



Banco
Interamericano
de Desarrollo

Sector de
Infraestructura y
Medio Ambiente

Desarrollo de
proyectos MDL en
plantas de
tratamiento de
aguas residuales

Daniel A. Nolasco

NOTA TÉCNICA

No. 116

Desarrollo de proyectos MDL en plantas de tratamiento de aguas residuales

Daniel A. Nolasco

Banco Interamericano de Desarrollo

2010

Esta Nota Técnica forma parte de los productos de conocimiento generados por la Iniciativa de Agua y Saneamiento, aprobada por el Directorio del Banco Interamericano de Desarrollo en Mayo del 2007. Su implementación es llevada a cabo por la División de Agua y Saneamiento (INE/WSA) a cargo del Sr. Federico Basañes.

La Nota Técnica fue dirigida por Rodrigo Riquelme, y contó con el apoyo de Horacio Terraza, Camilo Garzón y Fernando Bretas, todos de INE/WSA.

© Banco Interamericano de Desarrollo, 2010

www.iadb.org

Las "Notas técnicas" abarcan una amplia gama de prácticas óptimas, evaluaciones de proyectos, lecciones aprendidas, estudios de casos, notas metodológicas y otros documentos de carácter técnico. La información y las opiniones que se presentan en estas publicaciones son exclusivamente del autor y no expresan ni implican el aval del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representan.

Contenido

1	Introducción.....	1
1.1	Objetivo y organización del documento	1
1.2	El Panel Intergubernamental de Cambio Climático.....	2
1.3	El Protocolo de Kioto	3
1.4	Mecanismo de Desarrollo Limpio	4
1.5	Condiciones necesarias para implementar un proyecto MDL	5
1.6	Ciclo del proyecto MDL	6
1.6.1	Participantes	7
1.6.2	Etapas del ciclo de proyectos MDL.....	9
1.7	Metodologías aprobadas	11
2	Procesos de tratamiento de aguas residuales	
	y generación de GEI	13
2.1	Tratamiento biológico de aguas residuales	13
2.2	Emisiones de GEI en plantas de tratamiento	16
2.2.1	Emisión de metano	16
2.2.2	Emisión de óxido nitroso.....	18
2.2.3	Consumo de energía	21
2.3	Generación de energía	24
2.4	Características particulares de las unidades de tratamiento más comunes	26
2.4.1	Lagunas de tratamiento.....	26
2.4.2	Lodos activados	30
2.4.3	Reactores anaeróbicos	32
2.5	Manejo de lodos y emisión de GEI.....	35
2.5.1	Concepto.....	35
2.5.2	Manejo de lodos dentro de la PTAR	35
3	Procesos de captación y utilización de metano	42
3.1	Generación de biogás.....	42
3.2	Acumulación.....	42

3.3	Captación	43
3.4	Conducción	43
3.5	Condensación.....	44
3.6	Remoción de ácido sulfhídrico	45
3.7	Uso final del biogás	46
3.8	Impactos ambientales de la captación y utilización de biogás.....	47
4	Métodos de cálculo de reducción de emisiones	48
4.1	Componentes del cálculo de reducción de emisiones.....	48
4.2	Cálculo de reducción de emisiones.....	50
5	Lineamientos para un análisis costo-beneficio	51
5.1	Consideraciones generales	51
5.2	Costos de evaluación y diseño del proyecto	52
5.3	Costos de transacción.....	52
5.4	Costos de inversión inicial, operación y mantenimiento	54
5.5	Beneficios por la venta de CER.....	55
5.6	Beneficios por ahorro de energía	56
5.7	Beneficios socio-ambientales.....	57
5.8	Alternativas para reducir costos en proyectos pequeños	57
6	Lineamientos para un análisis de pre-factibilidad	
	de proyectos MDL	61
6.1	Análisis de la línea de base	61
6.2	Definición de las posibles alternativas.....	63
6.3	Cálculo de reducción de emisiones y costos asociados	63
6.4	Casos de aplicación.....	63
6.4.1	Caso 1	63
6.4.2	Caso 2	71
6.4.3	Caso 3	76
6.4.4	Cuadro comparativo	79
6.5	Comentario.....	80
7	Experiencias en proyectos MDL en plantas de tratamiento	82

8 Bibliografia	83
ANEXO I	85
ANEXO II.....	88

Siglas y acrónimos

AM	Metodologías aprobadas
BE	Emisiones de base
BioCF	Fondo del Biocarbono
CDCF	Fondo del carbono para el desarrollo comunitario
CER	Certificados de reducción de emisiones
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de carbono
COP	Conferencia de las partes
CO ₂	Dióxido de carbono
CO ₂ e	Dióxido de carbono equivalente
CPA	Proyectos individuales
DNA	Autoridad nacional designada
DOE	Entidades operacionales designadas
DQO	Demanda química de oxígeno
ESG	Eficiencia del sistema generador
GEI	Gases de efecto invernadero
H ₂	Hidrógeno
H ₂ S	Sulfuro de hidrógeno
HDPE	Polietileno de alta densidad
IPCC	Panel Intergubernamental de Cambio Climático
MCF	Factor de corrección de metano
MDL	Mecanismo de desarrollo limpio

N ₂	Nitrógeno
NO ₂	Nitrito
NO ₃	Nitrato
N ₂ O	Óxido nitroso
O ₂	Oxígeno
PCF	Fondo tipo para reducir las emisiones de carbono
PDD	Documento de diseño del proyecto
p.e.	Poblador equivalente
PE	Emisiones del proyecto
PIN	Nota de identificación del proyecto
PoA	Programático MDL
PTAR	Plantas de tratamiento de aguas residuales
UNEP	Programa Medioambiental de las Naciones Unidas
UNFCCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
WMO	Organización Meteorológica Mundial

1 Introducción

1.1 Objetivo y organización del documento

La presente nota técnica tiene el objetivo de difundir los conocimientos que existen en el ámbito del tratamiento de aguas residuales con respecto a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), la posibilidad de reducir dichas emisiones para generar bonos de carbono y el potencial de generación de energía que presentan algunos sistemas de tratamiento.

Al implementar un proyecto que reduzca emisiones de GEI y/o el uso de una fuente de energía basada en combustibles fósiles (que por lo tanto emite GEI), existe la posibilidad de generar los llamados “bonos de carbono”, los cuales después pueden ser vendidos a partes interesadas que los necesiten para así poder contabilizar dicha reducción de emisiones de GEI como propias.

Luego de una breve contextualización de la situación actual de este tipo de proyectos en el mundo, en especial en América Latina y el Caribe, y una introducción al origen y características principales de los proyectos de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), se realiza una revisión de las unidades de tratamiento de aguas residuales más utilizadas y su relación con la emisión de GEI y consumo y generación de energía.

A continuación se detallan los procesos de captación y utilización de metano (gas generado en sistemas de tratamiento anaeróbicos), desde la generación del gas hasta su uso final, y se describen las tecnologías disponibles. Asimismo, se detalla el ciclo que debe cumplir un proyecto MDL desde la concepción del mismo hasta la implementación y generación de bonos de carbono.

En el capítulo posterior, se describen los costos y beneficios asociados a proyectos de reducción de emisiones de GEI durante todo el ciclo MDL, considerando, entre otros, los costos de evaluación y diseño, costos de transacción y beneficios por venta de bonos de carbono y generación de energía. También se describen los lineamientos generales con respecto a la evaluación de prefactibilidad de un proyecto MDL.

Por último, se presentan ejemplos de proyectos MDL implementados en el mundo mediante un cuadro comparativo que considera línea de base, descripción del proyecto

implementado, cantidad de efluente tratado, metodologías aplicadas, energía generada e inversión requerida.

La presente nota técnica concluye con un capítulo con bibliografía de consulta y tres anexos donde se detallan las metodologías aprobadas para proyectos MDL y se describen los pasos a seguir, junto con las fórmulas utilizadas para el cálculo de reducciones de emisiones.

1.2 El Panel Intergubernamental de Cambio Climático

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) fue creado en 1989 por la Organización Meteorológica Mundial (WMO) y el Programa Medioambiental de las Naciones Unidas (UNEP), con el objetivo de proveer a los gobiernos del mundo información científica sobre el cambio climático, sus consecuencias ambientales, sociales y económicas y ofrecer posibles estrategias de mitigación.

Los **gases de efecto invernadero (GEI)** poseen la propiedad de dejar pasar la radiación en el espectro visible y ultravioleta (emitida por el sol) y absorber parte de la radiación infrarroja (emitida por la Tierra). Al aumentar su concentración en la atmósfera debido a las actividades antropogénicas que los emiten, generan un cambio en el balance energético de la Tierra. La atmósfera aumenta la capacidad de atrapar el calor emitido por la Tierra, calentándose.

El IPCC está formado por científicos de todo el mundo y constantemente revisa y evalúa información producida mundialmente, relacionada con el entendimiento del cambio climático y sus consecuencias.

Cada **GEI** tiene distinta capacidad para absorber la radiación infrarroja emitida por la tierra, la cual le otorga su “Potencial de Calentamiento Global” específico. Esta característica se mide en relación con la capacidad del dióxido de carbono. De esta forma se obtiene una unidad de cuantificación de GEI llamada “dióxido de carbono equivalente (CO₂e)”.

Cuadro 1.1

GEI	Potencial de calentamiento global
Dióxido de carbono (CO₂)	1
Metano (CH₄)	21
Óxido nitroso (N₂O)	310
Perfluorocarbonos (PFCs)	6.500 – 9.200
Hidrofluorocarbonos (HCFs)	140 – 11.700
Hexafluoruro de azufre (SF₆)	23.900

p. ej.: 1.000 tCH₄ x 21 = 21.000 tCO₂e

1.3 El Protocolo de Kioto

En el año 1994 entró en vigencia la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC), la cual constituye un tratado internacional (actualmente ratificado por 192 países) creado con el objetivo de analizar las posibles formas de reducir el calentamiento global. En 1997, con base en esta convención, surgió el Protocolo de Kioto, con metas más concretas y medidas jurídicamente vinculantes.

Bajo este tratado, los países desarrollados que lo firman (países Anexo I, cuadro 1) se comprometen a reducir, para el periodo 2008-2012, sus emisiones de gases de efecto invernadero en aproximadamente 5% por debajo de sus niveles en el año 1990.

Basándose en el hecho de que una reducción en la emisión de GEI tiene el mismo efecto sobre el calentamiento global independientemente de la ubicación donde ésta ocurra, el Protocolo de Kioto incluye tres mecanismos de flexibilización para cumplir sus metas de reducción de GEI:

Protocolo de Kioto

- Establece metas concretas y jurídicamente vinculantes con respecto a la reducción de GEI de los países que lo firman.
- Propone mecanismos de flexibilización: Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL).

Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL)

- Un país en vías de desarrollo reduce emisiones para luego vender los “Certificados de Reducción de Emisiones” a países que se comprometieron a reducir, para que éste las contabilice como propias.
- 1.631 proyectos en Latinoamérica (26% del total mundial).
- 28% de ellos sobre manejo y disposición de residuos y agricultura.
- En Latinoamérica se generaron bonos por 40 M tCO₂e.

- Comercio de emisiones (entre partes dentro de un mismo país desarrollado).
- Implementación Conjunta (acuerdo entre dos países desarrollados).
- Mecanismo de Desarrollo Limpio (acuerdo entre un país desarrollado y uno en vías de desarrollo).

Esta nota técnica está enfocada en el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), dado que éste es el mecanismo que aplica en países en vías de desarrollo, y tiene el objetivo de difundir las oportunidades que existen dentro del campo del tratamiento de aguas residuales en relación con:

- La generación de bonos de carbono (o Certificados de Reducción de Emisiones) a través de proyectos MDL; y,
- El potencial de aprovechamiento energético que presenta el biogás generado en ciertos sistemas de tratamiento de aguas residuales.

1.4 Mecanismo de Desarrollo Limpio

Al implementar (a través del MDL) un determinado proyecto que reduzca emisiones de GEI, se generan Certificados de Reducción de Emisiones (CER) que pueden ser vendidos a partes interesadas pertenecientes a países (Anexo I) para que éstas puedan contabilizarlos como reducciones propias.

Dentro del Protocolo de Kioto, los proyectos MDL son clasificados en distintos “ámbitos sectoriales”. Dos ámbitos sectoriales incluyen actividades relacionadas al tratamiento de efluentes:

- Ámbito 13: Manejo y disposición de residuos; y,
- Ámbito 15: Agricultura.

Hasta mayo de 2009 habían sido registrados un total de 1.631 proyectos MDL, de los cuales 455 pertenecían a estos dos ámbitos (28% del total).¹

A nivel mundial, 26% de los proyectos MDL se registraron en América Latina y el Caribe, y generaron Certificados de Reducción de Emisiones por más de 40 millones de tCO₂e (16% del total de CER emitidos).²

Se estima que 6,7% de los GEI emitidos a la atmósfera por actividades antropogénicas provienen del tratamiento de efluentes (incluyendo efluentes industriales, ganaderos y domésticos).³

La eventual generación de bonos de carbono y la posibilidad de recuperación de energía constituyen un incentivo en el desarrollo e implementación de tecnologías de tratamiento de efluentes que permitan la generación, captura y aprovechamiento energético de biogás (gas generado en sistemas anaeróbicos de tratamiento de aguas residuales).

¹ Véase <<http://cdm.unfccc.int/Statistics/Registration/RegisteredProjByScopePieChart.html>>.

² IGES CDM Project Database: <<http://www.iges.or.jp/en/cdm/report.html>>.

³ World Resources Institute, 2000. “Navigating Numbers - GHG Data and International Climate Policy”.

1.5 Condiciones necesarias para implementar un proyecto MDL

Para calificar como MDL, los proyectos deben cumplir una serie de características. Primero, debe ser demostrado que contribuye con la reducción de emisión de GEI más allá de la línea de base (ver gráfico 1.1). Esta condición, llamada adicionalidad, consiste en demostrar que el proyecto no se hubiera llevado a cabo en ausencia de los fondos provistos por la venta de bonos, debido a alguna de las siguientes barreras:⁴

- Barrera de inversión: una alternativa con mayor emisión de GEI hubiera resultado más económica;
- Barrera tecnológica: existe una alternativa con tecnología menos avanzada (y, por lo tanto, con mayor emisión de GEI) que conlleva un riesgo menor, debido a la incertidumbre del *performance* y/o la baja participación en el mercado de la nueva tecnología propuesta por el proyecto;
- Barrera debida a la práctica usual (*business-as-usual*): la práctica usual y/o las políticas locales resultarían en una tecnología con mayores emisiones;
- Otras barreras: p. ej. barreras institucionales, información limitada, recursos de gestión, capacidad para absorber nuevas tecnologías o capacidad de organización, hubieran resultado en mayores emisiones.

