducciones tendrán la forma de “contribuciones” en lugar de “compromisos. Se aprobaron mecanismos para la ayuda a los países más afectados por el CC: “Mecanismo Internacional de Varsovia” en lo hasta ahora llamado “pérdidas y daños”. Después de más de una década se completó un mecanismo para protección de los bosques llamado REDD+.

2014 - COP20 en Lima, Perú. Se avanza en la implementación del REDD+, de los Planes Nacionales de Adaptación (PNA) y se lanzó una página web para difundir las informaciones sobre los planes y programas de los países, que se espera ayudará a darle más transparencia al monitoreo de las estrategias nacionales. En los aspectos medulares de la Convención no se logró mucho avance.

2015 - COP 21 en París, Francia. Se firmó el Acuerdo de París. Dicho Acuerdo fue adoptado por 195 países durante la Cumbre de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático y firmado por 175 de ellos el 22 de abril de 2016, y contempla el compromiso de los países firmantes por reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero para evitar que el calentamiento global supere los dos grados centígrados. El acuerdo implicó tomar compromisos locales en los diversos países, a diferencia de Protocolo de Kyoto que solo obligaba a países desarrollados a establecer medidas de mitigación de GEIs.

3.1.5. Escenario Argentino en relación al Cambio Climático

Referencias históricas

Argentina ratificó la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático por medio de la Ley N° 24.295 en el año 1993.

Asimismo, por Ley 25.438 del año 2001 la Argentina aprueba el Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático. En este contexto, resulta preciso destacar que nuestro país no pertenece al Anexo I y por lo tanto no está obligado a limitar emisiones agregadas de GEI, sin perjuicio que le corresponden ciertas obligaciones, relacionadas básicamente con la formulación de programas nacionales y/o regionales para mejorar la calidad de los factores de emisión para mitigar el cambio climático tanto por medio de la diseminación de información como por medio de la cooperación en materia de transferencia de tecnología y creación de capacidades.

Del Protocolo de Kyoto surgen los proyectos de Mecanismo para un Desarrollo Limpio (MDL), el cual es uno de los tres mecanismos de flexibilización con que cuentan los países incluidos en el ANEXO I del Protocolo de Kyoto para poder cumplir con los compromisos asumidos de reducción de emisiones de gases contaminantes (GEI) de efecto invernadero.

Este mecanismo de flexibilización es el único que tiene en cuenta a países en vías de desarrollo, el mismo consiste básicamente en reducción de emisiones de una industria existente por introducción de mecanismos nuevos (transferencia de tecnología), más aporte de capital que redunda en cumplir con dos objetivos que involucra a las partes: acceso a tecnología limpia por parte del país huésped del proyecto, y menores emisiones que se convierten en bonos de carbono para el desarrollador del proyecto.

Para poder transformar reducciones de emisión en bonos, es necesario desarrollar una serie de pasos en el orden nacional e internacional, que significan la aprobación del proyecto, el monitoreo de las reducciones, la verificación de las mismas

para luego recién pedir la emisión de los mismos. Este proceso consta de varios actores involucrados, procedimientos a desarrollar y pautas a cumplir

En el mes de septiembre de 1997, presentó la “Primera Comunicación del Gobierno de la República Argentina” en la que se detalla el inventario de los gases de efecto invernadero presentes en nuestro país al mismo tiempo que se incluyen a los sectores económicos que influyen en la producción de gases GEI, explicándose las políticas y metodologías utilizadas por el gobierno para medir y explicar estos fenómenos.

A fines de 2006 se presentó la Segunda Comunicación Nacional. En junio de 2015 se concluyó y presentó la Tercera Comunicación Nacional, la cual incluyó el inventarios de GEIs del año 2014y la propuesta de acciones de mitigación. En la Figura 2 se muestra una gráfica de las emisiones por países y el lugar que ocupa la Argentina como país emisor en el contexto global

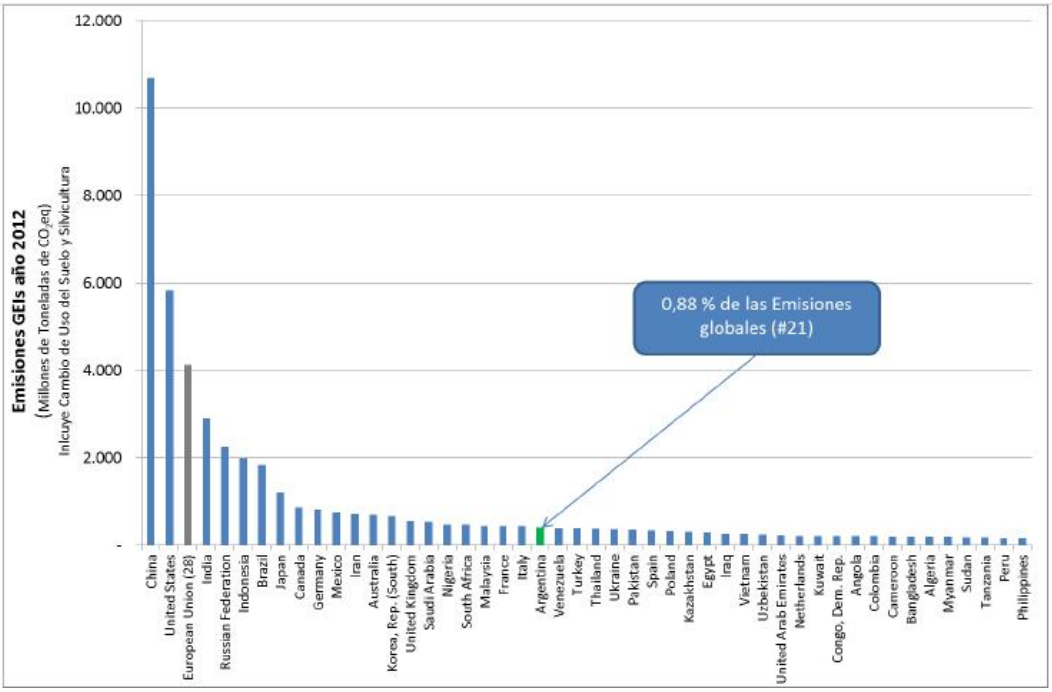

Figura 2. Emisiones de GEI por países

Elaboración: SAyDS

Fuente: CAIT Climate Data Explorer.2015.Washigton, DC: World Resources Institute. http://cait.wri.org/

- Argentina contribuye con el 0.88 % del volumen de emisiones globales de GEI, encontrándose en el puesto 21
- A nivel Latinoamericano es el 3er país más emisor, detrás de Brasil y México.

La emisión per Capita es de 9,86 CO_2 eq/año hab. que la coloca por encima de la media mundial.

La Figura 3 se muestra el inventario de GEI de la Argentina presentado en la 3era Comunicación Nacional para la Mitigación del Cambio Climático, dividido por sectores de generación.

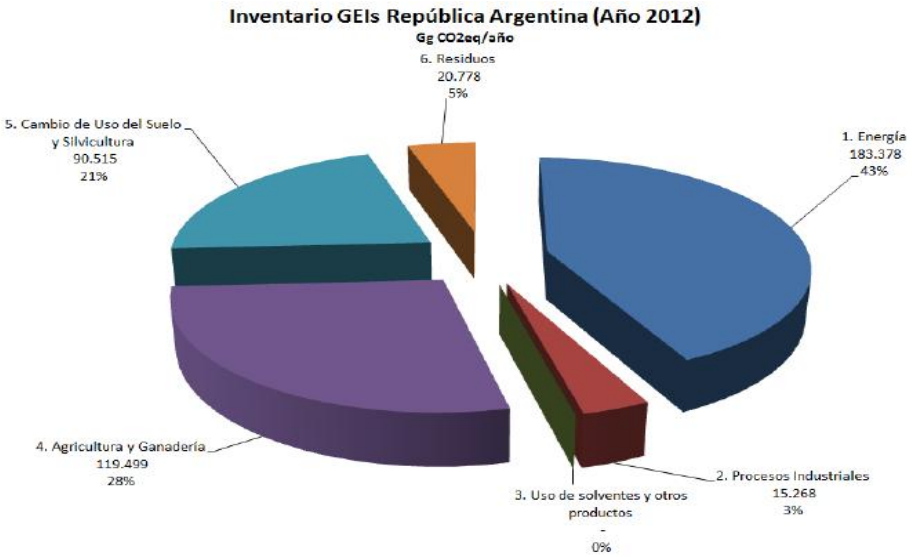

Figura 3. Emisiones de GEI de Argentina por sectores de generación

Elaboración: SAyDS
Fuente: http://www.ambiente.gov.ar/archivos/web/ProyTerceraCNCC/file/Final%20Mitigaci%C3%B3n.pdf

<u>Emisiones en el sector residuos</u>

Las emisiones en el sector residuos presentan una tendencia en aumento, en relación al año 2006. No obstante, para el año 2006, su participación en el total de las emisiones era del 6 % y para el año 2012 resultaron ser del 5% [6]

En la Argentina, las emisiones en el sector de residuos se componen de las siguientes fuentes presentadas en la Figura 4 a continuación.

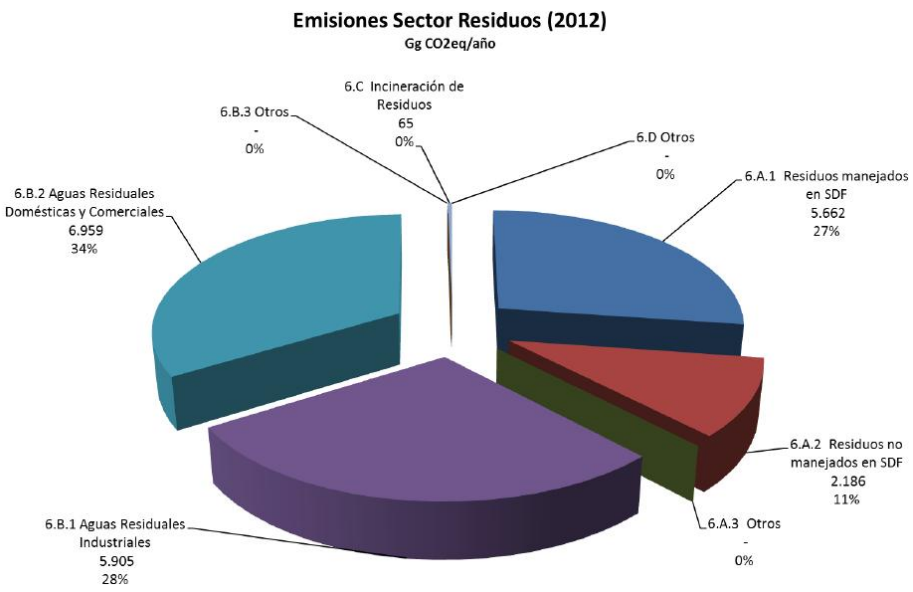

Figura 4. Emisiones de GEI de Argentina en el sector residuos

Elaboración: SAyDS

Fuente: http://www.ambiente.gov.ar/archivos/web/ProyTerceraCNCC/file/Final%20Mitigaci%C3%B3n.pdf

3.1.6. Emisiones producto de los residuos sólidos urbanos

En lo referido a los RSU, las mayores emisiones de GEI ocurren en la etapa de disposición final, producto de la transformación de los mismos bajo determinadas condiciones. Los sitios donde se realiza la disposición final pueden ser aquellos que sí están preparados y debidamente gestionados para dicha disposición, llamados rellenos sanitarios, o por el contrario, aquellos que cumplen parcialmente o ni cumplen con las condiciones adecuadas para su recepción y gestión, que serían los basurales a cielo abierto,

Las emisiones de GEI que se generan en la etapa de disposición final, provienen mayormente de las reacciones de descomposición de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas, produciendo mayormente de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y en mucho más baja proporción óxido nitroso (N_2O).

<u>Emisión de gases en rellenos sanitarios</u>

Los rellenos sanitarios tienen como finalidad darle un destino a los residuos sólidos que se generan en los núcleos urbanos y se ubican obligadamente en la etapa

final de toda gestión de residuos sustentable. El relleno sanitario es un método de disposición final de residuos sólidos y semisólidos que emplea principios de ingeniería para confinar de manera controlada los residuos en la menor superficie posible, reduciendo su volumen al mínimo viable y cubriéndolos con la frecuencia necesaria. No obstante las técnicas adoptadas para la correcta ejecución de los mismos, los rellenos sanitarios generan gases como consecuencia de los procesos de descomposición de los residuos orgánicos depositados en ellos.

En la actualidad no existe en Argentina un marco legislativo nacional que regule el manejo de los gases en los rellenos sanitarios, sino tan solo normas técnicas emitidas por las Secretarías de Política Ambiental de cada distrito provincial, las cuales no establecen requisitos técnicos respecto del manejo del gas de relleno sanitario.

3.2. CEAMSE

CEAMSE es una empresa conformada en partes iguales por el Gobierno de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires y el Gobierno de la Provincia de Buenos Aires, para realizar la disposición final de los residuos sólidos urbanos del área metropolitana.

La empresa brinda servicio a más de 14.000.000 de habitantes, en una superficie de 8.800 km2, dando tratamiento a unas 6.500.000 toneladas de residuos al año (aproximadamente el 40% de los residuos sólidos del país). Sus actividades comprenden: la transferencia, el transporte, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos; el servicio de inspección y control integral del Servicio Público de Higiene Urbana de la Ciudad de Buenos Aires; y consultoría, asesoramiento y colaboración en erradicación y saneamiento de basurales y cuencas.

CEAMSE viene llevando adelante proyectos de desgasificación de los módulos de relleno sanitario, todos ellos acreditados como proyectos de Mecanismo de Desarrollo Limpio dentro del protocolo de Kyoto.

La generación de energía eléctrica a partir de la utilización del biogás, representa un avance de esta empresa en el manejo de los gases generados en el relleno sanitario.

3.2.1. Proyectos de mitigación de las emisiones de GEI en los rellenos sanitarios de CEAMSE

Pese a no estar obligados por ley, la CEAMSE viene implementando desde el año 2007 proyectos de mitigación para la reducción de las emisiones gaseosas de efecto invernadero a partir de la desgasificación de cada uno de los módulos de Relleno Sanitario.

La implementación de estos proyectos, significa una acción positiva hacia la preservación del medio ambiente y el desarrollo sustentable, ya que provoca una sensible disminución de las consecuencias del cambio climático global provocado por los gases de efecto invernadero (de acuerdo a los establecido en el art. 2º de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático), y una disminución de los posibles olores desagradables provocados por dichos gases en las áreas circundantes a los rellenos.

A su vez, todos ellos han sido encuadrados como proyectos de tecnología limpia, y dentro de los establecido en el Protocolo de Kyoto (acuerdo internacional signado por la República Argentina mediante la Ley Nº 25.438), el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) y los acuerdos Marrakesch, todo los cual se ve afianzado por la aprobación de dicho protocolo mediante la Ley antes mencionada el 19 de junio de 2001, abriendo paso a la creación formal de un mecanismo de control de emisiones y dando pautas regulatorias para la comercialización de los derechos de emisión.

A partir de la entrada en vigencia de Ley 26.190 “Régimen de Fomento para el uso de fuentes renovables de energía destinada a la producción de energía eléctrica”, ENARSA convocó a una licitación pública para la presentación de propuestas para la

provisión del servicio de generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables de energía – Biogas. Dicha licitación hizo posible la construcción de dos centrales de generación de energía eléctrica utilizando como insumo para la producción el biogás generado en dos de los módulos de relleno sanitario, que desde octubre del año 2012 se encuentran operando dentro del Complejo Ambiental Norte III y que presentan una potencia instalada de 15 MW en total.

3.2.2. Tecnología de Tratamiento Mecánico Biológico

La Tecnología TMB combina el proceso mecánico de separación y clasificación con otro biológico que permiten una reducción en la cantidad de residuos que se envía al relleno sanitario, una recuperación de materiales para su reutilización y reciclado, y una mejora en la operación y la capacidad del módulo de disposición final [13].

Respecto a los beneficios de esta tecnología en relación a los impactos ambientales negativos asociados a la generación de gases de efecto invernadero, se destaca la recuperación de materiales para su reciclado y reconversión en nuevas materias primas, lo que reduce las emisiones asociadas a la extracción y procesamiento de recursos naturales [14]. Por otro lado, la degradación en condiciones aeróbicas de la materia orgánica putrescible y el recupero de papel y cartón, disminuyen las emisiones asociadas a la descomposición anaeróbica de estos materiales en los sitios de disposición final [15].

Con la aplicación del tratamiento biológico, cierto contenido orgánico fácilmente degradable de la fracción tratada se degradará durante el proceso. Sin embargo, finalizado el proceso en el material tratado aún contendrá cierto contenido orgánico fácilmente degradable y sustancias orgánicas refractarias, tales como lignina, ceras, ácidos húmicos, por lo que los procesos biológicos seguirán siendo la característica dominante de su comportamiento cuando se depositen en los rellenos sanitarios, generando emisiones de gas metano, aunque en menor cantidad en comparación con el residuo orgánico que no fuera tratado [16].

3.2.3. Planta TMB Norte III

La Planta de TMB - Norte III es la primera de Argentina en realizar un tratamiento mecánico biológico a los residuos sólidos urbanos. Se encuentra ubicada dentro del Complejo Ambiental Norte III de la CEAMSE, en la Provincia de Buenos Aires.

Esta planta es el resultado de una encomienda expresa realizada por el Gobierno de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires a la CEAMSE para su desarrollo. Tiene como objetivo brindar tratamiento al 20 % de los residuos provenientes de la aludida ciudad y reducir su envío a disposición final, a partir de la recuperación de los materiales susceptibles de valorización por reciclado y el tratamiento biológico de la fracción orgánica putrescible (FOP) y su posterior utilización como cobertura primaria en el módulo de relleno sanitario.

El proyecto fue adjudicado a Benito Roggio e Hijos S.A. - TECSAN S.A. UTE, responsables de su diseño, construcción y operación, bajo el contrato celebrado con CEAMSE en diciembre de 2010. La planta se encuentra certificada por el Sistema Integrado de Gestión: ISO 9001, ISO 14001 y OHSAS 18001.

Características principales de la Planta:

- Capacidad de tratamiento: 328.900 tn/año
- Cantidad de toneladas a tratar: 1.100 tn/día (70 tn/hora)
- Superficie total empleada: 4,5 ha
- Turnos operativos: 2 (mañana y tarde)
- Turnos de mantenimiento: 1 (noche)
- Dotación: 150 empleados

Figura 5. Planta TMB-Norte III – Vista aérea

Instalaciones

La Planta se compone de dos edificios principales:

- **Nave de Separación y Clasificación**. Integra las zonas de recepción, pre-tratamiento, y de separación mecánica. Cuenta con una superficie de 10.530 m^2.
- **Nave de Bioestabilización**. Compuesta por 12 biomódulos, y un sector anexo con 4 biomódulos que operan a la intemperie. Posee una superficie total de 10.620 m^2.

El predio incluye también instalaciones secundarias, como oficinas, vestuarios, comedor y taller mecánico.

Funcionamiento general de la Planta TMB

La Planta emplea una tecnología de tratamiento de los RSU que combina la clasificación y proceso mecánico con el tratamiento biológico.

La etapa mecánica de clasificación consiste en la separación de los residuos secos y de la FOP, y en la recuperación de los materiales reciclables, por medio de

equipos que separan por volumen, dividiendo el flujo de residuos según su tamaño, por medio de trommels con mallas de determinada dimensión de apertura, y otros equipos que lo hacen por peso, separando los residuos por corrientes de aire. Luego, de forma manual, se recuperan de los residuos secos materiales como papel, cartón, plástico, tetrabrik, vidrio, PET, etc. Asimismo, tanto la línea de secos como la de la FOP, pasan a través de un sector con separadores magnéticos, para metales ferrosos, y de Foucault para metales no ferrosos. Los materiales secos, ya separados, son conducidos hasta prensas horizontales donde son prensados y enfardados para su posterior comercialización.

El tratamiento biológico se realiza en los biorreactores, donde los residuos que componen la FOP son cargados en éstos hasta alcanzar su capacidad y luego son cubiertos con una membrana de permeabilidad selectiva de tecnología Gore-Tex o equivalente. Seguidamente, se insufla aire a través de cañerías instaladas en los pisos de cada biorreactor en forma continua, generando de esta forma las condiciones necesarias para que se desarrolle el tratamiento aeróbico durante los 21 a 23 días que éste dura. El proceso es controlado en forma permanente mediante un software específico; se monitorean oxígeno, temperatura y humedad. Este tratamiento tiene por objetivo acelerar y dejar avanzado el proceso de descomposición de la FOP, con el fin de reducir su volumen, peso y también su potencial de generación de líquido lixiviado y de gas metano, antes de ser enviado al módulo de relleno sanitario, en donde se lo utiliza como cobertura primaria, entre otros usos que pueden darse.

Transporte y recepción

Los residuos que son tratados en esta Planta provienen, como ya se dijo de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA), específicamente son los

Figura 6. Ingreso de los RSU a la línea de proceso

recolectados en la zona 2. Una vez recolectados son transportados hasta la estación de transferencia de Colegiales, también ubicada en la CABA, donde son transferidos a vehículos de mayor porte (trailers) para transportarlos hasta el Complejo Ambiental Norte III. Una vez ingresados al Predio, éstos son enviados a la Planta de TMB donde son pesados en balanzas totalmente automatizadas, para finalmente ser conducidos a la zona de recepción y descarga.

Descarga y pre-tratamiento

Los RSU son descargados dentro de la zona de recepción y son descompactados con ayuda de dos pulpos electrohidráulicos de marca Stemm de 5 m^3 de capacidad, que acercan los residuos a la zona de ingreso al proceso y realizan el retiro de aquellos residuos voluminosos o perjudiciales.

Figura 7. Triturador

La carga de los residuos para dar inicio a su procesamiento se lleva a cabo con un pulpo grúa de ruedas Caterpillar modelo M322D MH, con brazo flexible y una garra de 1,5 m^3 de capacidad que permite dosificar adecuadamente los residuos a la línea. Figura 6.

Tratamiento Mecánico

Apertura de bolsas y reducción de volumen

Al inicio del proceso los residuos pasan a través de un triturador Hammel modelo VB950 E, de 500 KW de potencia, el cual tiene como objetivo realizar la apertura de

las bolsas, dejando expuestos los residuos para que puedan ser separados a lo largo del proceso, realizando a su vez la reducción del volumen de los objetos de mayor tamaño, sin comprometer la recuperación de los materiales reciclables, e impidiendo, de esta manera, posibles atascos de residuos a lo largo del proceso. Ver Figura 7.

Figura 8. Alimentador / Homogeneizador

Alimentación y homogeneización del flujo

Una vez superada la etapa de trituración, los RSU son descargados en un alimentador provisto de un nivelador hidráulico homogenizador que permite dosificar la entrada de residuos a la etapa de tratamiento. Figura 8.

Separación y clasificación

Luego del dosaje, los residuos son enviados al trommel de la Línea 2, el cual está equipado con mallas de 100 mm x 100 mm, y que permite la separación del flujo por tamaño en dos fracciones diferentes:

A. Fracción < 100 mm

Comprende la mayor parte de la fracción orgánica putrescible (FOP) y fracciones inorgánicas como arena, vidrio, plásticos y papeles, metales, etc., como también una fracción de materiales recuperables (pequeñas botellas de PET y PEAD y envases de tetrabrik chicos).

Estas fracciones son enviadas al trommel de la Línea 3, de tamaño de malla de 70 mm x 70 mm, por medio de un sistema de cintas trasportadoras. Figura 9.

B. Fracción >100 mm

La fracción de tamaño superior a 100 mm comprende la mayoría del material reciclable. Este material es enviado por medio de la cinta trasportadora al separador por aire primario, que succiona con gran fuerza los residuos de la cinta ("Fracción Ligera 2B") excepto los de gran tamaño y peso ("Fracción 2A") que son recuperados en parte en la selección manual siguiente.

Figura 9. Trommel línea 1

2A. Fracción >100 mm (no capturada por el separador por aire primario)

El material pesado, que es todavía rico en materiales recuperables, como neumáticos, madera, cartones grandes, textiles grandes, etc., está sujeto a una clasificación manual en la cabina de selección de la Línea 2. El material residual, no seleccionado manualmente, es dirigido al final de la línea, donde se carga en camiones como rechazo.

2B. Fracción >100 mm (succionada por el separador por aire primario)

Todo el material ligero obtenido del separador por aire primario y decantado en el ciclón, es enviado a través de un sistema de cintas a un

Figura 10. Separador por aire primario

segundo separador por aire que por medio de una aspiración más débil separa del flujo de entrada una fracción, principalmente constituida por plásticos, films, pequeños papeles y piezas de cartón, con el fin de retirar esta corriente del flujo para facilitar la visión y recuperación manual de los materiales reciclables. Figura 10.

La fracción que no es succionada por este segundo separador por aire, compuesta principalmente de papel, cartón, envases de PET y PEAD, tetrabrik, textil etc., es descargada directamente sobre la cinta de alimentación del trommel de la Línea 1, equipado mallas de 160 mm x 160 mm. El material queda dividido entonces en dos fracciones:

C. Fracción > 160 mm

Figura 11. Cabina de separación manual

Esta fracción es enviada a la cabina de selección de la Línea 1 para ser sujeta a recuperación manual de PET, PEAD, papel, cartón, bazar, textil, tetrabrik y a continuación a recupero de metales ferrosos y no ferrosos por medio de separadores magnético y de Foucault. Los materiales recuperados son prensados y enfardados para su comercialización. Figura 11.