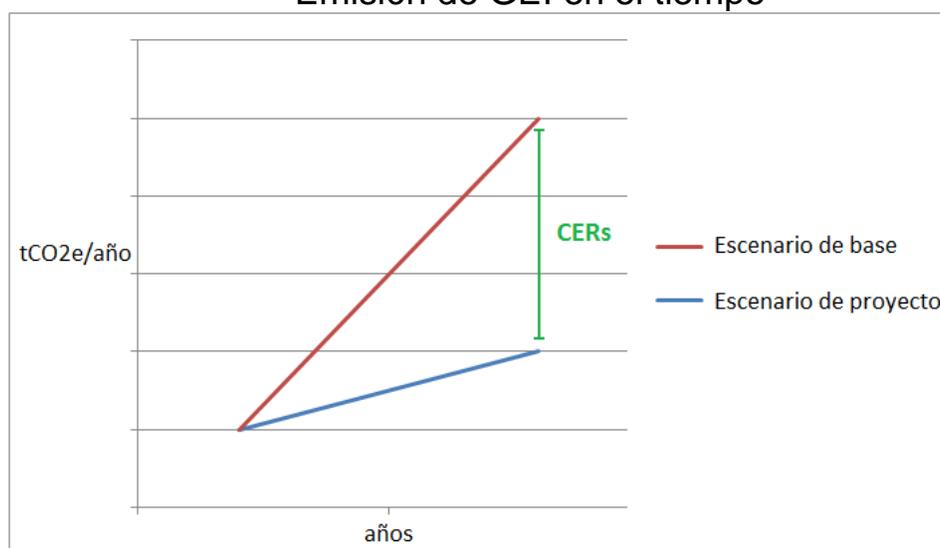
Condiciones básicas para un proyecto MDL:

- Reduce emisiones de GEI más allá de la línea de base (adicionalidad).
- No forzado por regulaciones locales.
- Contribuye al desarrollo sustentable de la región donde se implementa.

⁴ En la página web de la UNFCCC se encuentra disponible el documento “Tool for the demonstration and assessment of additionality” (*Herramienta para evaluar y demostrar la adicionalidad de un proyecto MDL*).

Gráfico 1.1

Emisión de GEI en el tiempo



En el gráfico 1.1 se observa cómo, a pesar de que en ambas proyecciones (escenarios de base y proyecto) las emisiones aumentan con el tiempo (producto del aumento de la población), en el escenario que considera la implementación de un proyecto de reducción de emisiones de GEI este aumento es marcadamente menor. La reducción de emisiones en cualquier punto del tiempo está determinada por la diferencia entre estas dos proyecciones.

Otras condiciones que debe cumplir un proyecto MDL son:

- El proyecto no debe ser forzado por regulaciones locales; y,
- El proyecto debe contribuir al desarrollo sustentable de la región donde se implementa.

1.6 Ciclo del proyecto MDL

Con el fin de generar bonos de carbono dentro del marco del Protocolo de Kioto en Latinoamérica, un proyecto de reducción de GEI debe ser implementado según el mecanismo MDL. Para esto, el proyecto debe pasar por una serie de etapas, desde su concepción hasta su verificación, y la consiguiente emisión de bonos.

En esta sección se presentan y describen los participantes y etapas del ciclo MDL a nivel nacional e internacional.

1.6.1 Participantes

Todos los proyectos en el Mecanismo de Desarrollo Limpio requieren la aprobación del país huésped donde se desarrollará el proyecto (esto se realiza en la Instancia Nacional) y también requieren la aprobación de la Junta Ejecutiva del MDL (parte que se lleva a cabo en la Instancia Internacional).

Ciclo de proyecto MDL

- El proyecto debe cumplir el ciclo MDL para poder generar bonos de carbono por la reducción de GEI lograda (ver gráfico 1.2, pág. 11).

En la instancia nacional participan:

- **El proponente del proyecto:** Puede ser una persona física, empresa privada o agencia estatal; y,

Participantes del ciclo MDL

- Instancia nacional:
 - Proponente del proyecto.
 - Autoridad nacional designada para gestionar los proyectos MDL.
- Instancia internacional:
 - Junta ejecutiva del MDL (supervisora del mecanismo MDL).
 - Entidades operacionales designadas.
 - Partes interesadas (toda parte afectada por el proyecto, *stakeholders*).
 - Corredores (intermediarios que compran y venden CER).
 - Consultores (diseño y evaluación de proyecto, y asistencia general en el ciclo MDL).
 - Compradores de CER (gobiernos o empresas que necesitan CER).
 - Estudios jurídicos (contratos compra-venta de CER, entre otras cosas).
 - Bancos y entidades financieras (financian proyectos MDL).

- **La Autoridad Nacional Designada (DNA):**⁵ Tiene el deber de evaluar el proyecto en cuestión.

En la instancia internacional del ciclo de un proyecto MDL participan las siguientes partes:

- **Junta Ejecutiva del MDL:**⁶ Integrada por 10 miembros titulares y 10 alternos que representan las distintas divisiones regionales y las Partes Anexo I y No Anexo I (países en vías de desarrollo que ratificaron el protocolo pero no tienen compromiso de reducción de GEI). Se encarga

⁵ En la siguiente sección del sitio web de la UNFCCC puede encontrarse una lista actualizada de todas las DNA registradas y sus datos de contacto: <<http://cdm.unfccc.int/DNA/index.html>>.

⁶ En la siguiente sección del sitio web de la UNFCCC puede encontrarse una lista actualizada de los miembros de la Junta Ejecutiva: <<http://cdm.unfccc.int/EB/Members/index.html>>.

de supervisar el Mecanismo para un Desarrollo Limpio bajo la autoridad y guía de la Conferencia de las Partes (COP).

- **Entidades Operacionales Designadas (DOE):**⁷ Son certificadores acreditados en el registro que la Junta Ejecutiva MDL creó para tal fin (por lo general se trata de consultora y ONG). Realizan las etapas de validación, verificación o certificación de los proyectos en el ciclo de proyectos MDL.
- **Partes interesadas:** El término “partes interesadas” se refiere al público en general, incluyendo a los individuos, grupos o comunidades que sean (o probablemente sean) afectadas por la actividad del proyecto de mecanismo de desarrollo limpio propuesto. Debe publicarse en la página de Internet de la UNFCCC toda la información del proyecto MDL que va a realizarse, sujeta a comentarios por las partes interesadas.
- **Corredores (brokers):** Son intermediarios que compran y venden CER. Algunas veces pueden también brindar servicios de consultoría.
- **Consultores:** Los servicios que ellos ofrecen van desde la realización del Documento de Diseño del Proyecto (PDD) (en el cual se establece la línea base, se calcula la reducción esperada y se establece un plan de monitoreo), trabajan con las Entidades Operacionales Designadas (para que realicen la validación, verificación y certificación del proyecto) y buscan a aquellos interesados en comprar los CER generados por el proyecto.
- **Compradores de CER:** Son gobiernos o empresas de los países (Anexo I) que necesitan comprar los CER para poder contabilizar como propia la reducción de emisiones lograda por el proyecto.
- **Estudios jurídicos:** Entre otras cosas, participan elaborando acuerdos de compra de CER.
- **Bancos y entidades financieras:** Proporcionan préstamos y permiten utilizar como garantía un acuerdo firmado de compra de CER; p. ej. el Banco Mundial administra diversos fondos que sirven para financiar proyectos MDL de distinto tipo alrededor del mundo (Fondo del carbono para el desarrollo comunitario –CDCF–, Fondo tipo

⁷ En la siguiente sección del sitio web de la UNFCCC puede encontrarse una lista actualizada de todas las DOE acreditadas y sus datos de contacto: <<http://cdm.unfccc.int/DOE/list/index.html>>.

para reducir las emisiones de carbono –PCF–, Fondo del Biocarbono –BioCF–, entre otros).

1.6.2 Etapas del ciclo de proyectos MDL

El ciclo de etapas que debe cumplir un proyecto MDL está compuesto por una instancia nacional y otra internacional (gráfico 1.2, pág. 11). En la primera se evalúa el proyecto desde el punto de vista de su contribución al desarrollo sustentable del país. En la segunda se evalúa el proyecto desde el punto de vista de la contribución del mismo a la mitigación de los efectos del cambio climático. Tanto la instancia nacional como la internacional están compuestas por etapas que pueden ser o no secuenciales y continuas a lo largo del tiempo; se pueden realizar algunas de ellas en forma paralela.

Diseño del proyecto

En esta fase del proyecto, se recomienda comenzar por la elaboración de una Nota de Identificación del Proyecto (PIN). La PIN debe incluir información preliminar sobre el contenido del proyecto, el plan de financiamiento y la primera estimación de reducción de emisiones del proyecto. Este documento debe ser presentado ante la DNA para recibir una primera indicación sobre la probabilidad de apoyo nacional al proyecto, mediante una Carta de Consentimiento o una Carta de No-Objeción.

Una vez obtenida la preaprobación nacional, debe diseñarse el proyecto y obtenerse financiamiento. A partir del proyecto diseñado, debe realizarse un Documento de Diseño del Proyecto (PDD). Este documento debe incluir, entre otras cosas, el cálculo del potencial de reducción de GEI que presenta el proyecto, el cual debe realizarse utilizando metodologías aprobadas por la Junta Ejecutiva del MDL. Si no existe una metodología aprobada para el caso específico del proyecto en cuestión, puede proponerse una nueva metodología que se adapte al caso, para que ésta pueda ser revisada y aprobada por la Junta Ejecutiva del MDL. El PDD debe realizarse de acuerdo a los estándares de la UNFCCC y los requisitos de la Junta Ejecutiva del MDL, publicados en la página oficial de la UNFCCC: <www.unfccc.int>.

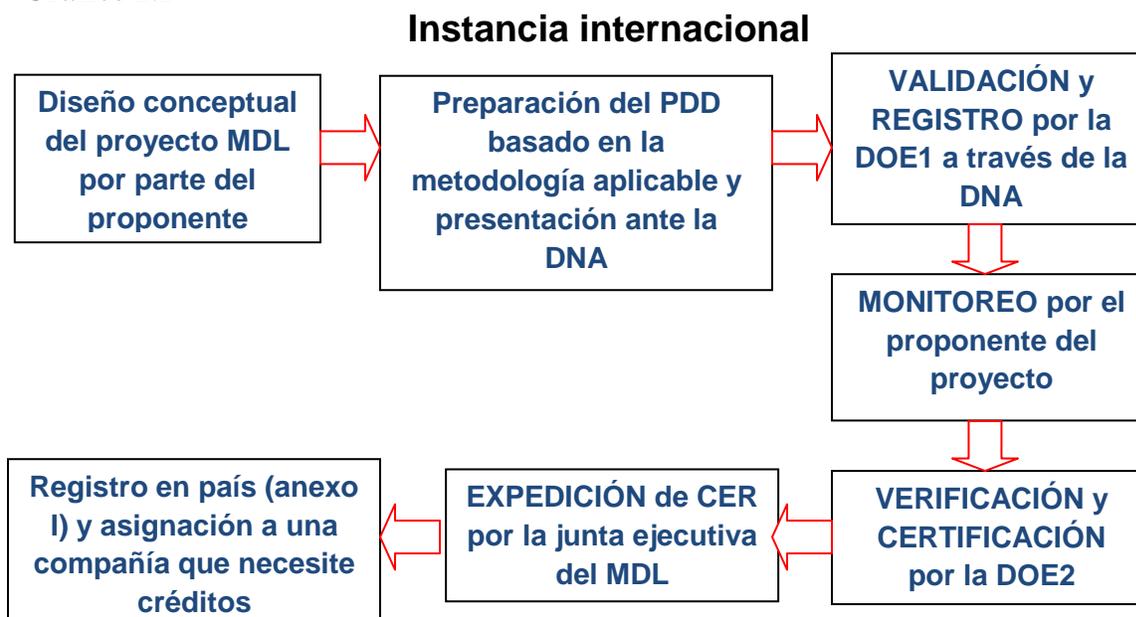
Instancia nacional

El primer paso consiste en la presentación del proyecto a la Autoridad Nacional Designada en el formato oficial de PDD. Si el resultado de la evaluación es positivo, el segundo paso consiste en la expedición de una carta de aprobación del proyecto por parte de la misma autoridad, la cual deberá ser entregada a la Entidad de Operación Designada 1 (internacional), para que esta entidad pueda pedir el registro del nuevo proyecto a la Junta Ejecutiva del MDL.

Instancia internacional

1. Validación: En esta etapa la Entidad de Operación Designada 1 (DOE1), que fue elegida del registro por el proponente del proyecto, le solicitará al proponente del proyecto el PDD, junto con la carta de aprobación del país donde se realizará el proyecto. La DOE1 verificará que las metodologías de cálculo de línea de base y el plan de monitoreo ya estén aprobadas por la Junta Ejecutiva del MDL.
2. Registro: Es la etapa en que la DOE1 solicitará a la Junta Ejecutiva del MDL que registre el proyecto. El registro del proyecto representa la aprobación oficial del proyecto por la Junta Ejecutiva del MDL.
3. Monitoreo: Etapa en que se monitorearán (de acuerdo con el plan de monitoreo presentado, que sigue una metodología ya aprobada y publicada) los parámetros clave que permitan calcular la reducción real de GEI que el proyecto ha logrado en el corriente año de acreditación. Esto lo realizará el proponente del proyecto.
4. Verificación - certificación: La Entidad de Operación Designada 2 (DOE2) verificará y certificará que la cantidad de CER logrados por el proyecto estén conformes con los resultados del plan de monitoreo.
5. Expedición de CER: La Junta Ejecutiva del MDL expide los CER en concordancia con el resultado de la certificación realizada por la DOE2.

Gráfico 1.2



1.7 Metodologías aprobadas

Con el objetivo de estandarizar el método de análisis para la estimación *a priori* de reducción de emisiones que un determinado tipo de proyecto en el marco del MDL puede conseguir, el responsable del proyecto debe utilizar una serie de metodologías para estimar la reducción de emisiones que se espera consiga el proyecto propuesto y establecer métodos de monitoreo *ex-post*.

Las Metodologías Aprobadas (AM) son aquellas metodologías propuestas en proyectos anteriores que han sido previamente revisadas y aprobadas por la Junta Ejecutiva (supervisora del mecanismo MDL) y publicadas junto con las guías pertinentes. Estas metodologías se aplican en la etapa de creación del Documento de Diseño del Proyecto (PDD) –que el responsable deberá presentar ante la Entidad de Operación Designada para su validación– y durante la operación del proyecto implementado. La preparación y presentación del PDD es el primer paso formal que debe dar el dueño del proyecto para verificar que su propuesta reducirá emisiones (ver sección 1.6 *Ciclo del Proyecto MDL*).