El material residual, no seleccionado manualmente, es dirigido al final de la línea, donde se carga en camiones como rechazo y se lo envía a disposición final.

D. Fracción < 160 mm

Esta fracción es enviada a la cinta de carga del trommel de la Línea 3, por medio de un sistema de cintas trasportadoras.

La fracción <160 mm proveniente de la Línea 1 y la fracción <100mm proveniente de la Línea 2 son enviadas al “trommel de la fracción orgánica” (trommel Línea 3) equipado con mallas de 70 mm x 70 mm. Este tamaño permite una eficiente separación de la FOP de los demás materiales recuperables. Finalmente, el flujo se separa en dos fracciones más:

E. Fracción entre 70 mm y 160 mm

Compuesta principalmente por cartón, envases de PET y PEAD, tetrabrik, textil, papel mixto. Esta fracción es enviada a la cabina de selección manual de la Línea 3 para la recuperación de dichos materiales y luego a recuperación de metales ferrosos y no ferrosos por medio del imán y del separador de Foucault. El material residual es enviado al final de la línea, donde es cargado en camiones como rechazo. Los materiales recuperados son prensados y enfardados para su comercialización. Figura 12.

F. Fracción < 70 mm

El material de tamaño inferior a 70 mm comprende la mayoría de la FOP y pequeñas fracciones inorgánicas.

Esta fracción es enviada, por medio del sistema de cintas trasportadoras y previa recuperación de metales ferrosos, a la zona de acopio transitorio a la espera de ser trasladada a la sección de tratamiento biológico.

Figura 12. Prensa enfardadora

La recuperación de metales tiene lugar por medio de separadores magnéticos y de Foucault, ubicados sobre la cinta de salida de la Línea 3.

Tratamiento Biológico

En el proceso de bioestabilización, la FOP previamente separada, es fermentada aeróbicamente, permitiendo la reducción de la materia orgánica biodegradable presente en los RSU y la obtención de un producto libre de patógenos. Este proceso presenta las siguientes ventajas:

- Ausencia de emisiones de contaminantes, sólo genera emisiones de dióxido de carbono y vapor de agua
- Reducción de olores
- Reducción del volumen y peso del material
- Disminución del potencial de generación de líquidos lixiviados y gas metano
- Posibilidad de utilización del material bioestabilizado con diversos fines

La tecnología empleada, que adopta la técnica de túneles estáticos aireados, prescinde de la necesidad del mezclado de las pilas de bioestabilización, evitando el contacto del operador con la fracción orgánica y garantizando así una operación higiénica.

La FOP es cargada en los túneles mediante pala cargadora y cubierta con una membrana de permeabilidad selectiva Gore-Tex o equivalente, por medio del equipo enlonador, mientras comienza su aireación desde el suelo por medio de ventiladores de tipo centrífugo de 60 m^3/min de caudal. El material permanece en el interior del túnel hasta cumplir con el tiempo de residencia estipulado, de aproximadamente, 21 a 23 días. Durante este período se realiza el monitoreo y control de temperatura, humedad relativa y oxígeno a través de un software específico para garantizar el ambiente necesario que permita el desarrollo bacteriano y culminación del proceso.

Una vez cumplido el tiempo de residencia, el material bioestabilizado se encuentra en condiciones de ser utilizado como cobertura primaria o con otros fines si se le realizan tratamientos adicionales. El material es retirado del túnel, cargado en

camiones y llevado hasta el sector que corresponda del relleno sanitario o en donde se requiera su uso.

Figura 13. Biomódulos

Materiales Recuperados

- Papel
- Cartón
- Tetra-pack
- PEAD
- PET
- Plásticos mixtos
- Metales ferrosos
- Aluminio
- Vidrio
- Neumáticos
- Madera
- Escombro
- Chatarra

Figura 14. Acopio de fardos - materiales recuperados

4. OBJETIVO DEL PROYECTO

El trabajo surge con vistas a estudiar la reducción del impacto en el medio ambiente producto de las emisiones de gases de efecto invernadero, que se lograría en la etapa de disposición final en relleno sanitario por la aplicación previa de un TMB a los residuos sólidos urbanos en el caso de estudio.

Debido al desarrollo futuro que podría tener esta tecnología en la Argentina, el análisis desarrollado también pretende aportar una mirada desde la problemática del cambio climático, desarrollando una herramienta de gestión que permita complementar las evaluaciones técnico-económicas de proyectos relacionados con la gestión de residuos, tomando los resultados obtenidos de las evaluaciones realizadas a la Planta TMB Norte III como antecedentes de esta tecnología aplicada a los RSU de la C.A.B.A. y como aporte para mejoras que podrían lograrse para esta Planta y otras próximas.

4.1. Objetivos generales y específicos del proyecto

El presente estudio tiene como objetivo general el medir y analizar el efecto del TMB aplicado en la Planta Norte III sobre las emisiones de gases de efecto invernadero en la etapa de disposición final.

A su vez, pretende realizar y analizar un balance de emisiones netas del escenario actual, donde es aplicado el TMB en la Planta Norte III, contemplando las posibles disminuciones de las emisiones en la etapa de disposición final, como también aquellas generadas por la operación de ésta.

El estudio desarrollado presenta los siguientes objetivos específicos:

- Aplicar una metodología de análisis basada en técnicas de ensayo estandarizadas y herramientas de cálculo.
- Estimar las emisiones de GEI asociadas a la descomposición en forma anaeróbica en el relleno sanitario de la fracción orgánica putrescible (FOP) de

los RSU de la C.A.B.A., sin la aplicación previa de un tratamiento biológico en la Planta TMB-Norte III.

- Estimar las emisiones de GEI asociadas a la descomposición en forma anaeróbica en el relleno sanitario de la fracción orgánica putrescible (FOP) de los RSU de la C.A.B.A., con la aplicación previo de un tratamiento biológico en la Planta TMB-Norte III.
- Estimar las emisiones de GEI asociadas a la operación de la Planta TMB-Norte III.
- Estimar el balance de emisiones de GEI netas de la aplicación del TMB en la Planta Norte III, en las etapas de tratamiento y de disposición final de los RSU.
- Modelizar las emisiones potenciales dinámicas de GEI en la etapa de disposición final, para los dos escenarios planteados.

Con el desarrollo de esta Tesis, se esperan generar los siguientes beneficios asociados:

- Aportar información para próximos estudios de esta tecnología en relación a los efectos que produce en las emisiones de GEI en el sector de los RSU en la Argentina.
- Generar datos locales de emisiones potenciales de GEI en la etapa de disposición final, asociados a la gestión de los RSU de la C.A.B.A, como una línea de base de referencia.
- Contribuir al inventario de emisiones de GEI de la Argentina en el sector de residuos, y al desarrollo de acciones de mitigación de dichas emisiones.
- Desarrollar una herramienta de gestión ambiental para los proyectos de aplicación de esta tecnología.
- Identificar desafíos y mejoras que puedan aplicarse a la Planta Norte III para maximizar reducciones de emisiones GEI en la etapa de disposición final.

- Aportar información y experiencia para el diseño, construcción y operación de nuevos proyectos similares.
- Fomentar la incorporación de procesos y tecnologías que contribuyan a mejorar la gestión de los RSU, teniendo en cuenta su impacto en el medio ambiente por generación de emisiones de GEI.
- Aportar información para estudios de factibilidades técnicas de proyectos de captación de biogas, digestión anaeróbica y de aprovechamiento del biogas como energía

5. METODOLOGÍA

El análisis desarrollado consistió en la recopilación de información del caso de estudio y la aplicación de herramientas de cálculo y técnicas de ensayo no definidas ni desarrolladas en esta Tesis, si no aplicadas por ella.

La información recopilada del caso de estudio fue:

- Tonelaje procesado en la Planta TMB-Norte III.
- Estimación de la FOP de los RSU, separada en la Planta TMB-Norte III.
- Consumo de combustibles en la operación de la Planta TMB-Norte III.
- Consumo de energía eléctrica en la operación de la Planta TMB-Norte III.
- Condiciones de operación y de contexto del relleno sanitario Norte III.

Los estudios particulares realizados fueron:

- Caracterización de la FOS separada en la Planta TMB-Norte III.
- Ensayo de determinación del PBM (Potencial de Biometano) de la FOP_{cruda} (previo al tratamiento biológico).

- Ensayo de determinación del PBM (Potencial de Biometano) de la FOP_{bio} (posterior al tratamiento biológico).

Las herramientas de cálculo utilizadas fueron:

- Tool04 "Methodological tool – Emissions from solid waste disposal sites". Version 08.0 (United Nations - Framework Convention on Climate Change)
- "Tool to calculate project or leakage CO_2 emissions from fossil fuel combustion". Version 02 (United Nations - Framework Convention on Climate Change)
- "Tool to calculate baseline and/or leakage emissions from electricity consumption". Version 01 (United Nations - Framework Convention on Climate Change)

6. ANÁLISIS DE LA FRACCIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS PUTRESCIBLES (FOP)

La FOP es la fracción sobre la que se desarrolló el estudio por ser ésta la porción del total de los residuos procesados en la planta que presentará cambios físico-químicos por la aplicación del tratamiento biológico, y sobre la cual se analizó el efecto de este tratamiento en la producción de gas metano en la etapa de disposición final.

Se realizó la identificación y caracterización de la (FOP) sobre el total de los RSU que ingresan a la planta TMB Norte III para su tratamiento.

6.1. Residuos procesados en la Planta TMB- Norte III

En la Planta se reciben y procesan un promedio de 1.100 toneladas por día de RSU provenientes de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (C.A.B.A). Esta cantidad

equivale aproximadamente a un 35% de los residuos domiciliarios generados por los habitantes de la ciudad.

Figura 15. Recepción y descarga de residuos en la Planta TMB Norte III

Figura 16. Movimiento de los residuos en la fosa de recepción.

6.1.1. Separación mecánica de la fracción orgánica en la Planta TMB Norte-III

En la etapa mecánica del proceso, se separa la fracción de residuos de menor tamaño mediante cilindros rotativos conformados por mallas de determinada dimensión de apertura (trommels).

El tamaño de esta fracción fina queda determinado por la última malla, la cual presenta orificios de sección cuadrada de 50 mm de lado. Este tamaño de apertura permite captar por sus orificios un alto porcentaje de los residuos orgánicos putrescibles que se encuentran en los residuos que ingresan a la Planta.

Posterior a su selección por volumen, esta fracción fina pasa por un separador magnético que retira gran parte de los metales ferrosos que pudiera haber, quedando finalmente una fracción de residuos que denominamos “fracción orgánica separada” (FOS). Esta FOS es la que será posteriormente sometida al tratamiento biológico.

Figura 17. Separación mecánica por cribado en equipo trommel

Figura 18. Vista interna del equipo trommel

La FOS contiene un alto porcentaje de residuos orgánicos putrescibles, pero también contiene porcentajes bajos de otros restos, que por su tamaño y forma lograron superar las etapas de retención mencionadas. Es debido a esto, que la FOS se compone en su mayoría por residuos orgánicos putrescibles correspondientes a restos de alimento y restos de jardinería domiciliaria y un pequeño porcentaje compuesto por plástico, vidrio, piedra, metales y otros residuos.

Figura 19. Fracción orgánica separada (FOS)

La fracción de residuos orgánicos, contenida dentro de la FOS, que corresponde a los restos orgánicos putrescibles la denominamos fracción orgánica putrescible (FOP).

6.2. Toma de muestras y análisis

6.2.1. Caracterización de la FOS

Se separaron 70 kg de FOS para analizar su composición y se realizó un cuarteo de esta muestra y luego se tomaron 10 kg para su caracterización.

Figura 20. Muestreo de fracción orgánica separada (FOS)

A continuación, en la Tabla 2 se detallan las fracciones encontradas y su proporción en la muestra:

Tabla 2. Composición de la fracción orgánica separada (FOS)

Componentes FOS	%
orgánicos ≤ 25 mm	62,67
orgánicos > 25 mm	18,14
papel	5,44
piedra	3,21
plásticos	3,05
vidrio	2,52
hueso	1,85
metales	1,61
textil	1,29
tetrabrick	0,22
Total	**100**

Componentes FOP

Fuente: Elaboración propia

Se tomaron como componentes de la FOP las fracciones: orgánicas, papel y hueso (88,1 %).

6.2.2. Estimación del tonelaje de la FOP

Se realizó una estimación de la cantidad de toneladas que corresponden a la FOP sobre el total de toneladas de RSU que ingresan y son procesadas en la Planta. Para su estimación se tomaron las siguientes hipótesis:

- Residuos procesados: 1.100 t/día - 328.900 t/año.