El marco de trabajo de las metodologías incluye, entre otros:

- La aplicabilidad de la metodología seleccionada para ese determinado proyecto (existe una metodología para cada tipo de proyecto);

- La determinación del escenario de línea de base (*business-as-usual*) y alternativas (se considera como línea de base la alternativa más probable);
- El cálculo de reducción de emisiones: estimación *ex-ante* (cálculos de emisiones de línea de base y de proyecto) y metodología de medición *ex-post* (a partir de parámetros monitoreados); y,
- Lineamientos sobre el monitoreo de los parámetros relevantes.

Con el objetivo de reducir el costo de transacción para los proyectos de pequeña escala, y porque se asume que estos proyectos requieren menos trabajo, el Panel de Metodologías de la UNFCCC ha desarrollado especialmente una serie de metodologías con cálculos simplificados y menor requerimiento de información, para la estimación de reducción de emisiones.

Se consideran proyectos de pequeña escala aquellos que conlleven una reducción de hasta 60.000 tCO₂e/año.

Las metodologías de pequeña escala se nombran comenzando con AMS, y las de gran escala se nombran comenzando con AM o ACM.

En el Anexo I se presenta el cuadro 2, en que se detallan las metodologías aprobadas que competen a proyectos relacionados con el tratamiento de aguas residuales.

Para obtener más detalles y requisitos, se recomienda leer las

metodologías aprobadas, las cuales se encuentran publicadas en el sitio web de la UNFCCC:

<<http://cdm.unfccc.int/methodologies/index.html>>.

Utilidad de las metodologías aprobadas:

- Estandarizar el método de estimación y (cálculo) de reducción de emisiones.
- Determinar la línea de base (*business-as-usual*).
- Calcular reducción de emisiones.
- Establecer lineamientos de monitoreo.

2 Procesos de tratamiento de aguas residuales y generación de GEI

2.1 Tratamiento biológico de aguas residuales

El objetivo de los procesos de tratamiento biológico de aguas residuales consiste en reproducir de manera confinada y controlada los mecanismos naturales, por los cuales diversos microorganismos degradan la materia orgánica convirtiéndola en productos minerales inertes. Para que estos procesos puedan ser eficientemente aplicados a la depuración de aguas residuales generadas por una población o industria, deben lograrse tasas de degradación significativamente mayores a las alcanzadas en la naturaleza. Esto se logra por medio del control de las condiciones físico-químicas en reactores diseñados y operados para cumplir objetivos de efluente predefinidos. De esta forma, se obtienen concentraciones de biomasa mucho mayores que las encontradas en un cuerpo de agua natural, y la velocidad de degradación aumenta proporcionalmente, logrando así la reducción de contaminación deseada en espacios y tiempos considerablemente menores.

Para crecer y reproducirse, los microorganismos necesitan:

- Energía para sustentar sus funciones metabólicas; y,
- Carbono y nutrientes (nitrógeno, fósforo, calcio, magnesio, etc.) para generar nuevo material celular.

Todo esto lo obtienen de la materia contenida en el efluente, del medioambiente o de aportes del sistema de tratamiento. En general, existen tres tipos de microorganismos según sus condiciones de respiración:⁸

- **Organismos aeróbicos:** utilizan oxígeno disuelto para respirar. El carbono orgánico es oxidado, obteniendo como productos finales de estas reacciones bioquímicas dióxido de carbono (CO₂) y agua.

⁸ Marcos von Sperling. *Basic Principles of Biological Wastewater Treatment*. IWA Publishing.

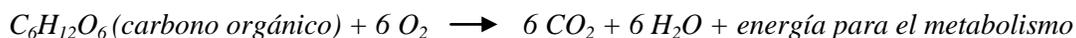
- **Organismos facultativos:** utilizan oxígeno disuelto cuando éste se encuentra disponible. Cuando no hay oxígeno disuelto utilizan el oxígeno ligado al nitrito (NO₂) o nitrato (NO₃), etc.
- **Organismos anaeróbicos:** utilizan reacciones endógenas dado que no pueden obtener energía mediante respiración aeróbica. Los principales productos finales son el dióxido de carbono y el metano (la forma más reducida del carbono).

Bases del tratamiento biológico de agua residual

- Reproduce el mecanismo natural por el cual diversos microorganismos degradan la materia orgánica contenida en el agua residual.
- Por medio del control de las condiciones físico-químicas se logran tasas de degradación mucho mayores a las logradas en la naturaleza.
- Bajo ciertas condiciones, durante el tratamiento biológico de agua residual se genera metano y óxido nitroso: dos importantes GEI.

En condiciones aeróbicas, el carbono orgánico es oxidado y como producto final se obtiene CO₂ y agua. Por el contrario, cuando este proceso de degradación ocurre en condiciones anaeróbicas, el CO₂ actúa como aceptor de electrones y los principales productos finales son el dióxido de carbono y el metano.

Respiración aeróbica



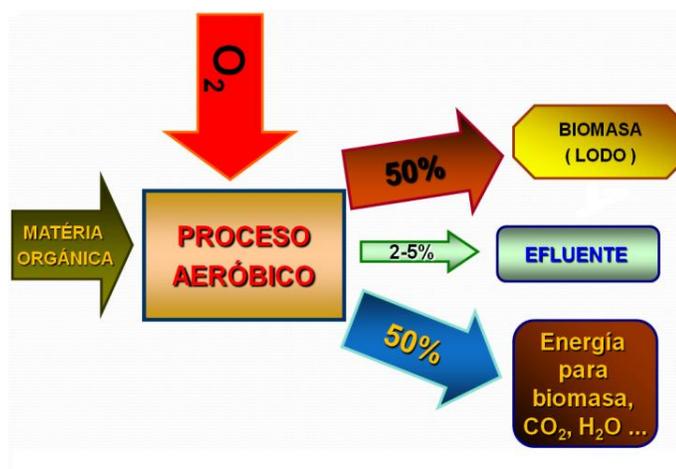
Respiración anaeróbica



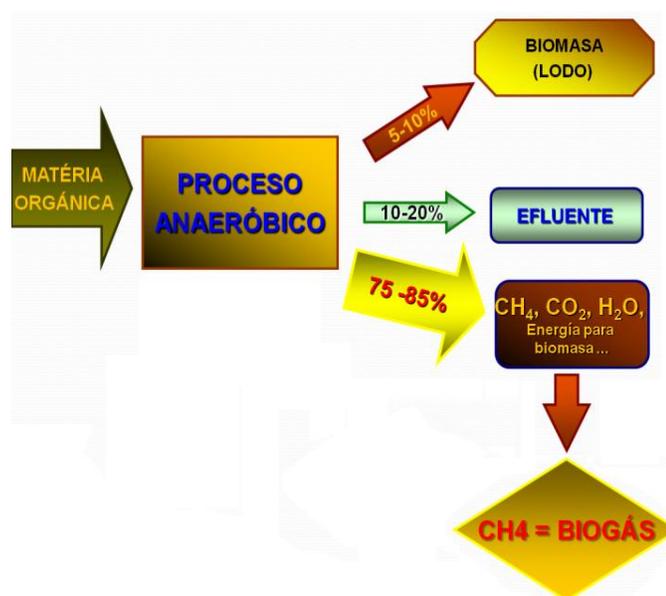
Las metodologías aprobadas de la UNFCCC no toman en cuenta la emisión de CO₂ por considerarlo de origen biogénico, es decir que el carbono vuelve a la atmósfera de la misma forma en que hubiera ocurrido naturalmente (como CO₂). En otras palabras, el CO₂ emitido en plantas de tratamiento no debe contabilizarse como emisión antropogénica.⁹

⁹ Esto no es completamente cierto, ya que a pesar de que la mayor parte del carbono presente en el agua residual sea de origen biogénico, este efluente también contiene cantidades relativamente pequeñas de detergentes, aceites y grasas de origen sintético (derivados del petróleo).

En un proceso de tratamiento aeróbico, la materia orgánica que ingresa al sistema es utilizada como fuente de energía, otra parte se transforma en biomasa (lodos) y un pequeño porcentaje sale con el efluente.



Por otro lado, un proceso anaeróbico no requiere suministro de oxígeno (por consiguiente, su consumo energético es mucho menor), genera una cantidad de lodos considerablemente menor, y como producto de la degradación de la materia orgánica se obtiene metano, que puede ser utilizado con fines energéticos.



Existen diversos aspectos en el diseño y operación de una planta de tratamiento que tienen gran influencia sobre el desempeño ambiental de la misma, particularmente sobre las emisiones de GEI.

Los tres factores que determinan la “huella de carbono” de una unidad de tratamiento son:

- Emisión de metano (por ser un GEI);
- Emisión de óxido nítrico (por ser un GEI); y
- Consumo de energía de fuentes externas (por necesitar sistemas de generación de energía que emiten GEI).

Consecuentemente, existen dos formas principales de reducir emisiones de GEI en proyectos relacionados con el tratamiento de aguas residuales:

- Reduciendo la emisión de metano en planta por medio de su captura y quemado (sea en una llama abierta o en un motor de combustión interna); y,
- Desplazando una fuente de energía externa, lo cual se puede lograr haciendo más eficiente el uso de energía eléctrica con mejores controles de proceso o generando energía *in situ*, utilizando una renovable e interna (p. ej. biogás).

2.2 Emisiones de GEI en plantas de tratamiento

A continuación se describe la emisión de metano y óxido nitroso y el consumo energético en una planta de tratamiento.

2.2.1 Emisión de metano

En un medio libre de oxígeno disuelto, los microorganismos facultativos y anaeróbicos degradan la materia orgánica presente en el agua o lodo produciendo metano y dióxido de carbono.

La cantidad de metano producida se verá influida por la cantidad de materia orgánica degradada y la medida en que el medio se encuentre libre de oxígeno disuelto. Esta última característica se ve condicionada por el diseño y mecanismos de aireación (naturales o forzados) que posea la unidad de tratamiento. Por ejemplo, en lagunas de tratamiento anaeróbicas abiertas (sin captura de biogás), puede existir una capa superficial que contenga oxígeno disuelto. El espesor de dicha capa dependerá, entre otros factores, de la temperatura, la intensidad de la radiación solar, la velocidad del viento y la turbidez del agua. Por otro lado, en sistemas predominantemente aeróbicos (por ej., lagunas aeróbicas poco profundas sin sistemas de aireación forzada) pueden crearse zonas carentes de oxígeno disuelto en los sedimentos del fondo.

Según datos del IPCC, en condiciones óptimas (ausencia total de oxígeno disuelto) un reactor anaeróbico es capaz de producir 0,25 kg de metano por cada kg de DQO (demanda química de oxígeno) degradada.¹⁰

El gas emitido por una unidad de tratamiento anaeróbica se denomina biogás y está compuesto por diversos gases, los cuales se mencionan en el cuadro 2.1.

¹⁰ Valor para efluente cloacal.

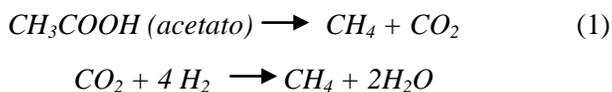
Cuadro 2.1

Metano (CH₄)	55 – 75%
Dióxido de carbono (CO₂)	25 – 45%
Monóxido de carbono (CO)	0 – 0,3%
Nitrógeno (N₂)	1 – 5%
Hidrógeno (H₂)	0 – 3%
Sulfuro de hidrógeno (H₂S)	0,1 – 0,5%
Oxígeno (O₂)	trazas

El mecanismo de degradación anaeróbica puede describirse en tres pasos básicos:

- **Hidrólisis:** el material particulado es convertido en compuestos solubles que luego pueden ser hidrolizados aún más a moléculas simples que son utilizadas por las bacterias que llevan a cabo la acidogénesis.
- **Fermentación:** en esta etapa, también conocida como acidogénesis, los ácidos grasos, aminoácidos y azúcares formados en el paso anterior son degradados aún más. Los principales productos de la fermentación son el acetato, el hidrógeno y el dióxido de carbono.
- **Metanogénesis:** esta fase es llevada a cabo por una clase de microorganismos anaeróbicos denominados metanógenos. Existen dos grupos de microorganismos metanógenos: los *acetoclásticos* (degradan el acetato a metano y dióxido de carbono) y los *utilizadores de hidrógeno* (generan metano a partir de hidrógeno y dióxido de carbono). El desarrollo de los organismos metanogénicos se ve inhibido en presencia de oxígeno disuelto.

Las siguientes ecuaciones ilustran, de forma resumida, el proceso metanogénico:



El cálculo básico que utilizan las metodologías aprobadas de la UNFCCC para estimar la producción de metano con base en la cantidad de contaminantes orgánicos removidos (expresados como DQO) es el siguiente:

$$CH_4 = B_o \times MCF \times DQO_d \quad (2)$$

siendo **B_o**: máxima capacidad de producción de metano del agua residual o lodo (0,25 kg CH₄/kg DQO); **MCF**: factor de corrección de metano, que representa la fracción de materia orgánica que será degradada en condiciones anaeróbicas, depende de las condiciones de oxigenación del medio; **DQO_d**: demanda química de oxígeno degradada, que representa el contenido de materia orgánica del agua servida que es degradada durante el tratamiento en esa unidad (kg DQO/m³).

El IPCC asigna al metano un potencial de calentamiento global de 21. Al ser un gas inflamable, el metano generado puede capturarse y utilizarse para la generación de energía calórica o eléctrica, o puede quemarse en un arresta llamas (llama abierta) para transformarlo en CO₂ y así reducir 21 veces su potencial de calentamiento global.¹¹

Metano

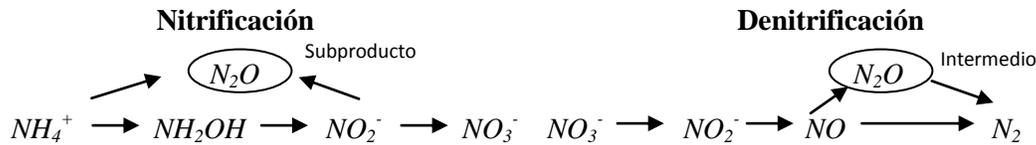
- Se genera por degradación biológica de contaminación orgánica en medios anaeróbicos.
- Es un GEI con potencial de calentamiento global 21 veces superior al del CO₂.
- Es el constituyente principal del biogás (55 – 75%).
- Puede capturarse y quemarse a llama abierta o utilizarse para generar energía; ambas opciones generan créditos de carbono.

2.2.2 Emisión de óxido nitroso

El óxido nitroso (N₂O) puede generarse como subproducto durante los procesos de nitrificación/denitrificación en plantas de tratamiento o en cursos de agua donde el efluente crudo o parcialmente tratado es descargado. La generación de N₂O ocurre principalmente durante los procesos metabólicos llevados a cabo por bacterias autótrofas que oxidan el amoníaco (p. ej. *Nitrosomonas*) y bacterias heterótrofas que transforman nitratos en gas nitrógeno (p. ej. *Pseudomonas*).

¹¹ La mayor o menor producción de metano es función de diferentes factores: nivel de biodegradabilidad de la materia orgánica que entra al reactor, temperatura dentro del reactor y volumen de mezcla completa real dentro del reactor. En general, cuanto mayores son estos parámetros, más aumenta el contenido del metano en el biogás; sin embargo, toxicidad, cortocircuitos hidráulicos, régimen de operación discontinua, solubilidad del metano, entre otros factores, reducen el porcentaje de metano en el biogás. Los modelos matemáticos desarrollados al momento para simular el comportamiento de estos reactores no logran predecir con precisión el contenido de metano en el biogás.

El N_2O es un GEI con potencial de calentamiento 310 veces superior al del CO_2 , de ahí su importancia.



En líneas generales, se puede decir que una planta de tratamiento biológico de aguas residuales tiene potencial para nitrificar cuando se cumplen las siguientes condiciones:

- Presencia de oxígeno disuelto.
- Temperatura media mayor a 15 °C.
- Tiempo de residencia hidráulico mayor a 5 horas.
- Tiempo de retención de sólidos mayor a 5 días.
- Existencia de NH_3 en el afluente a tratar.
- No existencia de tóxicos en niveles que inhiban el accionar de las bacterias nitrificadoras.
- pH mayor a 6,5 y menor a 8,5.

Los procesos de desnitrificación se diseñan con el fin de remover nitrógeno del efluente y así evitar la eutrofización¹² del cuerpo receptor o, en caso de usar el efluente tratado para recargar la napa freática, para controlar el nivel de nitratos en la misma.

El proceso de desnitrificación se logra introduciendo un ciclo de por lo menos dos reactores: un tanque anóxico (sin oxígeno disuelto) antes o después de un reactor aeróbico. De esta forma, el oxígeno ligado al nitrato generado a partir de la oxidación del nitrógeno amoniacal (nitrificación) se utiliza en el reactor anóxico, liberando nitrógeno gaseoso (N_2).

Debido al alto costo de este tipo de tratamiento, en los países en vías de desarrollo existen muy pocas plantas con procesos de nitrificación/desnitrificación; sin embargo, investigaciones recientes muestran que plantas que normalmente nitrifican (situación relativamente común en sistemas aeróbicos en regiones con temperaturas de aguas

¹² La eutrofización es un proceso no deseado por el cual se acelera el crecimiento de algas en el cuerpo acuático receptor por efecto de un exceso de nutrientes (nitrógeno y fósforo, entre otros) descargados a dicho cuerpo. La eutrofización altera el equilibrio del biosistema, dañándolo.

residuales superiores a los 18 °C) pueden denitrificar parcialmente en zonas de bajo nivel de mezcla (anoxia parcial). Bajo estas condiciones, puede emitirse N₂O.

En la actualidad, los proyectos MDL se enfocan principalmente en reducir la emisión del gas metano. La emisión de óxido nitroso en plantas de tratamiento, a pesar de ser un gas de efecto invernadero de gran importancia en sistemas que nitrifican/denitrifican, aún no se encuentra incluida en la mayoría de las metodologías aprobadas de la UNFCCC. Por lo tanto, gran parte de los proyectos MDL en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) carecen de un método estandarizado y

Óxido nitroso

- Se genera en plantas de tratamiento o cursos de agua durante los procesos de nitrificación/denitrificación.
- Su Potencial de Calentamiento Global es 310 veces superior al del CO₂.
- Las metodologías aprobadas lo consideran únicamente para proyectos de efluentes ganaderos (de gran escala) y de aplicación al terreno de lodos generados durante el tratamiento de aguas residuales.
- No existen aún modelos matemáticos adecuados para la predicción de emisiones de N₂O en plantas de tratamiento de aguas residuales. En la actualidad, se están llevando a cabo iniciativas de investigación al respecto.

aprobado que sirva para medir la reducción de emisiones de óxido nitroso y generar, en consecuencia, bonos de carbono.¹³

La emisión de óxido nitroso se contempla en el tratamiento a gran escala de efluentes ganaderos y en proyectos que involucran la aplicación al terreno de lodos generados durante el tratamiento de aguas residuales. Estos lodos poseen un gran contenido de nitrógeno, lo que aumenta las tasas de nitrificación y denitrificación del suelo, incrementando la emisión de N₂O.

En este caso, la emisión se calcula de la siguiente forma:

$$N_2O = S_{LA} \times W_N \times EF_{N_2O} \quad (3)$$

donde, **S_{LA}**: cantidad de lodo aplicado al suelo (toneladas/año); **W_N**: fracción de nitrógeno en el lodo; **EF_{N₂O}**: factor de emisión de óxido nitroso de lodo aplicado (0,016 tN₂O/tN).

¹³ Investigaciones recientes (Shiskowski 2008, Rosso & Stenstrom 2008) muestran que el N₂O podría ser tan importante como el CH₄ en PTAR. La limitación para proyectos MDL reside en la falta de instrumentos que permitan medir N₂O en la fase gaseosa (emisiones) de manera económica y con precisión aceptable para permitir el monitoreo en la fase de implementación del proyecto.

2.2.3 Consumo de energía

Dentro de una planta de tratamiento existen cuatro componentes que consumen la mayor cantidad de energía:

- Aireación y/o mezcla: mecánica de superficie o por difusores sumergidos.
- Bombas: flujo de efluente, recirculación de lodos.
- Calefacción del sistema de tratamiento (sólo para digestión anaeróbica).
- Manejo de lodos: bombas centrífugas para deshidratación, operación de filtros.

Dependiendo del sistema de tratamiento implementado, cada uno de estos componentes puede tener distinta implicancia dentro de la matriz energética.

En procesos totalmente aeróbicos, se estima que el consumo de energía para aireación consume alrededor de 1 kWh/kg DBO₅ removida. Este valor es altamente variable en función del sistema de aireación utilizado (p. ej., difusores de burbuja gruesa vs. difusores de poro fino), la ubicación de la planta (a mayor elevación sobre el nivel del mar, menor es la eficiencia de transferencia de oxígeno y, por ende, mayor el consumo eléctrico), el tipo de tratamiento (solamente remoción de carga orgánica, nitrificación/denitrificación, o solamente nitrificación; el consumo de energía eléctrica aumenta según esta progresión).

Principales consumos de energía en un sistema de tratamiento de aguas residuales:

- Aireación.
- Bombeo.
- Calefacción de digestores anaeróbicos (generalmente cubierto con una caldera que funciona con biogás generado en el digestor mismo).

El consumo de energía genera emisiones GEI:

- Por uso de combustibles fósiles *in situ* (poco común); y,
- Por uso de electricidad de red (generada en parte por plantas de generación que utilizan combustibles fósiles).

Resta luego convertir los MWh consumidos a lo largo del año, en toneladas de CO₂e/año, para lo cual se precisa conocer el factor de emisión de la red eléctrica (ver ecuación 4, pág. 23). Cada país o región dentro de un país tiene un factor de emisión diferente. Las diferencias pueden ser hasta de 100%, dependiendo del tipo de generación eléctrica dominante (sistemas hidroeléctricos emiten menos tCO₂e/MWh que sistemas termoeléctricos a base de carbón).

Además, se emite de forma directa (gas saliendo de la planta) alrededor de 1 kg CO₂/kg DQO removida, proviniendo de la degradación

de la materia orgánica contenida en el agua servida. Esta última emisión no debe ser considerada en la estimación de GEI ya que, como se dijo anteriormente, el CO₂ generado por la oxidación de materia orgánica se considera de origen antropogénico.

El requerimiento energético de una planta de tratamiento de aguas residuales depende de la capacidad de la planta, de la tecnología de tratamiento, del tipo de tratamiento que se le dé al lodo generado y de otros factores locales específicos.

Estudios realizados recientemente en plantas de tratamiento de lodos activados reportan que el consumo específico varía entre 30 y 60 KWh/(p.e. x año),¹⁴ del que aproximadamente dos tercios corresponden al sistema de aireación de la unidad de tratamiento biológico aeróbico. En plantas aeróbicas pequeñas, con capacidad de entre 1.000 y 5.000 p.e., pueden alcanzarse valores de consumo específico significativamente mayores, de hasta 150 KWh/(p.e. x año). Por otro lado, en lagunas de tratamiento no aireadas o reactores anaeróbicos sin sistema de calefacción, pueden alcanzarse valores de consumo menores a 10 KWh/(p.e. x año).¹⁵

En sistemas de tratamiento anaeróbicos, para lograr un grado de tratamiento eficiente la temperatura del reactor suele llevarse a 30 - 35 °C. La energía requerida por el sistema de calefacción depende, sobre todo, de la temperatura ambiente y del grado de dilución del agua servida a tratar. Para aguas servidas diluidas (200 mg DBO/l), la energía requerida para llevar la temperatura de 20 a 30 °C puede llegar a igualar la energía requerida en un sistema de lodos activados de la misma capacidad.

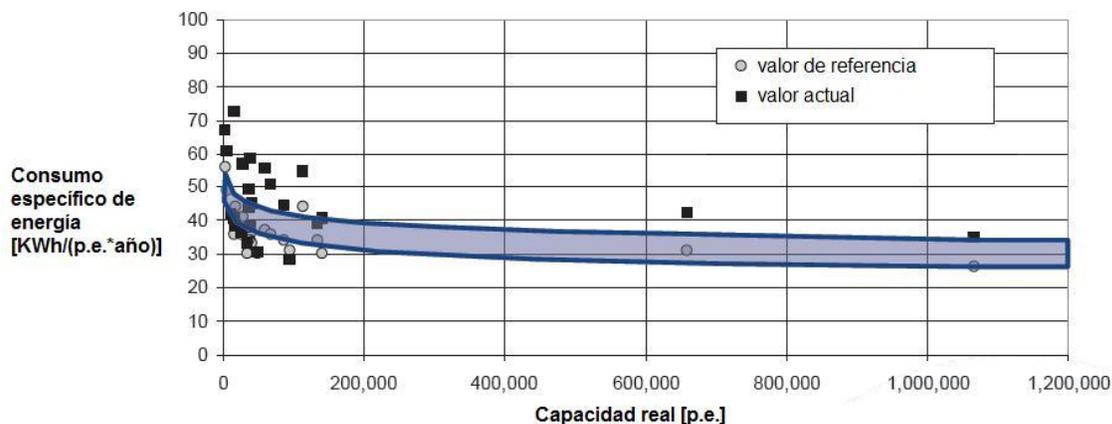
El gráfico 2.1 ilustra el consumo energético de plantas de tratamiento aeróbicas según su capacidad. Los valores están basados en un estudio realizado mediante el análisis de datos de 45 plantas de tratamiento de aguas residuales secundarias.

¹⁴ p.e.: poblador equivalente, es el que genera 40-60 g de DBO/día.

¹⁵ Kolisch, *et al.* 2009.

Gráfico 2.1

Consumo energético de plantas de tratamiento aeróbicas



Fuente: Mauer, *et al.* 2009.

Nota: p.e.: poblador equivalente, es el que genera 60 g de DBO/día.

En este gráfico se observa que, por ejemplo, para una planta de tratamiento para 120.000 p.e., el consumo ronda los 40 KWh/(p.e. x año).

Por otro lado, Kolisch *et al.* (2009) reportan un valor de consumo energético de 75 KWh/(p.e. x año) para plantas aeróbicas con capacidad de hasta 1.000 p.e. y de 32 KWh/(p.e. x año) para plantas con capacidad mayor a 100.000 p.e.

En las metodologías de la UNFCCC, la estimación de emisiones indirectas de GEI por consumo de energía se calcula básicamente de la siguiente forma:

$$EP = EE \times EF \quad (4)$$

donde, **EP**: emisión por consumo de energía (tCO₂e/año); **EE**: cantidad de energía consumida (kWh/año o toneladas de combustible/año); **EF**: factor de emisión de la red eléctrica (tCO₂e/kWh) o emisión por uso de combustible fósil (tCO₂e/tonelada de combustible).

El factor de emisión de una red eléctrica depende de cómo esté compuesta la matriz energética. Cuanto mayor sea la proporción de plantas generadoras que utilizan combustibles fósiles, mayor será el factor de emisión.

El IPCC publica en sus “Directrices para Realizar Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero” (en inglés, *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*) valores por defecto de factores de emisión para una gran cantidad de combustibles fósiles.

2.3 Generación de energía

El biogás generado en procesos de tratamiento anaeróbico está conformado por metano en 50 - 75% (el resto es en su mayoría CO₂). El metano es inflamable, por lo que puede ser aprovechado para generar energía eléctrica o calorífica para suplir la demanda energética de la planta de tratamiento. Además, al quemarlo, se transforma en CO₂, reduciendo su potencial de calentamiento global en 21 veces.

En PTAR anaeróbicas, el potencial de generación de energía es, en general, mayor a la demanda local de la planta, por lo que el excedente podría exportarse a la red eléctrica o utilizarse en instalaciones adyacentes. En estas plantas, es posible generar aproximadamente 35 KWh/(p.e. x año) de energía eléctrica.

En PTAR aeróbicas (por ej. lodos activados), cuando el tratamiento de los lodos generados se realiza en condiciones anaeróbicas, es posible instalar un sistema de captura de biogás y generación de energía para abastecer el total de la demanda energética del digestor (energía calorífica) y abastecer una fracción de la energía eléctrica demandada por el sistema de aireación del lodo activado. Para dicha configuración, Kolisch *et al.* (2009) afirman que pueden generarse aproximadamente 15 KWh/(p.e. x año) de energía eléctrica.¹⁶

A continuación, se presenta un método para la estimación del potencial de generación de energía eléctrica, basado en los procedimientos de cálculo publicados en las “Guías del IPCC para la Realización de Inventarios Nacionales de GEI”:¹⁷

$$GM = QBOD \times 365 \times Bo \times MCF \times DBO_d \times (1 - L) / DM \quad (5)$$

$$GE = GM \times ESG$$

¹⁶ Asumiendo una producción de biogás de 20 l/(p.e. x día), con un contenido de 64% metano y una eficiencia de generación eléctrica de 0.33.