- Fracción orgánica separada (FOS): 56% del total de los residuos procesados (Es el porcentaje promedio de FOS correspondiente a la operación de la Planta TMB-Norte III durante el año 2016).

- Fracción orgánica separada (FOP): 88,1% del total de la FOS.

Luego,

FOP = 328.900 t/año x (56%) x (88,1%)

FOP = 162.266 t/año

Figura 21. Diagrama de las distintas fracciones de residuos

6.2.3. Análisis de las FOP y determinación del Potencial de Biometano

Se realizó una toma de muestra de 50 kg de FOS. Se cuarteó la muestra, luego se separaron y se rotularon las siguientes submuestras:

- **SC (sustrato crudo):** Se separó 4kg, se lo trituró, tamizó y se lo mandó a analizar en laboratorio.

- **SBE (sustrato bioestabilizado):** Se separó 18 kg y se lo colocó en dos bolsas de arpillera para diferenciarlas del resto de material. Luego se las ubicó en distintas profundidades y alturas del biomódulo. Seguidamente se realizó un proceso aeróbico de 21 días. Al finalizar el tratamiento, se retiraron las bolsas del módulo, se mezcló el contenido de ambas, se realizó un cuarteo y se tomó

una muestra de 4 kg, que luego se trituró, tamizó y se envió a analizar en laboratorio.

Figuras 22 y 23. Preparación de las muestras FOP

Ensayo de Determinación del Potencial de Biometano de las FOP

Las muestras se llevaron a analizar al cTAE (Centro de Tecnologías Ambientales y Energía) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.

Los ensayos consistieron en una primera caracterización físico-química de las muestras y del inóculo, donde las determinaciones se realizaron con los métodos APHA (1999) [17], excepto DQO (para el inóculo) que se aplicó la norma ASTM D-1252.0.

Luego, se realizó el ensayo para la determinación del PBM, de acuerdo al protocolo estandarizado Holliger y colab. (2016) [18],. En el Anexo 2 se presenta el informe de los ensayos realizados. Los resultados del ensayo se presentan a continuación en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados del ensayo de las muestras – Informe cTAE

Ensayo	Muestra	PBM mL $CH_{4\ CNPT}$/g SV	Diferencia %
E2-A	SC	179,5 ± 2,5	17,7
	SBE	147,7 ± 4,7	
E2-B	SC	193,3 ± 3,3	18
	SBE	158,5 ± 2,3	

Fuente: Elaboración propia según Informe de ensayo cTAE

Se realizaron dos ensayos sobre las éstas muestras, E2-A y E2-B. Los resultados de ambos ensayos cumplieron con los criterios de para aceptación de los valores experimentales obtenidos según el protocolo. El informe del cTAE define que la diferencia de PBM entre ambas muestras es de 17, 9%.

Para el desarrollo de esta tesis, se decidió renombrar las muestras SC y SBE, como FOP_{crudo} FOP_{bio} respectivamente.

FOP_{crudo}: Fracción orgánica putrescible a la que aún no se le ha aplicado el tratamiento biológico.

FOP_{bio}: Fracción orgánica putrescible a la que se le ha aplicado el tratamiento biológico.

Según el resultado obtenido del ensayo, la FOP_{bio} tiene un potencial de producción de metano 17,9% inferior al de la FOP_{crudo}.

7. EMISIONES POTENCIALES DE GEI ASOCIADAS A LA FOP

Las emisiones potenciales de GEI asociadas FOP corresponden a aquellas que se generarían debido a su descomposición en forma anaeróbica en el relleno sanitario.

En esta tesis se expresaron estas emisiones en toneladas de CO_2 eq, por ser la unidad comúnmente utilizada, pudiendo ser expresadas en otras unidades de otro GEI (ver Tabla 1). Las emisiones de los diferentes GEI que se evalúan deben ser

referenciadas a dicho gas, multiplicándose por su correspondiente índice de Potencial de Calentamiento Global **PCG** (acrónimo del inglés **Global-warming potential** - GWP).

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos se realizó una estimación de las emisiones potenciales de GEI asociadas a la FOP_{crudo} y $FOP_{bio.}$ Para el cálculo se utilizaron los valores correspondientes al ensayo E2-B, pudiéndose haber utilizado cualquiera de los dos. A continuación se presentan los resultados obtenidos para el período de un año de operación:

Tabla 4. Emisiones potenciales de GEI asociadas a la FOP cruda

FOP_{crudo} (t/año)	% SV FOP_{crudo}	PBM $_{crudo}$ (t $CH_{4\ CNPT}$/ t SV_{crudo})	Emisiones FOP $_{crudo}$ (t CO_2 eq/año)
165.312	0,2500	0,1380	**119.759**

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Emisiones potenciales de GEI asociadas a FOP $_{bio}$

FOP_{bio} (t/año)	% SV FOP_{bio}	PBM $_{bio}$ (t $CH_{4\ CNPT}$/ t SV_{bio})	Emisiones FOP $_{bio}$ (t CO_2 eq/año)
165.312	0,3100	0,1131	**121.767**

Fuente: Elaboración propia

De los resultados se observa que las emisiones asociadas a la FOP_{bio} son mayores que las correspondientes a la $FOP_{crudo.}$ Esto se debe a que el porcentaje de SV resultó superior para la muestra bioestabilizada que para la cruda. Si bien la determinación de SV es una técnica sencilla, la alta heterogeneidad de las muestras sumado al limitado control del proceso de bioestabilización no permite deducir que toda la masa de FOP tuvo un acceso idéntico al proceso de aireación (velocidad, temperatura y humedad relativa del aire). Esto se evidencia en la similitud de los valores de SV tanto para SC como para SBE y en el bajo valor de desvío estandar (Tabla 6).

La explicación de este resultado, se debe al muestreo que corresponde a un sólo lote, que a la vez es muy heterogéneo en su composición. Para resolver esta

diferencia, se analizó los resultados de todas las mediciones de SV realizados por el laboratorio. A continuación se presentan los valores medidos en laboratorio para cada muestra:

Tabla 6. Valores experimentales de %SV de ensayo de las muestras – Informe cTAE

Ensayo	% SV				
SC E-2A	0,2691	0,2609	0,2584		
SC E-2A	0,2691	0,2609	0,2584		
SBE E-2A	0,3129	0,3303	0,321		
SC E-2B	0,2227	0,2263	0,2691	0,2609	0,2584
SBE E-2B	0,3037	0,2969	0,3129	0,3303	0,321
Promedio	0,28				
Desvio std	0,03				
Max	0,3303				
Min	0,2227				

Fuente: Elaboración propia según informe de ensayo cTAE.

Analizando estos valores experimentales, y contemplando la incertidumbre asociada a la heterogeneidad de la muestra, se decidió tomar un valor promedio de % SV (%SV: 0,28) y volver a estimar las emisiones potenciales de GEI asociadas a la FOP_{crudo} y $FOP_{bio.}$ para un año de operación.

Tabla 7. Emisiones potenciales de GEI asociadas a la $FOP_{cruda\ (\%SV:0,28)}$

FOP_{crudo} (t/año)	% SV FOP_{crudo}	PBM $_{crudo}$ (t $CH_{4\ CNPT}$/ t SV $_{crudo}$)	Emisiones FOP $_{crudo}$ (t CO_2 eq/año)
165.312	0,2800	0,1380	**134.131**

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8. Emisiones potenciales de GEI asociadas a $FOP_{bio(\%SV:0,28)}$

FOP_{bio} (t/año)	% SV FOP_{bio}	PBM $_{bio}$ (t $CH_{4\ CNPT}$/ t SV $_{bio}$)	Emisiones FOP $_{bio}$ (t CO_2 eq/año)
165.312	0,2800	0,1131	**109.983**

Fuente: Elaboración propia

7.1. Comparación de emisiones poteciales de GEI de las FOP

Se compararon las estimaciones de las emisiones potenciales de GEI asociadas a las FOP evaluadas, y se calculó la diferencia que se obtendría al aplicar el tratamiento biológico a la FOP en la Planta de TMB-Norte III.

Se presentan a continuación los resultados obtenidos de los cálculos para el período de un año de operación.

Tabla 9. Ahorro de emisiones de GEI por aplicación del tratamiento biológico

FOP (t/año)	Emisiones FOP $_{crudo}$ (t CO_2 eq/año)	Emisiones FOP $_{bio}$ (t CO_2 eq/año)	Ahorro Emisiones (t CO_2 eq/año)
165.312	134.131	109.983	**24.148**

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a las estimaciones realizadas, se indica que el ahorro de emisiones potenciales de GEI para un año de operación sería de 24.148 t CO_2 eq.

8. EMISIONES DE GEI ASOCIADAS A LA OPERACIÓN DE LA PLANTA TMB

Se realizó el cálculo de la generación de emisiones de GEI correspondiente al consumo de combustible y de energía eléctrica asociados a la operación de la Planta TMB-Norte III.

Para la determinación las emisiones, se utilizaron las herramientas brindadas por el *"Clean Development Mechanism"* (CDM) del UNFCCC *"United Nations Framework Convention on Climate Change"*.

Las emisiones de GEI asociadas a la operación, se dividen en directas e indirectas.

- **Emisiones directas de la operación:** Corresponden a aquellas que se generan in situ, producto del consumo de combustibles de los equipos que intervienen en la operación.

- **Emisiones indirectas de la operación:** Corresponden a aquellas emisiones producidas en la fuente, producto de la generación de energía eléctrica consumida en la operación.

8.1. Estimación de emisiones directas

Para la estimación de las emisiones directas de la operación se utilizó la siguiente herramienta:

"**Tool to calculate project or leakage CO_2 emissions from fossil fuel combustion (Version 02)**"

El modelo plantea que las emisiones directas de GEI son calculadas a partir de la siguiente ecuación:

$$\mathbf{PE_{FC,j,y,} = \sum_j FC_{j,j,y} \times COEF_{i,y}} \qquad \textbf{(1)}$$

Se detalla a continuación la referencia de cada término de la ecuación:

$PE_{FC,j,y}$ emisiones de CO_2 procedentes de la combustión de combustibles fósiles en el proceso j durante el año y (tCO_2/año)

$FC_{j,j,y}$ cantidad de combustible tipo i quemado en el proceso j durante el año y (masa o volumen / año)

$COEF_{i,y}$ coeficiente de emisión de CO_2 del tipo de combustible i en el año y (tCO_2/unidad de masa o volumen)

Esta herramienta de cálculo permite estimar las emisiones de GEI asociadas a la combustión de combustibles fósiles en función de la cantidad y del tipo de combustible utilizado. Para correr el modelo, se utilizó el dato del consumo de combustible en la operación de la Planta TMB durante el año 2016.

<u>Consumo de combustible en la operación **$FC_{j,j,y}$**</u>

El combustible que utilizan los equipos móviles que operan la planta es gasoil en todos los casos.

Se presenta a continuación un relevamiento de los equipos móviles que operan en la Planta TMB-Norte III, y su consumo de combustible en el año 2016.

Tabla 10. Consumo de combustible por equipos. Operación Planta TMB-Norte III, año 2016

Año	Mes	Equipo (consumo en litros de gasoil)													
		Pala Cargadora			Mini Pala		Auto Elevador		Enlonador	Cigüeña	Barredora	Calentador	Calentador Planta	Pulpo Móvil	Sub Total (L)
		L5115	L5116	C5119	L5117	C5118	L5915	Y5917							
2016	Ene	858	1.468	991	170	750	219	610	140	163	0	0	0	4.086	**9.455**
	Feb	467	0	2.092	188	1.003	98	570	101	168	0	0	0	4.432	**9.119**
	Mar	925	290	2.669	63	1.001	39	659	174	0	0	0	0	4.553	**10.373**
	Abr	919	500	2.027	393	1.024	296	386	122	54	194	0	0	4.606	**10.521**
	May	1.126	397	2.451	357	589	527	482	119	152	204	0	0	5.026	**11.430**
	Jun	1.318	660	2.616	95	983	55	579	131	103	18	252	0	4.767	**11.577**
	Jul	669	729	2.714	223	926	0	626	109	55	159	382	240	5.235	**12.067**
	Ago	272	1.312	2.716	397	359	338	497	119	29	69	350	49	4.711	**11.218**
	Sep	506	380	2.583	92	738	175	577	172	77	138	253	135	5.032	**10.858**
	Oct	923	0	2.791	126	861	34	615	117	48	99	58	0	4.866	**10.538**
	Nov	587	0	2.737	33	936	0	536	89	45	88	45	21	4.967	**10.084**
	Dic	300	0	2.971	46	921	137	412	125	22	34	0	0	4.618	**9.586**
Totales															**126.826**

Fuente: Elaboración propia según datos relevados de la Planta TMB-Norte III durante el año 2016

El total de gasoil consumido en el año 2016 por los equipos operativos de la Planta TMB-Norte III fue de **126.826 litros.**

<u>Cálculo de las emisiones directas generadas en la operación</u>

Se presenta a continuación el cálculo de las emisiones directas de CO_2 eq por consumo de combustible en la operación de la Planta.