¹⁷ 2006 *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*.

donde, GM = Cantidad de metano generado ($\text{m}^3\text{CH}_4/(\text{p.e. x año})$); QBOD = Carga orgánica específica que recibe el sistema ($\text{kg DBO}/(\text{p.e. x día})$); Bo = Máxima capacidad de producción de metano del agua residual o lodo ($0,6 \text{ kg CH}_4/\text{kg DBO}$); MCF = Factor de Corrección de Metano, representa la fracción de materia orgánica que será degradada en condiciones anaeróbicas, depende del tipo de tratamiento; DBO_d = Fracción de la DBO degradada por el sistema; L = Fracción del biogás generado que se pierde en el sistema de captura, ruteo y utilización; DM = Densidad del metano a c.n.t.p. ($0,67 \text{ kg}/\text{m}^3$); GE = Cantidad de energía eléctrica generada ($\text{KWh}/(\text{p.e. x año})$); ESG = Eficiencia del sistema generador (aprox. entre 2 - 3 $\text{KWh}/\text{m}^3\text{CH}_4$).

En la ecuación propuesta se observan los factores que influyen en la cantidad de energía que puede generarse en un determinado contexto. El MCF es el factor que determina el grado en que la materia orgánica contenida en el agua residual se convierte en metano. A mayor temperatura y menor contenido de oxígeno, se generará más metano. Luego, la energía generada con esa cantidad de metano depende de la eficiencia del sistema de generación utilizado.

Ejemplo de aplicación de la fórmula propuesta para una planta de tratamiento que consiste en un reactor anaeróbico cerrado con sistema de captura de metano y generación de energía eléctrica:

Para el cálculo se adoptaron los siguientes valores:

- $\text{QBOD} = 0,06 \text{ kg DBO}/(\text{p.e. x día})$
- $\text{MCF} = 1$. Corresponde a un sistema totalmente anaeróbico, como lo es un reactor cerrado.
- $\text{DBO}_d = 0,7$. Valor típico para un sistema anaeróbico.
- $L = 0,1$.
- $\text{ESG} = 2,5 \text{ KWh}/\text{m}^3\text{CH}_4$. Sistema de generación medianamente eficiente.

$$\text{GM} = 0,06 \text{ kg DBO}/(\text{p.e. x día}) \times 365 \text{ días} \times 0,6 \text{ kg CH}_4/\text{kg DBO} \times 1 \times 0,7 \times 0,9 / 0,67$$

$$\text{GM} = 12,4 \text{ m}^3\text{CH}_4/(\text{p.e. x año})$$

$$\text{GE} = 12,4 \text{ m}^3\text{CH}_4/(\text{p.e. x año}) \times 2,5 \text{ KWh}/\text{m}^3\text{CH}_4$$

$$\text{GE} = 31 \text{ KWh}/(\text{p.e. x año})$$

Se observa que el valor calculado por este método es muy similar al propuesto por Kolisch *et al.* (2009) de 35 $\text{KWh}/(\text{p.e. x año})$.

Suponiendo que la planta se encuentra en una zona de clima templado y que, por lo tanto, no se necesita calentar el reactor para lograr una temperatura de tratamiento adecuada (aproximadamente 30 °C), el consumo energético de la planta rondaría los 7 kWh/(p.e. x año). De esta forma, se obtiene una generación neta de 24 kWh/(p.e. x año).

Cuadro 2.2

Ejemplos de consumo y generación de energía para distintos tipos de configuración

Tipo de tratamiento	Energía consumida	Energía generada	Generación/consumo neto
Lodo activado	- 40	-	- 40
Lodo activado + digestor anaeróbico de lodos con generación de energía	- 45	15	- 30
Reactor anaeróbico con sistema de calefacción + generación de energía	- 25	35	10
Reactor anaeróbico sin sistema de calefacción + generación de energía	- 7	35	28

Nota: Para una población de 120.000 habitantes [kWh/(p.e. x año)].

2.4 Características particulares de las unidades de tratamiento más comunes

A continuación se describen las características principales de las unidades de tratamiento más comunes en relación con su capacidad de emisión de GEI y consumo y generación de energía.

2.4.1 Lagunas de tratamiento

Las lagunas de tratamiento son cuerpos de agua diseñados para recibir y tratar el agua servida a lo largo de tiempos de retención hidráulicos prolongados (varios días) en comparación con otros sistemas biológicos (p. ej., lodos activados). Cuando es necesario, éstas cuentan con un fondo cubierto de material impermeable (p. ej. arcilla, membrana plástica) que evita que el agua residual se infiltre y contamine el agua subterránea.

El tratamiento con lagunas es utilizado cuando no hay limitaciones de terreno, ya que requieren de una superficie mucho mayor que otros tipos de tratamiento. Por otro lado, el mantenimiento y operación requeridos por las lagunas de tratamiento (y los costos

asociados) son notablemente inferiores a los de otros sistemas, como lodos activados o reactores anaeróbicos.

Con respecto a la transferencia de oxígeno, en lagunas de tratamiento cobran importancia otros mecanismos, además de los de aireación forzada (mecánica o por difusores sumergidos), éstos son:

- Acción de los organismos fotosintéticos que captan la luz solar y el CO₂ disuelto liberando O₂ al medio; y
- Transferencia de oxígeno por superficie (este mecanismo ocurre debido a la diferencia entre la presión parcial del oxígeno en el aire y en el agua, y se ve intensificado por acción del viento).

A continuación se describen los distintos tipos de lagunas de tratamiento.

Lagunas anaeróbicas

Como su nombre lo indica, estas lagunas tienen la propiedad de operar en ausencia de oxígeno disuelto; habitualmente se diseñan con una profundidad de entre 2 y 5 metros. Gracias a esto, la proporción del líquido que recibe luz solar es escasa, restringiéndose la producción de oxígeno por fotosíntesis. El tiempo de residencia hidráulico para el que se diseñan estas lagunas oscila entre los 20 y 150 días, dependiendo del nivel de tratamiento requerido y la carga orgánica recibida.

Los niveles de tratamiento requerido, las altas concentraciones de material orgánico y la disponibilidad de terreno hacen que las lagunas anaeróbicas sean muy utilizadas para el tratamiento de desechos animales (p. ej. en granjas y tambos).

Normalmente, este tipo de tratamiento puede necesitar de un “pulido” mediante tratamiento aeróbico adicional. Su consumo de energía puede considerarse nulo.

Una desventaja de las lagunas anaeróbicas es que sin un mantenimiento adecuado pueden presentar problemas de olores.

Características de las lagunas anaeróbicas:

- Profundidad: 2 a 5 metros.
- Consumo energético casi nulo.
- El efluente puede necesitar un tratamiento adicional.
- Alta generación de metano: posibilidad de aprovechamiento energético.
- Buen potencial de implementación de proyectos MDL.



Laguna anaeróbica cubierta con sistema de quemado de biogás (Chile).

Esta clase de lagunas tiene relevancia en lo que concierne a proyectos MDL, ya que la gran mayoría de las existentes en América Latina y el Caribe carecen de algún tipo de cobertura superficial destinada a capturar el biogás generado para luego quemarlo o reutilizarlo.

En este tipo de situación de base pueden implementarse sistemas de recuperación y utilización o quemado de metano para así reducir al mínimo la emisión de GEI y obtener bonos de carbono.

El biogás capturado puede utilizarse para generar electricidad o calor y así cubrir parte del requerimiento energético del establecimiento que dio origen al efluente, o exportarse a la red.

En países donde el factor de emisión de GEI de la red eléctrica (tCO_2e/MWh) es relativamente bajo, se presenta otra opción que consiste en transformar la laguna anaeróbica en una laguna aeróbica. Esta transformación se logra mediante la instalación de algún sistema de aireación en la laguna existente o reemplazando las lagunas existentes por un sistema de lodos activados. De esta forma, se logra una reducción en la emisión de GEI al evitar la generación anaeróbica de metano, pero se aumentan las emisiones indirectas por uso de energía en aireación. El balance de estos dos factores debe evaluarse previo a la toma de decisión.

Lagunas aeróbicas

Las lagunas aeróbicas pueden utilizar sistemas de aireación de superficie o por difusores sumergidos o estar diseñadas con el fin de aumentar al máximo la eficiencia de los procesos de aireación naturales. En el primer caso su eficiencia es mayor, lo cual reduce tiempo de retención hidráulico necesario y, por consiguiente, el área requerida.

Características de las lagunas aeróbicas:

- No generan metano.
- Si poseen un sistema de aireación, su consumo energético puede ser considerable.
- Emisión de GEI indirecta por consumo de energía.
- Su potencial de formar parte de un proyecto MDL depende, sobre todo, del nivel de consumo energético.

La energía consumida por el sistema de aireación es un factor importante que se debe contemplar en el momento de evaluación del proyecto.

Si se quiere evitar la necesidad de un sistema de aireación, la laguna debe estar diseñada en función de la dirección predominante del viento y debe contar con la superficie requerida para suplir la necesidad de oxígeno. Al depender exclusivamente de los mecanismos fotosintéticos y de transferencia por superficie, su profundidad debe ser escasa (menor a 2 metros) para que la luz solar alcance la totalidad del líquido. Esta condición hace que este tipo de lagunas aireadas naturalmente sean las que requieren mayor superficie.

La generación de metano en lagunas aeróbicas es despreciable, pero cuando poseen un sistema de aireación, consumen una cantidad de energía relativamente importante dependiendo del grado de aireación.

Cuando el consumo energético es elevado, las lagunas aeróbicas son susceptibles de formar parte de un proyecto MDL. Transformando una laguna aeróbica aireada en una laguna anaeróbica, se reduce o elimina el consumo de energía y, por lo tanto, las emisiones indirectas de GEI.

Las lagunas aeróbicas son utilizadas principalmente en lugares donde minimizar los problemas de olor es un factor importante.

Lagunas facultativas

Cuando las lagunas sin sistema de aireación adicional superan una determinada profundidad (factor que depende de la eficacia de los procesos naturales de aireación), se forma una zona inferior (que incluye el manto de lodos sedimentados) que carece de oxígeno disuelto y donde, por lo tanto, la descomposición es anaeróbica, y una superior donde el oxígeno disuelto es suficiente para mantener los procesos aeróbicos.

Características de las lagunas facultativas:

- Zona aeróbica + zona anaeróbica.
- Generación de metano media.
- Consumo energético casi nulo.
- Poco susceptibles a formar parte de un proyecto MDL.

En estas lagunas facultativas, la producción de metano suele ser menor a la mitad de la de una laguna anaeróbica con generación máxima (B_0) y su consumo de energía nulo, por lo que no es susceptible de formar parte de un proyecto MDL.

2.4.2 Lodos activados

Básicamente, un sistema de lodo activado está constituido por un reactor aireado donde se desarrollan los microorganismos que degradan la materia orgánica, un sedimentador que separa la fase líquida de la sólida (biomasa) y un sistema que recircula la biomasa nuevamente

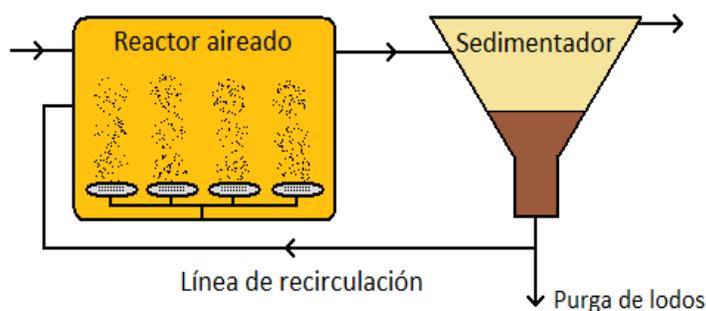
Características de los sistemas de lodos activados:

- Reactor aireado + sedimentador + sistema de recirculación de lodos.
- Poca superficie requerida.
- Consumo energético intensivo.
- Emisión nula de metano.
- Poseen potencial para formar parte de un proyecto MDL debido a que sus emisiones indirectas de GEI son elevadas.

hacia el reactor. Una fracción considerablemente menor a la biomasa recirculada es purgada del sistema como compensación por el crecimiento de microorganismos. Al separar la biomasa y retener gran parte de la misma dentro del sistema, esta configuración reduce notablemente el tamaño necesario del reactor en comparación con sistemas de lagunas.

La aireación del reactor se realiza por medio de difusores sumergidos o por aireadores superficiales mecánicos.

Al ser un sistema aeróbico, cuando es operado correctamente no genera metano. Este tipo de sistemas presenta un consumo de energía intensivo debido al mecanismo de aireación.



Por este motivo, a pesar de no generar emisiones directas de GEI, los sistemas de lodos activados indirectamente emiten una importante cantidad durante la generación de energía eléctrica.

Se puede recuperar parte de la energía utilizada en el sistema de aireación cuando las plantas de lodos activados cuentan con un sistema de digestión anaeróbica para el tratamiento de los lodos purgados del lodo activado, por medio de la recuperación y utilización del biogás del digestor. De esta manera, se pueden reducir los costos de operación de la planta.

Otra opción para implementar proyectos MDL sobre este tipo de plantas está contemplada en la Metodología Aprobada AMS III.H. Dicha metodología considera un caso en que la situación de base consiste en un sistema de tratamiento aeróbico, el cual es

cambiado por un sistema anaeróbico con recuperación de metano, con el consiguiente ahorro de energía y la eventual producción de energía a partir de biogás.

Como se menciona en el siguiente punto (Reactores anaeróbicos), también es posible implementar un proyecto MDL en el cual se transfiera de un tratamiento anaeróbico sin recuperación a uno aeróbico.



Sistema de lodo activado: superficie del reactor aireado.

Los factores con mayor influencia en la posibilidad de reducir emisiones de GEI pasando de un sistema aeróbico a uno anaeróbico o viceversa, son los siguientes:

- Sistema aeróbico:
 - Consumo de energía en aireación: determina las emisiones indirectas del sistema.
 - Condiciones de operación: un sistema aeróbico operado de forma ineficiente o sobrecargado puede generar metano.
 - Manejo del lodo generado: en un sistema aeróbico, la cantidad de lodo generado es relativamente mayor a la de un sistema anaeróbico. Si el lodo es tratado de forma anaeróbica sin recuperación de metano, las emisiones de GEI pueden ser considerables.
- Sistema anaeróbico:
 - Pérdidas en el sistema de captura, ruteo y utilización de biogás: existen reactores en los que debido a su diseño y al sistema de captación instalado, las pérdidas pueden ser menores a 5% del biogás generado. Por otro lado, en lagunas donde se instaló una membrana superficial y un sistema de ruteo y quemado/utilización de biogás, estas pérdidas pueden estar en el orden de 20%.
 - Generación de energía con el biogás capturado: la generación de energía permite reducir o eliminar el consumo neto de la planta. En algunos casos, el excedente puede exportarse a la red eléctrica.

Estos factores deben ser cuantificados utilizando las ecuaciones presentadas en el cuadro A (Anexo II), de acuerdo con el escenario de base y el proyecto a implementar.

En el Capítulo 6 se proporcionan casos de aplicación en que se evalúa la factibilidad de pasar de un sistema anaeróbico sin recuperación de metano a uno aeróbico y viceversa.

2.4.3 Reactores anaeróbicos

Un reactor anaeróbico es un tanque cerrado, no aireado, que puede o no contar con un mecanismo de mezcla para mejorar el contacto entre los microorganismos y el material orgánico a degradar. El medio se encuentra libre de oxígeno disuelto y las distintas

variables ambientales (p. ej. temperatura, pH, carga orgánica, presencia de inhibidores) pueden controlarse para lograr una tasa metabólica alta. Si la tasa metabólica se optimiza, la producción de metano se acercará a la máxima posible.

Características de los reactores anaeróbicos:

- Consisten en un tanque cerrado, libre de oxígeno disuelto.
- Son más eficientes en el rango de los 30 – 40 °C: en climas fríos pueden requerir de un sistema de calefacción.
- El efluente puede necesitar un tratamiento adicional.
- Máxima generación de metano: posibilidad de aprovechamiento energético.
- Gran potencial de implementación de proyectos MDL.

Las bacterias que intervienen en la degradación anaeróbica de la materia orgánica se dividen en tres tipos según sea su rango térmico óptimo: psicrófilas, mesófilas y termófilas. Las dos últimas son, por lo general, preponderantes en digestores anaeróbicos, siendo las mesófilas las más comunes, ya que los reactores termófilos son mucho más sensibles a

la variación de temperatura y carga orgánica recibida y precisan de sistemas de calentamiento y mezcla más sofisticados.

Las bacterias mesófilas tienen su rango óptimo de temperatura entre 30 °C y 40 °C, por lo que en climas templados o fríos requieren de un sistema de calefacción que la mantenga dentro de dicho rango. Esto se logra haciendo recircular parte del licor de mezcla a través de un intercambiador de calor. Generalmente, el biogás capturado es utilizado para generar este calor.

Al igual que para las lagunas anaeróbicas, para lograr la calidad de efluente final requerida para descargar, los reactores anaeróbicos pueden necesitar de un “pulido” mediante un tratamiento aeróbico adicional. Estos reactores son utilizados tanto para tratar agua residual como para digerir lodos generados en otras unidades de tratamiento.

En lo referente a proyectos MDL en este tipo de sistemas, la Metodología Aprobada AMS III.H contempla casos en los que se instala un sistema de recuperación de biogás a un sistema de tratamiento anaeróbico que en la línea de base carece de este sistema.

El biogás puede ser capturado y quemado en una mecha para así generar bonos de carbono correspondientes a la cantidad de metano quemado, o puede ser utilizado como fuente de energía para abastecer el propio sistema de tratamiento y/o exportar energía a la red. De esta manera se genera una reducción de GEI adicional por la energía (eléctrica o calórica) que se evita producir y que de otra forma sería generada a partir combustibles fósiles.

Otra opción de MDL se encuentra contemplada en la Metodología Aprobada AMS III.I, la cual considera el caso en que una planta de tratamiento anaeróbica sin sistema de recuperación de biogás sea sustituida por una planta de tratamiento aeróbica. En esta nueva planta se evita la generación de metano, pero aumentan las emisiones indirectas de GEI por consumo de energía para aireación.

Reactores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*): En este tipo de reactores se concentra la actividad bacteriana para acelerar la degradación de la materia orgánica. El líquido se introduce en el reactor lentamente desde su parte más baja. Su diseño produce la formación de partículas de lodo de peso específico mayor al del agua, los cuales quedan suspendidos en el digestor formando una capa concentrada de partículas en suspensión. Los microorganismos anaeróbicos se sitúan en dicha capa y degradan la materia orgánica a medida que ésta fluye lentamente. El biogás se produce en esta capa y burbujea hacia la parte superior del reactor. El uso de este tipo de reactor es común cuando el espacio es limitado y el líquido a tratar

Biodigestores de bajo costo

Es una alternativa económica para tratar efluentes de establecimientos ganaderos pequeños.

- Consisten en un tubo flexible construido con lámina de polietileno.
- Es un sistema de tratamiento anaeróbico.
- Genera biogás, que puede ser aprovechado para reemplazar el consumo de gas natural o generar electricidad.
- Costo aproximado: US\$ 250/vaca.
- Su potencial para formar parte de un proyecto MDL es bajo: a tan pequeña escala, los proyectos MDL individuales dejan de ser financieramente viables.



posee fundamentalmente materia orgánica soluble; aunque en Brasil existe extensa experiencia en el uso de estos reactores para tratamiento de aguas residuales municipales.

2.5 Manejo de lodos y emisión de GEI

2.5.1 Concepto

Los sólidos removidos durante el tratamiento del agua residual (también llamados lodos) se encuentran en forma de líquido o líquido semisólido, y pueden contener entre 0,25 y 12% de sólidos (en peso).

El cuadro siguiente ilustra las principales fuentes de sólidos en una planta de tratamiento:

Cuadro 2.3

Unidad o proceso	Tipo de sólidos
Rejas	Sólidos gruesos
Desarenado	Arenilla y escoria
Sedimentación primaria	Lodos orgánicos e inorgánicos
Sedimentación secundaria	Lodos biológicos

El manejo de los lodos generados en una planta de tratamiento consta de dos etapas:

1. Dentro de la planta de tratamiento; y,
2. Fuera de la planta de tratamiento.

2.5.2 Manejo de lodos dentro de la PTAR

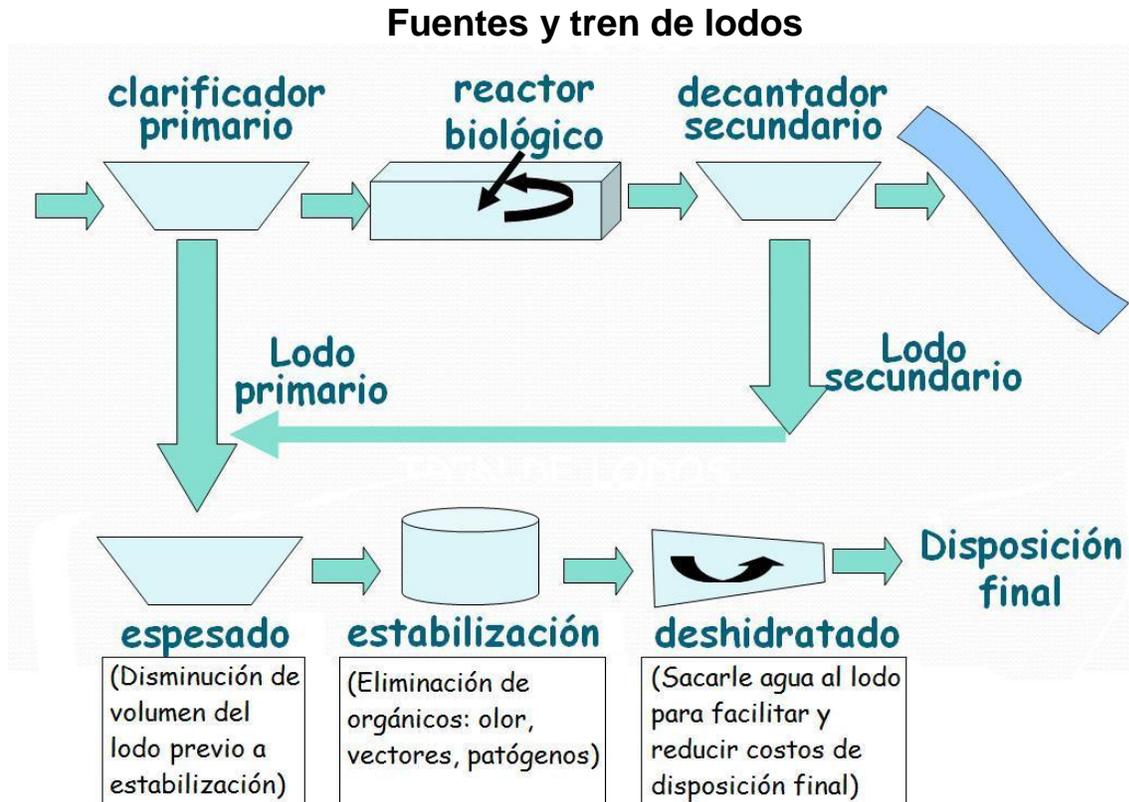
Existen cuatro funciones principales en las actividades de manejo de lodos dentro de una planta de tratamiento:

- Espesado;
- Estabilización;
- Deshidratación; y,
- Almacenamiento.

Al sistema que dentro de una planta de tratamiento tiene la función de espesar, estabilizar y deshidratar el lodo producido, se lo denomina “Tren de lodos”.

El siguiente gráfico ilustra las fuentes de lodos y el tren de lodos de una planta de tratamiento de lodos activados.

Gráfico 2.2



Espesado

Al estar constituido por un gran porcentaje de agua, resulta muy útil espesar el lodo con el fin de reducir su volumen, y así facilitar su tratamiento, transporte y disposición final. Para esto se utilizan sistemas de espesamiento (p. ej. por gravedad, centrifugación, flotación). Como ilustración, un lodo activado que cuando es purgado contiene aproximadamente 0,6% de sólidos, puede ser llevado a 4% mediante un espesador.

Fuentes de lodos en plantas de tratamiento:

- Sedimentación primaria y tratamiento secundario.

Actividades de manejo de lodos dentro de una PTAR:

- Espesado, estabilización, deshidratación y almacenamiento.

No existen emisiones directas de GEI durante esta etapa del manejo de lodos; las emisiones indirectas dependen del consumo energético.

Estabilización

Los lodos biológicos están compuestos de la misma materia orgánica que contenía el agua residual antes de ser tratada, pero en forma de material celular de los microorganismos que la degradaron.

Con el objetivo de reducir patógenos, eliminar olores e inhibir, reducir o eliminar el potencial de putrefacción, estos lodos deben ser estabilizados. Esto se logra mediante la reducción biológica del contenido de sólidos volátiles (p. ej. digestión aeróbica o anaeróbica, compostaje) o por la adición de sustancias químicas que inhiban el desarrollo de los microorganismos (p. ej. estabilización alcalina).

A los procesos de estabilización por digestión aeróbica o anaeróbica se les aplican los mismos principios generales de emisión de GEI y generación de energía que los explicados para reactores y lagunas de tratamiento de aguas residuales.

Deshidratación

Luego del espesado y estabilización, el lodo sigue siendo líquido y por diversas razones (p. ej. reducir el costo de transporte, facilitar el manejo, hacerlo apto para incineración o compostaje) es conveniente deshidratarlo en mayor grado. Con el fin de lograr un material semisólido, se utilizan centrifugas, filtros de banda o filtros de prensa, o bien se deja reposar a cielo abierto en playas de secado por un determinado periodo de tiempo; así, se obtienen lodos con una concentración de sólidos de entre 20% y 40%.

No existen emisiones directas de GEI durante esta etapa del manejo de lodos; las emisiones indirectas dependen del consumo energético.

Métodos de almacenamiento

A veces, los lodos biológicos digeridos necesitan ser almacenados por un determinado periodo de tiempo antes de ser dispuestos o aplicados al terreno. Los lodos líquidos pueden ser almacenados en tanques o lagunas; mientras que los lodos deshidratados pueden acumularse en playas o contenedores de almacenaje.

Si bien los lodos ya deben haber sido estabilizados previo a su almacenaje, aún contienen material orgánico putrescible, lo cual limita el tiempo de almacenaje.

Tanto en tanques y lagunas de almacenamiento como en playas y contenedores, la actividad biológica continúa, por lo que los lodos se estabilizan y concentran aún más. Durante este periodo, se genera una cantidad de metano que depende de la carga orgánica y de las condiciones de oxigenación que presente el lodo (generalmente las condiciones son anaeróbicas, con una fina capa superficial aeróbica).¹⁸ De cualquier forma, esta generación difícilmente llega a ser suficiente para justificar la implementación de un sistema de captura y quemado o utilización. Igualmente, debe considerarse en el momento de evaluación de proyectos de reducción de GEI que incluyan manejo de lodos.



Digestor anaeróbico y almacenado de biogás en Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) en Osorno, Chile. Detalle de sistema de captura de gas en domo de digestor anaeróbico en otra localidad.

2.5.3 Manejo de lodos fuera de la PTAR

A continuación se describen las actividades del manejo de lodos que ocurren fuera de una PTAR, las cuales consisten principalmente en su disposición final.

La elección del método de disposición final es una decisión compleja que depende, entre otras cosas, de las características del lodo, las regulaciones locales, la disponibilidad de opciones y los costos relacionados.

¹⁸ Cuanto mayor sea la presencia de oxígeno, menor será la generación de metano.

Aplicación al terreno

Los lodos biológicos digeridos pueden ser utilizados como acondicionador de suelos en explotaciones agrícolas o forestales, o en suelos degradados (p. ej. erosionados, sobreexplotados). La utilización en terrenos agrícolas o forestales es beneficiosa debido a que la materia orgánica mejora la estructura del suelo, su aireación y su capacidad de absorber y retener agua; además, contiene macronutrientes (p. ej. nitrógeno, fósforo, potasio) y micronutrientes (p. ej. hierro, manganeso, cobre, zinc) que ayudan al crecimiento de las plantas.

Por otro lado, el contenido de microorganismos patógenos, metales pesados o sales debe controlarse ya que puede constituir un serio problema en este tipo de aplicaciones.

Con respecto a la generación de GEI, son importantes las emisiones de N₂O debido al incremento en las tasas de nitrificación y denitrificación que produce

un aumento en el contenido de nitrógeno del suelo. También se emite una pequeña cantidad de metano debido a las zonas anaeróbicas presentes en el lodo aplicado.

Disposición en relleno sanitario

Para ser apto para disposición en rellenos sanitarios, el lodo debe estar deshidratado y en algunos casos (dependiendo de las regulaciones locales) se requiere que esté estabilizado.