Se describe el cálculo de término **COEF** de la ecuación **(1)**

$$\mathbf{COEF_{i,y} = W_{c,i,y} \times \rho_{i,j} \times 44/12} \qquad \mathbf{(2)}$$

Donde:

$W_{c,i,y}$ Fracción de masa media ponderada de carbono en el tipo de combustible i en el año y (tC/unidad de masa del combustible).

$\rho_{i,j}$ Densidad media ponderada del tipo de combustible i en el año y (unidad de masa / unidad de volumen del combustible).

i Tipos de combustibles quemados en el proceso j durante el año y.

44 Peso molecular del CO_2.

12 Peso molecular del C.

Se presentan los valores de los términos de la ecuación **(2)** para el combustible consumido en los equipos móviles que operan en la planta.

Tabla 11. Parámetros del Gasoil para el cálculo del COEF

Combustible i	Wc,i,y	ρi,y (tn/lt)
Gasoil	0,86	0,00084

Elaboración propia

Fuente **Wc,i,y** *http://www.engineeringtoolbox.com/co2-emission-fuels-d_1085.html*

ρi,y *http://www.ypf.com/ProductosServicios/Documents/Diesel-500.pdf*

Luego,

$COEF_{i,y}$ = 0,86 X 0,00084 x 44/12 **(2)**

$COEF_{i,y}$ = 0,0026488 tCO_2/lt

Se reemplazan estos valores en la ecuación del modelo **(1)**:

$PE_{FC,j,y}$ = 126.826 l/año x 0,0026488 t CO_2/l

$PE_{FC,j,y}$ = 335,94 t CO_2 eq/año

Se estima una cantidad de **335,94 t** de CO_2 eq, asociadas al consumo de combustible de los equipos de la planta TMB-Norte III para el período de un año de operación.

8.2. Estimación de emisiones indirectas

Para la estimación de las emisiones indirectas de la operación se utilizó la siguiente herramienta:

"Tool to calculate baseline, project and/or leakage emissions from electricity consumption" (**Version 01)**

El modelo plantea calcular las emisiones indirectas a partir de la siguiente ecuación:

$$PE_{EC,y,} = \sum_j EC_{PJ,j,y} \times EF_{EL,j,y} \times (1+TDL_{j,y}) \quad (3)$$

Se detalla a continuación la referencia de cada término de la ecuación:

$PE_{EC,y,}$ Emisiones procedentes del consumo de energía eléctrica durante el año y (tCO_2/ año).

$EC_{PJ,j,y}$ Cantidad de electricidad consumida por la fuente de consumo eléctrico del proyecto j en el año y (MWh/año).

$EF_{EL,j,y}$ Factor de emisión para la generación de electricidad para la fuente j en el año y (tCO_2 /MWh).

$TDL_{j,y}$ Promedio de pérdidas técnicas de transmisión y distribución por la provisión de electricidad a la fuente j en el año y.

Esta herramienta de cálculo permite estimar las emisiones de GEI asociadas al consumo de energía eléctrica, proporcionando opciones de adopción de valor de los parámetros según el proyecto a evaluar y el acceso a la información con que se cuente. Estas opciones apuntan a proporcionar flexibilidad a los estudios de proyecto, al tiempo que garantizan que la estimación de las de emisiones sea conservadora.

Algunas opciones ofrecen estimaciones aproximadas de las de emisiones y se basan en valores predeterminados conservadores o simplificaciones conservadoras por *default,* mientras que también los parámetros pueden tomar valores específicos que requieren datos más precisos de un proyecto o de un país específico.

En esta tesis se optó por minimizar el uso de parámetros por *default*, con el objetivo de que los resultados obtenidos sean lo más cercano posible a la realidad de la gestión donde se esta aplicando.

Para correr el modelo ello se utilizó el dato del consumo de energía eléctrica en la operación de la Planta TMB durante el año 2016, el factor de emisión para la generación de energía eléctrica y el factor promedio de pérdidas en la transmisión y distribución de la energía en la Argentina.

Consumo de energía eléctrica en la operación

Se presenta en la tabla 12 el consumo de energía eléctrica total de las instalaciones de la Planta TMB-Norte III, para la operación del año 2016.

Tabla 12. Energía eléctrica consumida en la Planta TMB-Norte III en el año 2016

Año	Mes	Energía eléctrica (KWh)
2016	ene	359.234
	feb	358.585
	mar	379.150
	abr	313.242
	may	388.337
	jun	315.734
	jul	338.634
	ago	325.923
	sep	362.061
	oct	336.804
	nov	284.130
	dic	341.985
	Total	**4.103.819**

Fuente: Elaboración propia según datos relevados de la Planta TMB-Norte III durante el año 2016

El total de energía eléctrica consumida en el año 2016 por las instalaciones de la Planta TMB-Norte III fue de **4.103.819 KWh.**

Factor de emisión para la generación de electricidad

El factor de emisión de GEI correspondiente a la generación de energía eléctrica en la Argentina, fue consultado en la página web del Ministerio de Minería y Energía de la Nación [19].

Se tomo el valor de 0,487t de CO_2 eq por MWh generado, que corresponde al factor de emisión para el año 2015, que corresponde al último año disponible en la fuente consultada.

Factor promedio de pérdidas técnicas de transmisión y distribución por la provisión de electricidad

El factor de pérdidas de energía en la transmisión y distribución de la electricidad, desde su generación hasta el centro de consumo, se tomó de una publicación del Banco Mundial. El factor promedio publicado por ese organismo para la Argentina, es de 0,16, para el año 2012 [20].

Se Reemplazan estos valores en la ecuación **(3)**:

$PE_{EC,y,}$= 4.103,81 MWh x 0,487 t CO_2 / MWh (1+0,16)

$PE_{EC,y,}$= 2.318 t CO_2

Se estima una cantidad de **2.318** t CO_2 eq, asociadas al consumo de energía eléctrica de las instalaciones de la planta TMB-Norte III para el período de un año de operación.

8.3. Emisiones de GEI asociadas a la operación de la Planta TMB-Norte III

Se presentan en la siguiente tabla las emisiones de GEI asociadas a la operación de la Planta TMB-Norte III, en un período de un año.

Tabla 13. Emisiones asociadas a la operación de la Planta TMB-Norte III

Residuos procesados (t/año)	Emis. indirectas (t CO_2 eq/año)	Emis. directas (t CO_2 eq/año)	Emisiones operación (t CO_2 eq/año)
328.900	2.318	336	2.654

Fuente: Elaboración propia

Se estima que las emisiones asociadas a la operación de la Planta TMB-Norte III serían de **2.654** t CO_2 eq, para el período de un año de operación.

9. BALANCE DE EMISIONES POTENCIALES DE GEI ENTRE ESCENARIOS

Se realizó una comparación de las emisiones potenciales de GEI entre escenarios (con y sin la aplicación del tratamiento biológico de la Planta TMB-Norte III).

- **Escenario 1: Sin aplicación de TMB** (se estiman emisiones de GEI asociadas a la disposición final en relleno sanitario de la FOP_{crudo})
- **Escenario 2: Con aplicación de TMB** (se estiman emisiones de GEI asociadas a la disposición final en relleno sanitario de la FOP_{bio} + emisiones de GEI asociadas a la operación de la Planta TMB- Norte III)

Se presenta la comparación entre las emisiones de CO_2 eq netas, asociadas a los escenarios 1 y 2, para el período de un año.

Tabla 14. Comparación de emisiones de GEI asociadas a los escenarios 1 y 2

FOP (t/año)	Escenario 1	Escenario 2	Ahorro Neto Emisiones (t CO2 eq/año)
	Emisiones FOP_{crudo} (t CO_2 eq)	Emis. FOP_{bio} + Emis. operación (t CO_2 eq/año)	
165.312	134.131	112.637	**21.493**

Fuente: Elaboración propia

Se estima un ahorro en emisiones de GEI de **21.493** t CO_2 eq por año de desarrollarse el escenario 2, que corresponden a una disminución del **16 %** respecto al escenario 1.

10. EMISIONES DÍNAMICAS DE GEI

Se realizó la modelización de la generación de emisiones de GEI en el tiempo para los escenarios planteados en el capítulo anterior, contemplando las emisiones en la etapa de disposición final y las correspondientes a la operación de la Planta TMB-

Norte III. Modelizar en el tiempo la generación de emisiones permite obtener un resultado dinámico como se producirían en la realidad, y de la forma en que deben ser contabilizadas las emisiones de GEI para los inventarios anuales.

Las emisiones asociadas a la operación de la Planta TMB son generadas al mismo tiempo que la operación se va desarrollando, ya que estás corresponden al consumo de energía eléctrica y de combustible. Para estas emisiones se va a tomar el valor obtenido en el capítulo 8 y se lo supondrá como un valor constante a lo largo de los años de operación de la planta.

En la etapa de disposición final en el relleno sanitario la generación de emisiones de GEI se producen de forma diferente. Estas emisiones producto de la descomposición de los residuos en condiciones anaeróbicas, se van sucediendo a lo largo de unas pocas décadas, durante las cuales se forman el CH_4 y CO_2. Si las condiciones permanecen constantes, el índice de producción del CH_4 depende únicamente de la cantidad de carbono restante en los desechos. De aquí resulta que las emisiones de CH_4 generadas por los desechos depositados en un relleno sanitario son las más altas durante los primeros pocos años siguientes a la eliminación y que, luego, éstas decaen a medida que el carbono degradable de los desechos es consumido por las bacterias responsables de la descomposición (IPCC; 2006)

Para el cálculo las emisiones correspondientes a cada escenario se modelizaron las emisiones de GEI dinámicas que se producirían en la etapa de disposición final producto de la descomposición de la FOP. Para el caso del escenario 2, a estas emisiones se le sumaron las correspondientes asociadas a la operación de la planta TMB.

La generación dinámica de emisiones de GEI en el módulo se modelizó con la herramienta brindada por el UNFCCC *"United Nations Framework Convention on Climate Change"*, para la estimación de emisiones de GEI en la etapa de disposición final de los residuos sólidos urbanos, basada en las directrices del IPCC *"International Panel of Climate Change":*

Methodological tool 04 "Emissions from solid waste disposal sites" (Version 08.0)

10.1. Descripción del modelo y aclaraciones

Los residuos en el módulo de disposición final se descomponen en condiciones anaeróbicas, generando principalmente CH_4 y CO_2. La velocidad de la descomposición de los residuos orgánicos en el relleno sanitario depende de las condiciones físicas del sitio y del tiempo de operación del módulo hasta su etapa de cierre. El biogas comienza a generarse a los pocos meses de que se encuentra dispuesto en el módulo y aumenta año tras año hasta alcanzar su potencial de generación de metano.

La metodología propuesta toma los lineamientos del IPCC, que se basa en el método "*First Order Decay"* (FOD) para estimar las emisiones de GEI, aproximando el proceso de descomposición a una ecuación de primer orden. El método FOD toma en cuenta los factores de tiempo del proceso de degradación, simulando la degradación que ocurre en los sitios de disposición final, dando como resultado estimaciones de emisiones anuales de GEI expresadas en toneladas de CO_2 equivalente.

La herramienta ofrece el cálculo de las emisiones anuales de un sitio de disposición final, mediante la siguiente ecuación:

$$PE_{CH4,SWDS,y} = \varphi_y \times (1-f_y) \times GWP_{CH4} \times (1-OX) \times 16/12 \times F \times DOC_{f,y} \times MCF_y \times \sum_{i=1}^{m} \sum_{j}^{m} (W_{j,x} \times DOC_j \times e^{-kjx(y-x)} \times (1-e^{-kj})) \quad (1)$$

Se detalla a continuación la referencia de cada parámetro de la ecuación:

$PE_{CH4,SWDS,y}$	Emisiones de metano del Proyecto ocurridas en el año y generadas por residuo dispuesto en el relleno sanitario durante un período de tiempo que termina en el año y(t CO_2e/año)
φ_y	Factor de corrección del modelo para tener en cuenta incertidumbres del modelo para el año y

f_y	Fracción de metano capturado en el relleno sanitario, quemado o utilizado de otra forma que se eviten las emisiones de metano a la atmósfera en el año y
GWP_{CH4}	Potencial de Calentamiento Global para el CH_4 (se usa el valor de 21)
OX	Factor de oxidación (que refleja la cantidad de metano del relleno sanitario que se oxida en el suelo u otro material de cobertura)
F	Fracción de metano en el (fracción de volumen) en el gas de relleno sanitario
$DOC_{f,y}$	Fracción de carbono orgánico degradable (DOC) que se descompone en las condiciones específicas que se producen en los relleno sanitarios para el año y (fracción en peso)
MCF_y	Factor de corrección de metano para el año y
$W_{j,x}$	Cantidad de residuo sólido tipo j dispuesto or no dispuesto en el relleno sanitario en el año y (tn)
DOC_j	Fracción de carbono orgánico degradable en el tipo de residuo j (fracción de peso)
Kj	Tasa de atenuación en la generación de gas de los residuos tipo j (1 /año)
x	Años en que se dispone residuos en el relleno sanitario, que se extiende desde el primer año en el período de tiempo (x = 1) para el año y (x = y)
y	Año del período de acreditación para los que se calculan las emisiones de metano (y es un período consecutivo de 12 meses)

La aplicación del modelo requiere la definición de una serie de parámetros y plantea opciones de cálculo de las emisiones con diferentes grados de exactitud y complejidad en función del acceso a la información con que se cuente para dicho cálculo, teniendo el usuario posibilidad de utilizar valores por "*default*" (pre determinados) en caso de no contar con información local, o por el contrario, utilizar valores calculados con información específica del proyecto.