Opciones de disposición final de lodos y emisiones de GEI relacionadas

- **Aplicación al terreno:**
 - Usado como acondicionador de suelos.
 - Debe controlarse el contenido de patógenos, metales pesados y sales.
 - Importante fuente de emisión de óxido nitroso.
- **Disposición en relleno sanitario:**
 - El lodo debe estar deshidratado.
 - Al ser un medio anaeróbico, la generación de metano suele ser elevada.
- **Combustión:**
 - Máxima reducción de volumen.
 - Destrucción de patógenos.
 - Mayor inversión inicial y costo de mantenimiento que en otros sistemas.
 - Se deben controlar las emisiones gaseosas.
- **Compostaje aeróbico:**
 - Se obtiene un fertilizante de alta calidad.
 - La generación de metano suele ser despreciable.
 - Debe controlarse su calidad por la posible presencia de metales pesados.

Las condiciones anaeróbicas que reinan en un relleno sanitario hacen que se genere metano durante la degradación de los residuos orgánicos, por lo que es necesario contar con sistemas de captación y utilización de biogás.¹⁹

En caso de que el lodo no estabilizado se disponga en rellenos sanitarios sin sistema de captación y destrucción de biogás, pueden aplicarse metodologías que consideran el compostaje, incineración, gasificación o pirólisis de residuos orgánicos (además de las que se refieren exclusivamente a lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales). En este tipo de proyectos, se evita la emisión de metano que ocurriría en el relleno sanitario.

Combustión

Durante la combustión se produce la oxidación total de los sólidos orgánicos contenidos en el lodo.

Las principales ventajas de esta opción son la reducción máxima del volumen, la destrucción total de patógenos y compuestos tóxicos, y la posibilidad de recuperación de energía. Por otro lado, este tipo de tecnología requiere de una gran inversión inicial, los costos de operación y mantenimiento suelen ser elevados, y puede generar emisiones gaseosas perjudiciales al medio ambiente.

Para que un lodo pueda ser incinerado no es necesario que se encuentre estabilizado, pero sí deshidratado hasta un nivel de humedad que varía con el tipo de combustión.

Compostaje aeróbico

En este proceso, el material orgánico contenido en el lodo es degradado biológicamente, resultando en un compuesto estable parecido al humus. Aproximadamente de 20% a 30% del material orgánico es transformado en dióxido de carbono y agua.

Durante la descomposición, la temperatura del compost alcanza entre 50 °C y 70 °C, y los microorganismos patógenos entéricos son destruidos.²⁰ El compuesto final puede ser utilizado como acondicionador de suelos.

¹⁹ El diseño de rellenos sanitarios escapa del alcance de esta nota técnica.

²⁰ Los patógenos entéricos son microorganismos que infectan a las personas a través de la ruta fecal oral, invadiendo el sistema gastrointestinal.

Es importante el control de calidad del compost para asegurarse de que no contiene metales pesados.

El compostaje nunca es totalmente aeróbico, siempre existen zonas anaeróbicas dentro de las pilas. La proporción de estas zonas depende de la calidad de operación del proceso (p. ej. periodicidad de volteo de pilas), pero de cualquier forma la producción de metano suele ser pequeña.



Compostaje aeróbico de lodos biológicos.

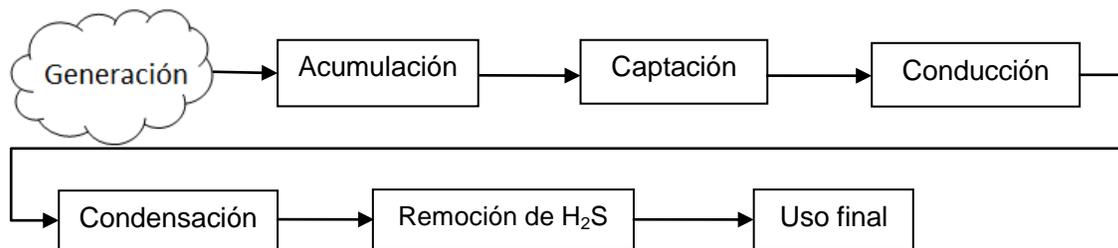
Fuente: International Potato Center.

Al igual que en el caso de combustión, si el lodo no estabilizado está siendo dispuesto en rellenos sanitarios sin recuperación de biogás, puede aplicarse una metodología que contemple el metano que se evita producir en el relleno por medio de la implantación de un proceso de compostaje aeróbico.

3 Procesos de captación y utilización de metano

El biogás generado en procesos de tratamiento anaeróbico está conformado en su mayor parte por metano (50 - 75%).²¹ Este gas es inflamable, por lo que puede ser utilizado con fines energéticos (p. ej. como combustible en calderas o generadores de electricidad). Además, al ser un GEI con un potencial de calentamiento global de 21 (ver cuadro 1.1, pág. 2), puede ser quemado en una llama abierta para transformarlo en CO₂ y así reducir su Potencial de Calentamiento en 21 veces.

El proceso realizado desde la generación del biogás hasta su uso final, puede ser esquematizado de la siguiente manera:



3.1 Generación de biogás

La primera etapa, generación, ya ha sido discutida en las secciones previas.

3.2 Acumulación

El biogás producido queda atrapado en la parte superior del reactor o laguna por una cubierta flexible o rígida. En pequeñas instalaciones, la forma más común de acumularlo es en dicha cubierta; sin embargo, existen casos en que el biogás no es acumulado en el reactor sino en estructuras *ad hoc*. En las grandes instalaciones es común que antes de la acumulación se remueva el ácido sulfhídrico para evitar la corrosión, y se realice un lavado del gas con el fin de separar el dióxido de carbono para así reducir el volumen necesario de la unidad de acumulación.

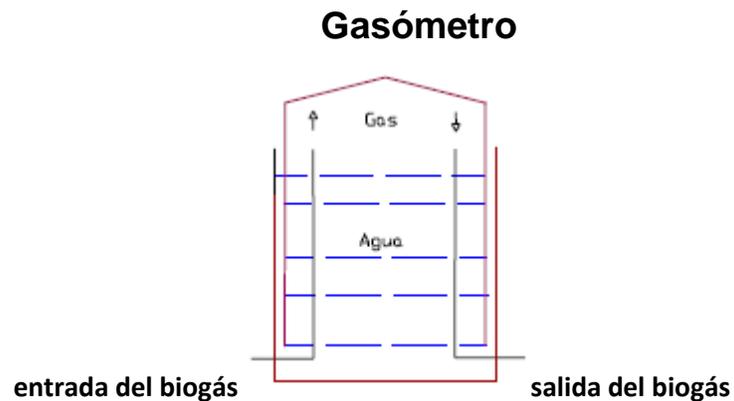
²¹ La amplitud de este rango se debe a que la proporción de metano en el biogás depende de la composición de la materia orgánica presente en el efluente a tratar y de la carga orgánica (cantidad de materia orgánica que entra al reactor anaeróbico).

3.3 Captación

El biogás es removido del sitio de acumulación mediante un vacío generado en la tubería de conexión por una bomba situada al final de la cañería. Para permitir la entrega de gas a presión constante, se utiliza un gasómetro o un regulador de presión que libera el exceso de gas del reactor cuando ésta excede un límite establecido.

El gasómetro consta de un cilindro lleno de agua junto con otro cilindro en forma invertida, evitando de esta manera cualquier posible fuga del gas.

Gráfico 3.1



Fuente: Universidad de La Salle, Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria Bogotá, 2006.

3.4 Conducción

La conducción del biogás en sistemas pequeños se realiza generalmente por mangueras de PVC, las cuales son inertes al sulfuro de hidrógeno. Para evitar posibles daños producidos por la luz solar, personas o animales, las mangueras deben estar enterradas o elevadas y pintadas. En instalaciones donde la distancia entre el punto de captación de biogás y el punto de utilización son mayores, se utilizan tuberías rígidas de acero o PVC, que ofrecen mayor resistencia mecánica que las mangueras.

3.5 Condensación

El biogás contiene cierto porcentaje de vapor de agua, el cual arrastra gran cantidad de partículas sólidas inertes. Una vez que el gas abandona el digestor o la estructura de acumulación, ingresa a la tubería de conducción donde la temperatura disminuye notablemente, produciéndose la condensación del vapor de agua.

El vapor debe ser removido del biogás por los siguientes motivos:

- Produce obstrucciones en las cañerías; y,
- Tanto el vapor de agua como las partículas que acarrea, disminuyen el rendimiento energético del biogás.

Proceso de captación y utilización de biogás

1. **Generación:** se origina cuando existen condiciones anaeróbicas (ver capítulo 2).
2. **Acumulación:** puede realizarse en la parte superior del mismo reactor o laguna donde se generó o en estructuras independientes construidas para tal fin.
3. **Captación:** se utiliza un gasómetro para lograr un suministro a presión constante.
4. **Conducción:** se realiza generalmente por mangueras de PVC.
5. **Condensación:**
 - Se produce dentro de los tubos de conducción.
 - El vapor de agua disminuye el rendimiento energético del biogás.
6. **Remoción de ácido sulfhídrico:**
 - el ácido sulfhídrico es corrosivo,
 - tiene fuerte olor,
 - trae problemas de salud y
 - produce daños en motores e instalaciones.
 - Se remueve haciendo pasar el biogás por esponjillas metálicas.
7. **Uso final del biogás:**
 - Puede usarse como combustible en un motor o generador,
 - en una caldera para generar calor,
 - en una unidad de cogeneración para generar electricidad y calor, o
 - puede quemarse para transformarlo en CO₂ y así reducir en 21 veces su potencial de calentamiento.

Los métodos más utilizados para remover el vapor de agua son:

- Cuando las cañerías no son muy largas, se disponen con una pendiente hacia el digestor de modo que el agua fluya hacia el mismo por gravedad a medida que condensa.
- Para cañerías más largas, se disponen a lo largo de la tubería recipientes donde se recoge el agua condensada y luego se extrae.

3.6 Remoción de ácido sulfhídrico

El ácido sulfhídrico se encuentra en el biogás en concentraciones de 0,1% a 0,5%. Es recomendable que este compuesto sea removido para evitar los siguientes inconvenientes:

- Corrosión de las tuberías e instalaciones;
- Fuerte olor;
- Problemas de salud;
- Producción de ácido sulfúrico (H_2SO_4), que ocurre cuando el sulfhídrico se combina con el oxígeno. El H_2SO_4 daña motores e instalaciones.



Esponjilla metálica.

Fuente: Universidad de La Salle, Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria Bogotá, 2006.

Debido a su bajo costo, efectividad, simplicidad y baja resistencia al flujo de gas, el método comúnmente utilizado para remover el ácido sulfhídrico es el “método de la caja seca”. Consiste en hacer circular el gas a través de un recipiente hermético que contiene esponjillas de hierro finamente divididas (como podrían ser las esponjillas de cocina de marca comercial). La reacción por la que estas esponjillas remueven el ácido es:



Una vez que la esponjilla está saturada de sulfuro ferroso (FeS) se la deja ventilar, de modo que se libere el azufre y la esponjilla pueda ser reutilizada. Este proceso puede ser representado por la siguiente reacción:



Tanque de remoción de H_2S dentro del cual se encuentran las esponjillas.

Fuente: Douglas W. Williams, P.E. 2005.

3.7 Uso final del biogás

Los principales usos que se le pueden dar al biogás son:

- **Combustible para un motor o generador.**

Mediante simples adaptaciones, los motores que funcionan con diesel pueden ser utilizados con biogás como combustible reemplazando hasta en 80% el combustible original. En los motores a gasolina puede utilizarse 100% biogás. Los motores más comúnmente adaptados para el uso de biogás son los motores diesel. La adaptación en motores diesel consiste en conectar la entrada de biogás al conducto que une el filtro de aire con el múltiple de admisión. El ingreso del biogás en el filtro de aire produce una aceleración del



Generador que utiliza biogás como combustible.

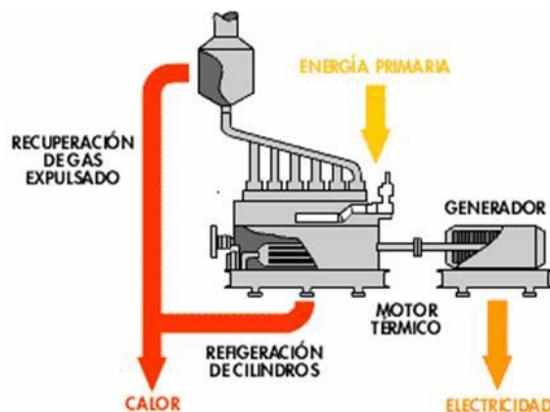
Fuente: Douglas W. Williams, P.E. 2005.

motor, para contrarrestar este efecto el control automático de la bomba de inyección hace que disminuya el suministro de diesel. Esta adaptación es posible en los motores de cuatro tiempos pero no es recomendable en los de dos tiempos.

- **Generación de energía térmica.** Las calderas o calefactores que habitualmente utilizan propano o gas natural pueden ser simplemente adaptadas para ser utilizadas con biogás. En plantas de tratamiento anaeróbicas ubicadas en regiones de clima frío, el biogás suele ser utilizado

para calentar los reactores anaeróbicos, acelerando así el proceso de degradación orgánica y, por ende, la generación de gas metano.

- **Cogeneración.** El biogás puede utilizarse para generar en forma simultánea energía mecánica mediante un motor o generador, y energía térmica mediante un



Fuente: Guascor, 2006.

intercambiador de calor donde se aprovechan las altas temperaturas de los gases de escape y del agua de refrigeración para calentar agua. De esta manera aumenta notablemente el rendimiento. Las desventajas de los sistemas de cogeneración son el alto costo de inversión inicial y que la demanda de energía debe ser constante, ya que estos sistemas no se adaptan fácilmente a los cambios de demanda de potencia.

- **Quemado del metano.** Este proceso se realiza en instalaciones donde el volumen de biogás obtenido y los precios de la energía no justifican el aprovechamiento energético del biogás.

El uso final que se le dé al biogás dependerá de las necesidades del contexto.

3.8 Impactos ambientales de la captación y utilización de biogás

Aspectos positivos

- Disminución de olores.
- Disminución de emisiones de gases de efecto invernadero.
- Reemplazo de combustibles no renovables por un combustible renovable.
- Potencial para bonos de carbono (CER).

Impactos negativos potenciales

Al manejar un gas inflamable existen peligros de explosiones. Por este motivo, el biogás debe ser utilizado siguiendo todas las medidas de seguridad establecidas para el manejo de gas natural.

4 Métodos de cálculo de reducción de emisiones

Una parte fundamental en el estudio de un proyecto MDL consiste en la estimación de la reducción de emisiones de GEI que el proyecto puede lograr. En el presente capítulo se describen métodos de cálculo para la estimación aproximada del potencial de generación de CER (Certificados de Reducción de Emisiones) en proyectos MDL.