Algunos de estos parámetros tienen un valor único, por definición, como es el caso del "GWP_{CH4} ", mientras otros presentan opciones en función de las condiciones de contexto de donde se aplique el proyecto, como son las condiciones climáticas de la región, tecnología aplicada, años de operación del módulo, etc.

En esta tesis se optó por minimizar el uso de parámetros por *default*, con el objetivo de que los resultados obtenidos sean lo más cercano posible a la realidad de la gestión donde se esta aplicando. Para ello se requirió relevar información acerca de las condiciones referidas a la construcción y operación del relleno sanitario definido, las condiciones climáticas de la región en donde éste se sitúe, así como también el desarrollo de los siguientes de ensayos y estudios realizados puntualmente para esta tesis:

- Caracterización físico-química de las muestras FOP_{crudo} y FOP_{bio} .
- Determinación del potencial de biometano (PMB) de las muestras de la FOP_{crudo} y FOP_{bio}

En el Anexo 1 se presenta con mayor detalle el desarrollo del modelo y la justificación de los valores adoptados y/o calculados para los parámetros.

10.1.1. Suposiciones realizadas

Se realizaron las siguientes suposiciones para la aplicación del modelo:

1. La FOP es enviada a un módulo de relleno sanitario para su disposición final.
2. El módulo de relleno sanitario recibe únicamente la FOP.

3. El módulo de relleno sanitario es completado y cerrado luego de 5 años de operación.
4. La cantidad de FOP que se dispone en el relleno sanitario es de 162.266 t/año.
5. Las características de construcción y operación del módulo de relleno sanitario fue tomada de los módulos de la CEAMSE.
6. La ubicación del relleno sanitario es en el C.A. Norte III, en el partido de General San Martín, provincia de Buenos Aires.

10.1.2. Emisiones de GEI dinámicas - escenarios

Se realizó una comparación entre las emisiones de GEI dinámica asociada a los escenarios planteados. En el anexo 1 se presentan lo resultados de la corrida del modelo.

- **Escenario 1: Sin aplicación de TMB** (se estiman emisiones de GEI asociadas a la disposición final en relleno sanitario de la FOP_{crudo}).
- **Escenario 2: Con aplicación de TMB** (se estiman emisiones de GEI asociadas a la disposición final en relleno sanitario de la FOP_{bio} + emisiones de GEI asociadas a la operación de la Planta TMB- Norte III).

Se presenta la comparación entre las emisiones dinámicas de GEI asociadas a los escenarios 1 y 2.

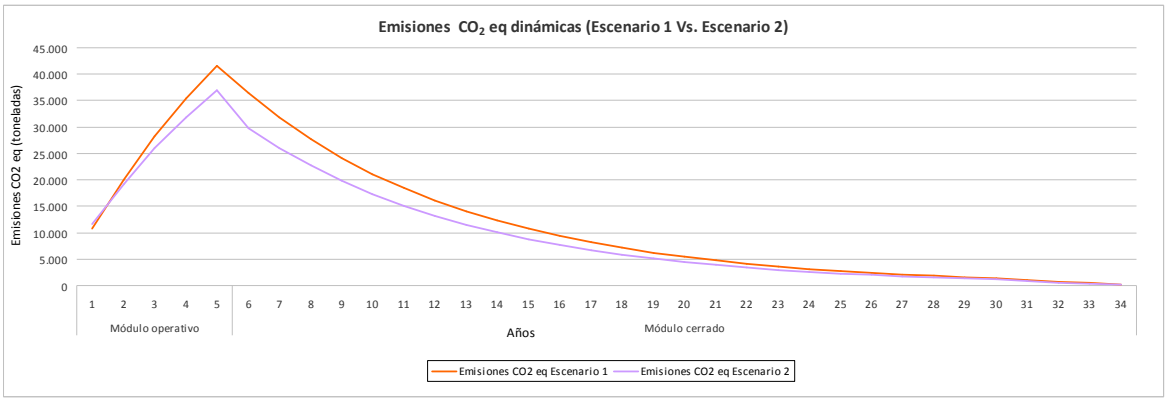

Figura 24. Comparativa de emisiones dinámicas Escenarios 1 y 2

Fuente: Elaboración propia

11. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Del desarrollo del estudio, se desprenden los siguientes resultados y discusiones:

a. El PBM de la muestra FOP_{bio} es un 18% menor que el de la muestra FOP_{crudo}

Los resultados indican una disminución de la producción de metano del 18% en el sustrato sometido al tratamiento biológico durante 21 días.

Tabla 15. Resultados de PBM de las FOP del ensayo

PBM mL $CH_{4\ CNPT}$/g SV	FOP_{crudo}	FOP_{bio}	Diferencia %
	193,3 ± 3,3	158,5 ± 2,3	18

Fuente: Elaboración propia

El ensayo fue realizado según el protocolo estandarizado y cumple con la mayoría de los criterios para aceptar los valores experimentales obtenidos, por lo que no se considera haya un error en su desarrollo.

La bibliografía consultada sobre la tecnología TMB hace mención que el material orgánico tratado biológicamente disminuye su PBM respecto al que no recibe tratamiento. A su vez, señala que este tratamiento no termina por estabilizar este sustrato, por lo que procesos biológicos seguirán ocurriendo cuando estos sean depositados en el relleno sanitario, generando emisiones de gas metano asociadas a su descomposición en condiciones anaeróbicas, aunque en menor cantidad en comparación aquellos residuos orgánicos que no fueran pre-tratados. Los resultados del estudio realizado, en cuanto al comportamiento del sustrato orgánico analizado FOP_{crudo} y FOP_{bio}, corresponden con estos supuestos consultados en la bibliografía.

En cuanto a los resultados en porcentaje de reducción de PBM, no se encontró información bibliográfica sobre valores que permita comparar con los obtenidos en este estudio. Cabe mencionar que una comparación sería relativa, debido a que las composiciones de los residuos, el equipamiento de la plantas, los ensayos de laboratorio, entre otras cuestiones, presentarían importantes diferencias entre sí.

A su vez, para el caso de estudio, nuevos ensayos podrían presentar diferencias en los resultados debido a la heterogeneidad de las muestras y a las condiciones del proceso biológico llevado a cabo, por lo que este resultado no debe ser interpretado como un valor representativo promedio de la eficiencia de la Planta TMB-NorteIII.

b. No se observa una disminución de la materia orgánica biodegradable por el tratamiento biológico aplicado en la muestra.

El porcentaje de S.V. medido para un sólo lote, presentó un mayor valor para el caso de la muestra bioestabilizada que para la cruda.

Analizando los resultados de todas las mediciones experimentales de S.V. realizados por el laboratorio (ver Tabla 6), su promedio y desvío estándar, se interpretó que los S.V. no disminuyeron, por lo menos en valores que puedan ser medidos, producto del tratamiento aplicado, y que la diferencia mayor encontrada en la muestra bioestabilizada se explica en el hecho que las muestras se componen de un material muy heterogéneo.

El hecho de que no pueda observarse una disminución de los sólidos volátiles, indica que el porcentaje de carbono orgánico degradable en el sustrato es similar luego del tratamiento aplicado, revelando que en la muestra estudiada no se produjo un reducción de su cantidad.

c. El balance neto de emisiones potenciales de GEI, simulado en un escenario con operación de la Planta TMB-Norte III, resultó en un ahorro de emisiones totales del 15,85 % respecto a un escenario de gestión donde no se opere la planta.

De la estimación realizada, el balance neto de emisiones totales resultó en un ahorro de 21.493 t CO_2 eq por año.

Tabla 16. Balance de emisiones netas por aplicación del TMB en la Planta Norte-III

Disminución emisiones por TMB (t CO_2 eq/año)	Aumento de emisiones por TMB (t CO_2 eq/año)	Balance Neto de emisiones (t CO_2 eq/año)
24.148	2.654	21.493

Fuente: Elaboración propia

Las emisiones correspondientes a la operación, representan un 10,1% aproximadamente de las emisiones potencialmente reducidas por la aplicación del tratamiento biológico, en donde el efecto del tratamiento biológico medido fue de una reducción del PBM del 18%. Para estos resultados, el balance de emisiones resultaría negativo únicamente para reducciones de PBM de la FOP_{bio} menores al 1,98%.

d. Las emisiones de GEI correspondientes a las descomposición en condiciones anaeróbicas de la FOP en la etapa de disposición final se producen en el tiempo, conforme se vaya degradando en el modulo de relleno sanitario.

La degradación del carbono orgánico en condiciones anaeróbicas se va sucediendo en el tiempo, representándose por una ecuación cinética de primer orden.

El fundamento de una reacción de descomposición de primer orden es que la tasa o velocidad de reacción es proporcional a la cantidad de sustancia reactante restante (Barrow y Gordon, 1996), en este caso, la masa del carbono orgánico degradable disuelto (susceptible de descomposición) bajo condiciones anaeróbicas.

Se observa que las emisiones alcanzan su pico en el primer año de su disposición en el módulo de relleno sanitario, y luego estas decaen a medida que el carbono degradable de los residuos es consumido por las bacterias responsables de su descomposición, observándose un tiempo aproximado de 30 años.

12. CONCLUSIONES

De los resultados expuestos y del desarrollo del estudio se desprenden las siguientes conclusiones:

Los resultados del estudio realizado en cuanto al comportamiento del sustrato orgánico analizado, corresponden con los supuestos consultados en la bibliografía.

Los ensayos realizados mostraron una reducción del 18% del PBM de la muestra que fue tratada biológicamente respecto de la que no, mostrando una disminución de la producción de metano producto del tratamiento aplicado en la Planta TMB-Norte III a los RSU de C.A.B.A.

Respecto al estudio realizado, es importante resaltar que esta tesis no se encuentra en condiciones de generalizar este resultado para esta tecnología y ni aún para el caso de estudio, debido a los siguientes factores:

- La muestra ensayada solo puede ser tomada como una medición puntual. Los ensayos son escasos para poder inferir un resultado acerca del porcentaje de reducción de emisiones que se estaría produciendo con este tratamiento.
- La composición de los RSU es muy heterogénea y la caracterización físico-química de otras muestras podrán diferir de la analizada.
- Los procesos biológicos son complejos y sensibles a sus condiciones en donde se desarrollan. En la Planta TMB-Norte III existen 16 módulos que tratan la fracción orgánica y que pueden presentar diferencias en su operación. A su vez, cada proceso biológico, por más que se realice en el mismo módulo, resultará único por la naturaleza de su desarrollo.

Los procesos biológicos que se desarrollan en condiciones anaeróbicas en el relleno sanitario, generan gas metano producto de la degradación del sustrato pre-tratado por el TMB, debido a que el residuo aún contiene cierto contenido orgánico degradable y sustancias orgánicas refractarias, aunque en menor cantidad en comparación con el residuo orgánico no tratado.

El balance neto de emisiones realizado, comparando las emisiones estimadas que podían ser reducidas y las emisiones generadas por la operación de la planta, resultó ser positivo, lo que se traduce en un ahorro en el total de emisiones de GEI en un escenario en donde opere la Planta TMB-Norte III, siendo las emisiones

correspondientes a la operación de la planta del orden del 12% aproximadamente de las emisiones reducidas.

Para el estudio realizado, únicamente este balance podría ser negativo, si la reducción de PBM de la FOP_{bio} alcanzada hubiera sido menor al 2,15%, lo que sería un resultado poco esperado según la bibliografía que hay sobre el tema.

12.1. Lecciones aprendidas y aportes:

Esta tesis presenta un abordaje metodológico para el estudio de efecto del TMB sobre el potencial de metano que no venía siendo analizado hasta el momento sobre la Planta TMB-Norte III, que a su vez, es la primera experiencia de aplicación de esta tecnología en la Argentina.

El desarrollo de este estudio se llevó a cabo con la medición y análisis de solo una muestra, lo cual resulta insuficiente para evaluar dicha tecnología y el proceso realizado en la Planta TMB-Norte III, sin embargo, el aporte de esta tesis cobra importancia desde el punto de vista que se propone una metodología de análisis basada en la selección y aplicación de técnicas de ensayo estandarizadas y herramientas de cálculo presentadas por organismos idóneos en la temática.

Se espera que esta tesis nutra a próximos estudios complementarios en donde se cuente con mayor número de muestras analizadas que permitan disminuir el grado de incertidumbre y generar nuevas conclusiones sobre este caso en particular u otros.

A nivel general, esta tesis contribuye en el aporte de información sobre el PBM de los RSU, el cual representa un factor importante para la elaboración de inventarios nacionales de emisiones de GEI, para el conocimiento de su impacto y para la identificación de potenciales acciones de mitigación.

Sus resultados también aportan información que puede resultar importante para las factibilidades técnicas de proyectos de captación de biogas, digestión anaeróbica y de aprovechamiento del biogas como energía.

A nivel particular, se espera que los resultados de esta tesis contribuyan a generar nuevos estudios que permitan mejorar las condiciones de operación de la Planta TMB-Norte III y el efecto de su aplicación respecto a las emisiones de GEI asociadas a los RSU, a partir de intervenir en las variables de los procesos biológicos desarrollados, buscando su optimización y eficiencia, a fin de lograr los mejores resultados posibles con la tecnología que se dispone.

13. REFERENCIAS

[1]. IPCC (2007). Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change : Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Lead Authors: Mohammed Abdelrafie Ahmed (Sudan), Cristobal Diaz (Cuba), Andre Faaij (The Netherlands), Qingxian Gao (China), Seiji Hashimoto (Japan), Katarina Mareckova (Slovakia), Riitta Pipatti (Finland), Tianzhu Zhang (China)

Disponible en:

https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg3/ar4-wg3-chapter10.pdf

[2] SAyDS (2015). Presentación de Resultados Componente 1: Aprovechamiento del Potencial Nacional para la Mitigación del Cambio Climático. Ing. Amb. María Sol Aliano Ing. Ind. Sebastián Galbusera Proyecto Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático a la CMNUCC. 30 de junio de 2015

Disponible en:

http://www.ambiente.gov.ar/archivos/web/ProyTerceraCNCC/file/Final%20Mitigaci%C3%B3n.pdf

[3] Éxito Empresarial 257 (2017) 1-4. Steinvorth A., Tratamientos mecánico-biológicos y su aporte al manejo integral de residuos sólidos municipales, CEGESTI,

[4] CMNUCC (1992). Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático Disponible en: https://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/pdf/convsp.pdf

[5] IPCC (2007). Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza.

[6] IPCC [Base de datos en línea]. Publicaciones y Data: ¿Que es el efecto invernadero? [Consulta: 20-7-2015].

Disponible https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/faq-1-3.html

[7] CMNUCC (1992). Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático Disponible en: https://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/pdf/convsp.pdf

[8]. IPCC [Base de datos en línea]. Publicaciones y Data: ¿Cómo contribuyen las actividades humanas a los cambios climáticos? y ¿Cómo se comparan con las influencias humanas

[Consulta: 20-7-2015].

Disponible en: https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/faq-2-1.html

[9]. IPCC [Base de datos en línea]. Publicaciones y Data: Gases de efecto invernadero

[Consulta: 20-7-2015].

Disponible en: https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/tssts-2-1.html

[10]. Portal Sustentabilidad y Desarrollo [Base de datos en línea].

[Consulta:21-7-2015].

Disponible en http://sustentabilidadydesarrollo.com/2015/01/30/el-cambio-climatico-cronologia-de-negociaciones/

[11].Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable – Presidencia de la Nación Argentina [Base de datos en línea].Dirección de Cambio Climático – Aspectos básicos del Cambio Climático

Disponible en: http://www.ambiente.gov.ar/?idarticulo=4573

[12]. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente – Gobierno de España. [Base de datos en línea]. Cambio Climático - ¿Qué es el cambio climático y cómo nos afecta?

Disponible en: http://www.magrama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/que-es-el-cambioclimatico-y como nos-afecta/

[13]. GTZ-Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit - Sector Project Mechanical-biological Waste Treatment Final Report

Disponible en: https://www2.giz.de/dokumente/bib/04-5732.pdf

[14]. The Role of Mechanical and Biological Treatment in Reducing Methane Emissions from Landfill Disposal of Municipal Solid Waste in the United Kingdom (Jilang Pan & Nickolaos Voulvoulis) (Published online: 29 Feb 2012.)

[15]. IFAS – Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft, Schellerdamm. “Methane emissions from MBT landfills” (K.-U. Heyer , K. Hupe 1, R. Stegmann)

[16]. The Effect of Mechanical and Biological Pretreatment on Landfill Leachate Quality ((Bone, B.D.; Knox, K.; Picken, A.; Robinson H.D.) In Proceedings of the 9th International Waste Management and Landfill Symposium, CISA: Cagliari, Sardinia, 2003; Paper 454.)

[17]. APHA (1999). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20th ed. Washington, DC.American Public Health Association.

[18]. Towards a standardization of biomethane potential tests. Water Science & Technology, 74-11, 2515-2522. doi:10.2166/wst.2016.336.

[19]. Ministerio de Energía y Minería- Presidencia de la Nación - Argentina

[Base de datos en línea]. Cálculo del Factor de Emisión de CO2, de la Red Argentina de Energía Eléctrica.

Disponible en: http://www.energia.gob.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=2311

[20]. Banco Mundial BIRF-AIF. Transmisión de energía eléctrica y pérdidas en la distribución (% de producción).

Disponible en:http://datos.bancomundial.org/indicador/EG.ELC.LOSS.ZS

14. ANEXOS

14.1. Anexo 1: Desarrollo de modelización dínamica de las emisiones de GEI

Se presenta el desarrollo de la herramienta de cálculo utilizada para la modelización dinámica emisiones de GEI en la etapa de disposición final.

Methodological tool 04 "Emissions from solid waste disposal sites"(Version 08.0)

Con la aplicación de esta herramienta se realizó el cálculo de las emisiones de CO_2 eq en la etapa de disposición final de las toneladas en estudio:

FOP_{crudo}: Fracción orgánica putrescible que aún no se le ha aplicado el tratamiento aeróbico denominado bioestabilizado.

FOP_{bio}: Fracción orgánica putrescible que se le ah aplicado el tratamiento aeróbico denominado bioestabilizado.

14.1.1. Descripción del Modelo

La herramienta ofrece el cálculo de las emisiones anuales de un sitio de disposición final, mediante la siguiente ecuación:

$$PE_{CH4,SWDS,y} = \varphi_y \times (1-f_y) \times GWP_{CH4} \times (1-OX) \times 16/12 \times F \times DOC_{f,y} \times MCF_y \times \sum_{i=1}^{m} \sum_{j}^{m} (W_{j,x} \times DOC_j \times e^{-kjx(y-x)} \times (1-e^{-kj})) \quad (1)$$

Se detalla a continuación la referencia de cada término de la ecuación **(1)**

$PE_{CH4,SWDS,y}$	Emisiones de metano del Proyecto ocurridas en el año y generadas por residuo dispuesto en el relleno sanitario durante un período de tiempo que termina en el año y(t CO_2e/año).
φ_y	Factor de corrección del modelo para tener en cuenta incertidumbres del modelo para el año y.
f_y	Fracción de metano capturado en el relleno sanitario, quemado o utilizado de otra forma que se eviten las emisiones metano a la atmósfera en el año y.

GWP_{CH4}	Potencial de Calentamiento Global para el CH_4 (se usa el valor de 21).
OX	Factor de oxidación (que refleja la cantidad de metano del relleno sanitario que se oxida en el suelo u otro material de cobertura)
F	Fracción de metano en el (fracción de volumen) en el gas de relleno sanitario.
$DOC_{f,y}$	Fracción de carbono orgánico degradable (DOC) que se descompone en las condiciones específicas que se producen en los relleno sanitarios para el año y (fracción en peso).
MCF_y	Factor de corrección de metano para el año y.
$W_{j,x}$	Cantidad de residuo sólido tipo j dispuesto or no dispuesto en el relleno sanitario en el año y (t).
DOC_j	Fracción de carbono orgánico degradable en el tipo de residuo j (fracción de peso).
Kj	Tasa de atenuación en la generación de gas de los residuos tipo j (1 / año).
x	Años en que se dispone residuos en el relleno sanitario, que se extiende desde el primer año en el período de tiempo (x = 1) para el año y (x = y).
y	Año del período de acreditación para los que se calculan las emisiones de metano (y es un período consecutivo de 12 meses).

14.1.2. Suposiciones realizadas

Se realizaron las siguientes suposiciones para la aplicación del modelo

1. La FOP es enviada a un módulo de relleno sanitario para su disposición final.
2. El módulo de relleno sanitario recibe únicamente la FOP.

3. El módulo de relleno sanitario es completado y cerrado luego de 5 años de operación.
4. La cantidad de FOP que se dispone en el relleno sanitario es de 162.266 t/año.
5. La construcción y operación del módulo de relleno sanitario es idéntica a la de los módulos de la CEAMSE.
6. La ubicación del relleno sanitario es en el C.A. Norte III, en el partido de General San Martín, provincia de Buenos Aires.

14.1.3. Determinación de los parámetros

A continuación se presenta los valores adoptados para los parámetros y la fundamentación de de su elección.

<u>Parámetros comunes para los escenarios 1 y 2</u>

φ_y **1**. Se tomó el valor *"Default"* que indica el modelo, para "condiciones húmedas" (página 14, Tool04, Methodological tool version 08.0)

f_y **0.** Se le dio valor cero, ya que la modelización de capítulo tiene por intención cuantificar la generación de gas metano en el módulo, sin considerar que ocurrirá después con esa cantidad de gas generada, si es o no captada en el módulo.

GWP_{CH4} **21 tCO_2e/tCH_4**. Es valor definido por el IPCC.

OX **0,1**. Se tomó el valor *"Default"* que indica el modelo (página 1a, Tool04,Methodological tool version 08.0)

MCF_y **1.0.** Se tomo valor *"Default"* que indica el modelo para "sitios de disposición final donde exista una degradación en forma anaeróbica de los residuos, producto del tipo de operación de la celda" (página 15, Tool04, Methodological tool version 08.0)

$W_{j,x}$ **162.266 t/año.** Fración FOP a evaluar, calculada en capítulo 6.

Kj **0,1358.** Se tomo como valor un promedio ponderado de los kj de los componentes identificados como orgánicos putrescibles en la

composición FOS. Los orgánicos >25 y <25 se los sumó y consideró como una mezcla de restos de alimento y restos repoda y jardinería. Luego para el cálculo del promedio ponderado se los diferencio entre "restos de alimento" y "restos de poda y jardinería" en función del porcentaje de composición del indicado en el "Estudio de calidad de los residuos sólidos urbanos en la planta de tratamiento mecánico biologico(TMB)–Norte III, realizado por el Instituto de Ingeniería Sanitaria de la Fiuba, año 2015. Los Valores de kj por componente, se indican en la página 17, Tool04, Methodological tool (version 08.0), para Clima húmedo (MAP/PET >1).

x **1.** Por hipótesis definida de 5 años de operación de disposición en el módulo de relleno sanitario.

y **5.** Por hipótesis definida de 5 años de operación de disposición en el módulo de relleno sanitario.

F **0.55.** Es el valor promedio de fracción de CH_4 en el biogas que se extrae de los módulos de disposición final, en el C.A. Norte III. Se tomo como el valor promedio de las mediciones *"on line"* que se realizan en la planta de generación de energía eléctrica a partir de biogas "Central Buen Ayre"

<u>Parámetros dependientes de calidad de la FOP:</u>

DOC_j Fracción de carbono orgánico degradable en el tipo de residuo j (fracción de peso). Corresponde al valor de sólidos volátiles (SV) en base húmeda (b.h.) de la FOP

$DOC_{f,y}$ Fracción de carbono orgánico degradable (DOC) que se descompone en las condiciones específicas que se producen en los relleno sanitarios para el año y (fracción en peso)

Se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$DOC_{f,y} = 0.7 \times 12/16 \times ((BMP) / (F \times DOC_j)) \quad \textbf{(2)}$$

Donde,

BMP_j Potencial bioquímico de metano para el residuo tipo j dispuesto (t CH4/t residuos).

F Fracción de metano enel (fracción de volumen) en el gas de relleno sanitario.

DOC_j Fracción de carbono orgánico degradable en el tipo de residuo j (fracción de peso).

Se presentan a continuación el desarrollo para la obtención de los valores de estos parámetros, para cada FOP, a partir de los resultados obtenidos en el ensayo.

FOP $_{crudo}$: Fracción orgánica putrescible que aún no se le ha aplicado el tratamiento aeróbico denominado bioestabilizado.

DOC_j **0,28.** Corresponde al valor de sólidos volátiles de mayor valor determinados en el ensayo.

$DOC_{f,y}$

BMP_j **0,038 t CH4 / t FOP_{cruda}**. Se expresó el valor del PBM determinado en el ensayo (capítulo 6), en las unidades t CH4 / t FOP_{cruda}

F **0.55.** Es el valor promedio de fracción de CH_4 en el biogas que se extrae de los módulos de disposición final, en el C.A. Norte III. Se tomo como el valor promedio de las mediciones *"on line"* que se realizan en la planta de generación de energía eléctrica a partir de biogas "Central Buen Ayre"

Reemplazando en la ecuación **(2)**

$DOC_{f,y}$ = 0.7 x 12/16 x ((0,0589) / (0,55 x 0,2495))

$DOC_{f,y}$ **0,1317**

FOP bio: Fracción orgánica putrescible que se le ah aplicado el tratamiento aeróbico denominado bioestabilizado.

DOC_j **0,28.** Corresponde al valor de sólidos volátiles de mayor valor determinados en el ensayo.

$DOC_{f,y}$

BMP_j **0,031 t CH4 / t FOP_{bio}**. Se expresó el valor del PBM determinado en el ensayo (capítulo 6), en las unidades t CH4 / t FOP_{bio}

F **0.55.** Es el valor promedio de fracción de CH_4 en el biogas que se extrae de los módulos de disposición final, en el C.A. Norte III. Se tomo como el valor promedio de las mediciones *"on line"* que se realizan en la planta de generación de energía eléctrica a partir de biogas "Central Buen Ayre"

Se reempla en la ecuación **(2)**

$DOC_{f,y}$ = 0.7 x 12/16 x ((0,045) / (0,55 x 0,3007))

$DOC_{f,y}$ **0,1080**

14.1.4. Corrida del modelo

Se presenta Tabla16 la generación de dinámica de emisiones de CO_2 eq. en el relleno sanitario, asociadas a la disposición final del tonelaje de la FOP_{cruda}.

Tabla 16. Emisiones en el relleno sanitario FOP_{cruda}

Año		Emisiones $FOP_{crudo\ año\ 1}$ (t CO_2 eq)	Emisiones $FOP_{crudo\ año\ 2}$ (t CO_2 eq)	Emisiones $FOP_{crudo\ año\ 3}$ (t CO_2 eq)	Emisiones $FOP_{crudo\ año\ 4}$ (t CO_2 eq)	Emisiones $FOP_{crudo\ año\ 5}$ (t CO_2 eq)	Emisiones generadas por año (t CO_2 eq)
Módulo operativo	1	10.733					10.733
	2	9.370	10.733				20.103
	3	8.180	9.370	10.733			28.282
	4	7.141	8.180	9.370	10.733		35.423
	5	6.234	7.141	8.180	9.370	10.733	41.657
Módulo cerrado	6	5.442	6.234	7.141	8.180	9.370	36.366
	7	4.751	5.442	6.234	7.141	8.180	31.747
	8	4.147	4.751	5.442	6.234	7.141	27.714
	9	3.621	4.147	4.751	5.442	6.234	24.194
	10	3.161	3.621	4.147	4.751	5.442	21.121
	11	2.759	3.161	3.621	4.147	4.751	18.439
	12	2.409	2.759	3.161	3.621	4.147	16.097
	13	2.103	2.409	2.759	3.161	3.621	14.052
	14	1.836	2.103	2.409	2.759	3.161	12.267

Año		Emisiones $FOP_{crudo\ año\ 1}$ (t CO_2 eq)	Emisiones $FOP_{crudo\ año\ 2}$ (t CO_2 eq)	Emisiones $FOP_{crudo\ año\ 3}$ (t CO_2 eq)	Emisiones $FOP_{crudo\ año\ 4}$ (t CO_2 eq)	Emisiones $FOP_{crudo\ año\ 5}$ (t CO_2 eq)	Emisiones generadas por año (t CO_2 eq)
	15	1.603	1.836	2.103	2.409	2.759	**10.709**
	16	1.399	1.603	1.836	2.103	2.409	**9.349**
	17	1.221	1.399	1.603	1.836	2.103	**8.162**
	18	1.066	1.221	1.399	1.603	1.836	**7.125**
	19	931	1.066	1.221	1.399	1.603	**6.220**
	20	813	931	1.066	1.221	1.399	**5.430**
	21	709	813	931	1.066	1.221	**4.740**
	22	619	709	813	931	1.066	**4.138**
	23	541	619	709	813	931	**3.613**
	24	472	541	619	709	813	**3.154**
	25	412	472	541	619	709	**2.753**
	26	360	412	472	541	619	**2.404**
	27	314	360	412	472	541	**2.098**
	28	274	314	360	412	472	**1.832**
	29	239	274	314	360	412	**1.599**
	30	209	239	274	314	360	**1.396**
	31		209	239	274	314	**1.036**
	32			209	239	274	**722**
	33				209	239	**448**
	34					209	**209**
Totales							**415.332**

Fuente: Elaboración propia

Se presenta en la Figura 25 la generación de dinámica de emisiones de CO_2 eq. en el relleno sanitario, asociadas a la disposición final del tonelaje de la FOP_{cruda}.

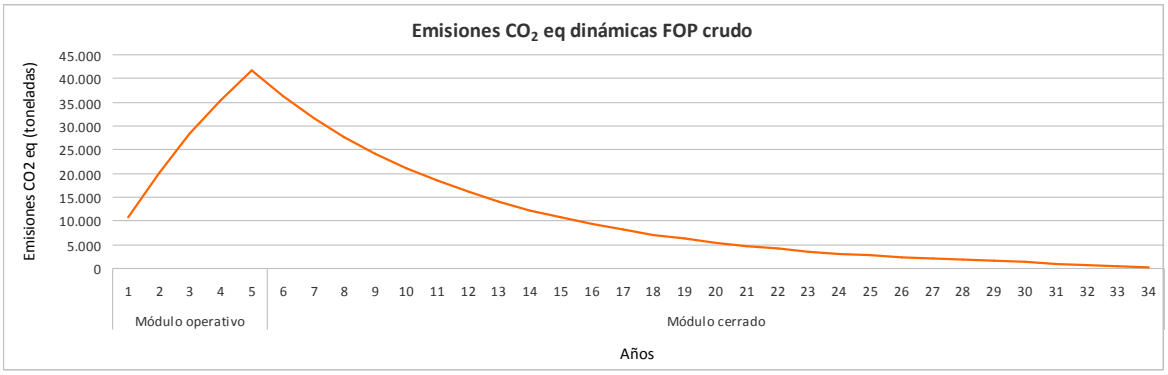

Figura 25. Emisiones el relleno sanitario FOP_{cruda}

Fuente: Elaboración propia

Se presenta en la Tabla 17 la generación de dinámica de emisiones de CO_2 eq. en el relleno sanitario, asociadas a la disposición final del tonelaje de la FOP_{bio}.

Tabla 17. Emisiones en el relleno sanitario FOP_{bio}

Año		Emisiones $FOP_{bio\ año\ 1}$ (t CO_2 eq)	Emisiones $FOP_{bio\ año\ 2}$ (t CO_2 eq)	Emisiones $FOP_{bio\ año\ 3}$ (t CO_2 eq)	Emisiones $FOP_{bio\ año\ 4}$ (t CO_2 eq)	Emisiones $FOP_{bio\ año\ 5}$ (t CO_2 eq)	Emisiones generadas por año (t CO_2 eq)
Módulo operativo	1	8.801					8.801
	2	7.683	8.801				16.483
	3	6.707	7.683	8.801			23.190
	4	5.855	6.707	7.683	8.801		29.046
	5	5.111	5.855	6.707	7.683	8.801	34.157
Módulo cerrado	6	4.462	5.111	5.855	6.707	7.683	29.819
	7	3.895	4.462	5.111	5.855	6.707	26.031
	8	3.401	3.895	4.462	5.111	5.855	22.725
	9	2.969	3.401	3.895	4.462	5.111	19.839
	10	2.592	2.969	3.401	3.895	4.462	17.319
	11	2.263	2.592	2.969	3.401	3.895	15.119
	12	1.975	2.263	2.592	2.969	3.401	13.199
	13	1.724	1.975	2.263	2.592	2.969	11.522
	14	1.505	1.724	1.975	2.263	2.592	10.059
	15	1.314	1.505	1.724	1.975	2.263	8.781
	16	1.147	1.314	1.505	1.724	1.975	7.666
	17	1.001	1.147	1.314	1.505	1.724	6.692
	18	874	1.001	1.147	1.314	1.505	5.842
	19	763	874	1.001	1.147	1.314	5.100
	20	666	763	874	1.001	1.147	4.452
	21	582	666	763	874	1.001	3.887
	22	508	582	666	763	874	3.393
	23	443	508	582	666	763	2.962
	24	387	443	508	582	666	2.586
	25	338	387	443	508	582	2.258
	26	295	338	387	443	508	1.971
	27	257	295	338	387	443	1.720
	28	225	257	295	338	387	1.502
	29	196	225	257	295	338	1.311
	30	171	196	225	257	295	1.145
	31		171	196	225	257	850
	32			171	196	225	592
	33				171	196	368
	34					171	171
Totales							**340.559**

Fuente: Elaboración propia

Se presenta en la Figura 26 la generación de dinámica de emisiones de CO_2 eq. en el relleno sanitario, asociadas a la disposición final del tonelaje de la FOP_{bio}.

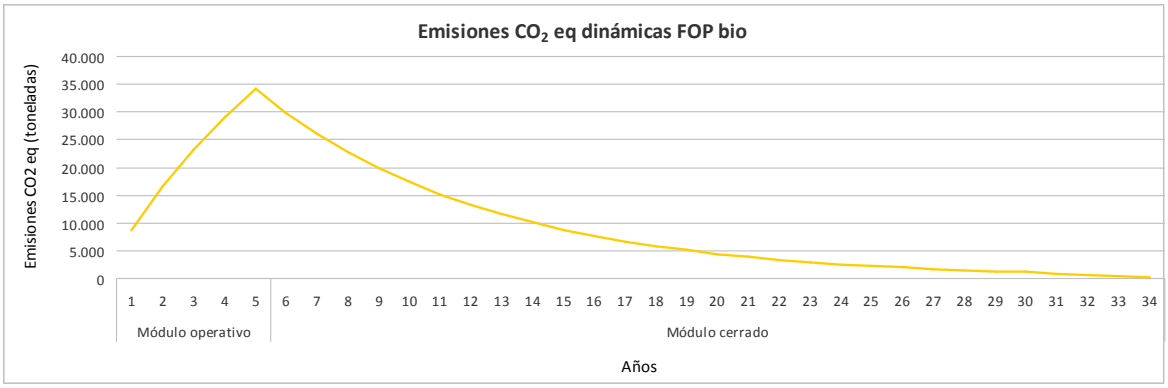

Figura 26. Emisiones en el relleno sanitario FOP_{bio}

Fuente: Elaboración propia

Se presenta en la figura 27 un gráfico comparativo de los resultados obtenidos de la modelización.

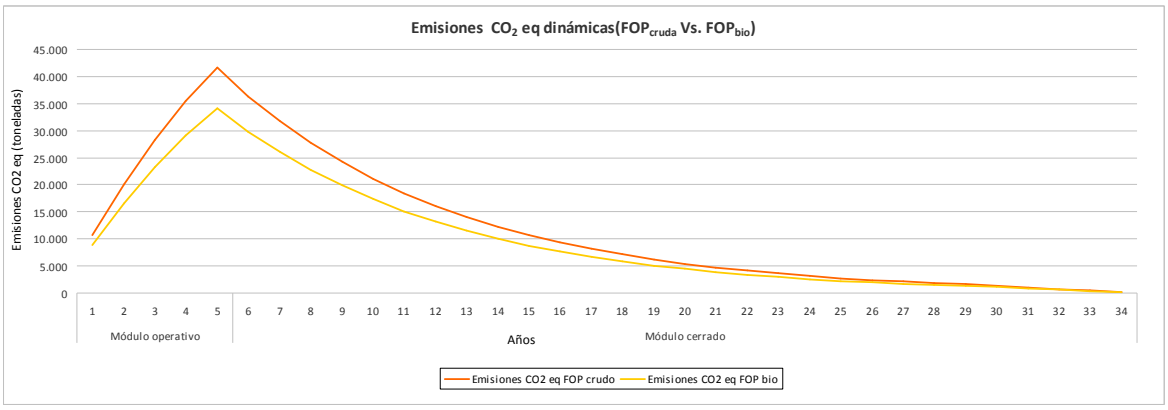

Figura 27. Comparativa de emisiones dinámicas FOS_{cruda} vs FOS_{bio}

Fuente: Elaboración propia

14.2. Anexo 2: Ensayos