4.1 Componentes del cálculo de reducción de emisiones

Todas las metodologías utilizan el mismo cálculo base para estimar reducción de emisiones:

$$ER = BE - PE$$

donde, ER: reducción de emisiones; BE: emisiones de base; PE: emisiones del proyecto.

Las emisiones de base son las que se generan en el escenario de base. Este escenario no es necesariamente el escenario actual, sino el más probable al momento de implementar el proyecto MDL. Las emisiones del proyecto son las que se generarán una vez que éste se encuentre implementado.

Para cada proyecto particular, las metodologías establecen cuáles son las emisiones que deben considerarse en el escenario de base y de proyecto. (Ver sección 1.6 – Ciclo del Proyecto MDL).

Los componentes principales de emisión que se calculan en ambos escenarios para la mayoría de las metodologías son:

- **Descomposición anaeróbica del agua servida.** La descomposición anaeróbica de la materia orgánica contenida en el agua servida genera metano. Cuando el proyecto consiste en un sistema anaeróbico, éste debe incluir la implementación de un sistema de captura y quemado/utilización del metano generado. De esta forma, las emisiones se ven reducidas al mínimo. Estas emisiones se deben a pérdidas en el sistema de captura y quemado/utilización y pueden asumirse como 20% del total del biogás generado. Al ser sistemas cerrados, la presencia de oxígeno disuelto es nula,

por lo que la producción de metano es máxima ($MCF=1$).²² En las ecuaciones, esta emisión se expresa bajo la forma básica de $Q \times COD_d \times MCF \times B_o \times GWP_{CH4}$.

- **Descomposición anaeróbica del lodo generado en el tratamiento del agua servida.** Este componente se considera únicamente cuando, debido a las actividades del proyecto, cambia la forma de manejo de lodos o la cantidad producida (p. ej. un sistema aeróbico de lodos activados produce una cantidad de lodos considerablemente mayor a la de un reactor anaeróbico promedio). Aplican los mismos conceptos que para la “Descomposición anaeróbica del agua servida”. Según la metodología aplicable, en las ecuaciones se expresa como $Q \times COD_d \times MCF \times B_o \times GWP_{CH4}$ ó $S \times DOC \times MCF_S \times DOC_F \times F \times 16/12 \times GWP_{CH4}$.
- **Consumo de combustibles fósiles o electricidad.** El mayor consumo de energía eléctrica se observa, por lo general, en los sistemas de aireación en tratamientos aeróbicos (60-70% del consumo total de la planta). Los reactores anaeróbicos que utilizan sistemas de calefacción también consumen una cantidad importante de energía, pero generalmente incorporan un sistema de recuperación de biogás que se usa para este fin. Otro consumo digno de contemplar es el combustible auxiliar utilizado en ciertos proyectos de incineración de lodos. En el marco de una estimación aproximada, los consumos menores pueden despreciarse. En las ecuaciones, esta emisión se expresa como $EC \times EF$.
- **Desplazamiento de una fuente de energía fósil por una fuente renovable (generación de energía a partir de biogás).** Si el proyecto incluye la utilización de biogás con fines energéticos, es posible cubrir total o parcialmente el requerimiento energético del sistema de tratamiento. En caso de existir un excedente (en forma de biogás refinado o electricidad), éste puede ser exportado. La reducción de emisión que se logra es producto de la cantidad de energía generada por el factor de emisión de la red o del combustible desplazado. En plantas de tratamiento que consisten en sistemas de lodos activados, existe la opción de tratar los lodos purgados (lodos generados en exceso) de forma anaeróbica, capturando el biogás generado y utilizándolo para generar energía eléctrica que luego se utilizará para abastecer

²² El factor de corrección de metano (MCF) representa la fracción de materia orgánica que será degradada en condiciones anaeróbicas. Depende de las condiciones de oxigenación del medio.

parcialmente el consumo energético del sistema de aireación del lodo activado. En sistemas anaeróbicos es posible generar toda la energía para operar la planta internamente. En las ecuaciones, este componente se expresa como $EG \times EF$.

Además de los componentes arriba mencionados, existen fuentes de óxido nitroso (N_2O) que deben contabilizarse en los siguientes proyectos específicos:²³

- Tratamiento de efluentes ganaderos en proyectos que estimen una reducción de GEI mayor a 60.000 tCO₂e/año (proyectos de gran escala).
- Aplicación al terreno de lodos generados durante el tratamiento de aguas residuales (solo proyectos de gran escala).

4.2 Cálculo de reducción de emisiones

En el Anexo II se presenta una herramienta para estimar el potencial de reducción de emisiones de cada proyecto MDL, según condiciones de base y proyecto. Las ecuaciones provienen de la simplificación de los cálculos propuestos por las Metodologías Aprobadas aplicables a cada caso. Basándose en estos cálculos, puede estimarse la reducción aproximada que se espera logre un determinado proyecto.

Para obtener más detalles y requisitos de cada caso o realizar una estimación de reducción de emisiones más acertada, se recomienda leer las Metodologías Aprobadas.²⁴

²³ Investigaciones recientes (Shiskowski, 2008; Rosso & Stenstrom, 2008) muestran que el N_2O podría ser tan importante como el CH_4 en PTAR.

²⁴ Las metodologías aprobadas se publican en: <<http://cdm.unfccc.int/methodologies/index.html>>.

5 Lineamientos para un análisis costo-beneficio

5.1 Consideraciones generales

En el momento de evaluar la factibilidad de un proyecto MDL, deben analizarse los costos y beneficios asociados en cada aspecto del mismo.

Básicamente, éstos pueden agruparse de la siguiente forma:

- Costos de evaluación y diseño del proyecto.
- Costos de transacción (procesamiento de información a lo largo del ciclo de aprobación de proyecto).
- Costos de inversión inicial.
- Costos de operación y mantenimiento del nuevo sistema.
- Beneficios por la venta de CER.
- Beneficios por ahorro de energía (si el proyecto contempla la generación de energía a partir de biogás).
- Beneficios sanitarios, sociales y ambientales.

En líneas generales, puede decirse que en proyectos de este tipo considerados viables, el beneficio por venta de CER será el componente que haga que el Valor Actual Neto (VAN) del proyecto pase de negativo a positivo. Si el análisis financiero del proyecto sin considerar el beneficio por venta de CER diera un VAN positivo, es probable que el proyecto no sea aprobado como MDL por no cumplir con el requisito de adicionalidad. Esto se debe a que al ser el proyecto financieramente viable sin la necesidad de otorgación de Certificados de Reducción de Emisiones, se asume que se llevaría a cabo de todas formas, sin necesidad del marco MDL; es decir, no cumpliría la condición de adicionalidad financiera.

Es importante recalcar que en la mayoría de los casos conocidos en el sector de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, las reducciones de emisiones no

justifican por sí solas la ejecución del proyecto; por lo tanto, no se puede hablar de tamaño de proyecto mínimo para justificar estas inversiones, ni de puntos de quiebre.²⁵

De cualquier forma, este tipo de proyectos contiene beneficios no fácilmente cuantificables en términos económicos, como son los beneficios sociales (p. ej., mejora en la calidad de vida de las personas por reducción de olores), sanitarios (p. ej., reducción en las tasas de morbilidad y mortalidad relacionadas con enfermedades de origen hídrico) y ambientales (mejora en el entorno a los puntos de descarga de efluentes, por mencionar alguno); es por esto que un VAN negativo no siempre significa que el proyecto sea inviable.

5.2 Costos de evaluación y diseño del proyecto

Para determinar la viabilidad de un proyecto, es importante realizar una adecuada evaluación del potencial de reducción de emisiones y el costo de implementación.

Dependiendo del tamaño del proyecto, éste puede requerir de un monitoreo intenso durante la etapa de evaluación y diseño para lograr un conocimiento detallado de la situación de base y poder estimar con mayor precisión el potencial de reducción de emisiones y el costo de implementación del proyecto.

Para los proyectos de pequeña escala pueden utilizarse valores por defecto propuestos por el IPCC para muchos de los parámetros de cálculo, y así reducir los costos en esta etapa.

El costo de esta etapa de identificación y evaluación de proyecto usualmente oscila entre los 5.000 y 40.000 USD, dependiendo del tamaño del proyecto.

5.3 Costos de transacción

En el contexto del Protocolo de Kioto, los costos de transacción son aquellos que surgen del cumplimiento del conjunto de requisitos institucionales, conocidos como el “ciclo del proyecto MDL”.

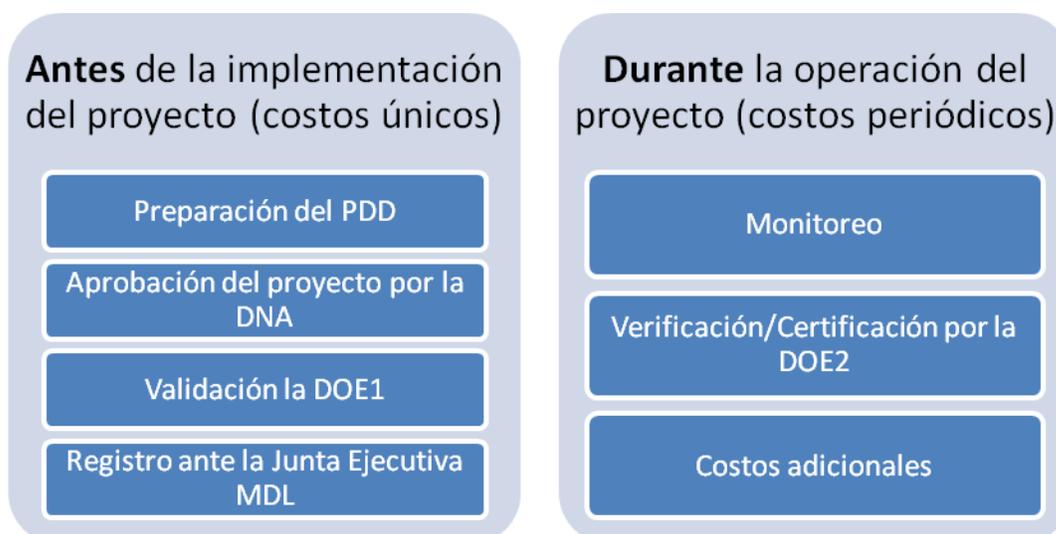
²⁵ Nótese la diferencia con proyectos MDL en rellenos sanitarios, donde se han establecido líneas generales como condiciones mínimas para implementar un MDL: 100 t de RSU por día, 500.000 t de RSU ya depositadas y un tirante de 10 metros. Similarmente, en el tema de tratamiento de aguas residuales provenientes de granjas porcinas, se establecieron valores mínimos (puntos de quiebre) de 10.000 a 20.000 animales producidos por año para lograr un VAN positivo (Clavin y Nolasco, 2008).

Los principales costos de transacción se encuentran relacionados con las siguientes acciones:

- Preparación del Documento de Diseño del Proyecto (PDD): suele ser el mismo consultor contratado para realizar la evaluación y diseño del proyecto.
- Aprobación del proyecto por parte de la Autoridad Nacional Designada (DNA).
- Validación por la Entidad de Operación Designada 1 (DOE1).
- Registro ante la Junta Ejecutiva del MDL.
- Monitoreo: recolección de datos acerca del funcionamiento del proyecto.
- Verificación y certificación por parte de la Entidad de Operación Designada 2 (DOE2).
- Costos adicionales: tasa para el “Fondo de adaptación de las Naciones Unidas” (2% del valor de los CER emitidos), honorarios legales (contratos de compra-venta de CER), comisión del broker que comercializa los bonos (5 – 20% del valor de los CER comercializados).

El costo de monitoreo obedece a la complejidad y tamaño del proyecto, por lo que no es fácil dar una estimación acertada. De forma general, podría decirse que se encuentra en 1% y 5% del costo total del proyecto.

Gráfico 5.1



Con respecto a las otras acciones, el siguiente cuadro ofrece una idea de costos estimados:

Cuadro 5.1

Concepto	Costo (USD)
Preparación del PDD y presentación ante la autoridad nacional	5.000 – 40.000
Validación	10.000 – 40.000
Registro (ver forma de cálculo a continuación)	0 – 350.000
Honorarios legales	10.000 – 40.000
Verificación y certificación (anual)	3.000 – 15.000

Con base en la reducción de GEI promedio anual (estimada), la Junta Ejecutiva del MDL estableció el costo de registro según lo siguiente:

- 0,10 USD por cada tCO₂e/año reducida, para las primeras 15.000 tCO₂e/año.
- 0,20 USD por cada tCO₂e/año reducida, para las que excedentes.

La tasa máxima será de 350.000 USD.

Se encuentran exentos del pago de registro:

- Los proyectos que estimen una reducción total menor a 15.000 tCO₂e.
- Proyectos en los denominados “Países menos desarrollados”²⁶ (LDC, *Least Developed Countries*).

5.4 Costos de inversión inicial, operación y mantenimiento

La inversión requerida para la implementación del proyecto debe estimarse de acuerdo a las características particulares del proyecto propuesto.

²⁶ Listado de LDC: Afganistán, Malawi, Angola, Maldivas, Bangladesh, Mali, Benin, Mauritania, Bután, Mozambique, Burkina Faso, Myanmar, Burundi, Nepal, Cambodia, Níger, República Central de África, Ruanda, Chad, Samoa, Comoros, Santo Tomé y Príncipe, República Democrática del Congo, Senegal, Yibuti, Sierra Leona, Guinea Ecuatorial, Islas Solomon, Eritrea, Somalia, Etiopía, Sudán, Gambia, Timor-Leste, Guinea, Togo, Guinea-Bissau, Tuvalu, Haití, Uganda, Kiribati, República Unida de Tanzania, República Democrática Popular Lao, Vanuatu, Lesoto, Yemen, Liberia, Zambia, Madagascar.

El costo de operación y mantenimiento es relativo a la complejidad del nuevo sistema de tratamiento (o adaptación del antiguo) y debe ser analizado con base en experiencias con sistemas similares.

Como guía, se citan a continuación rangos de valores de inversión inicial para la construcción de plantas de tratamiento para los sistemas más comunes:

- Lagunas de tratamiento: 10 – 30 USD/habitante.
- Sistema de lodos activados: 40 – 120 USD/habitante.
- Reactor anaeróbico (UASB): 20 – 40 USD/habitante.

5.5 Beneficios por la venta de CER

Básicamente, el ingreso por venta de CER es igual al volumen de CER emitidos multiplicado por el valor de cada CER.

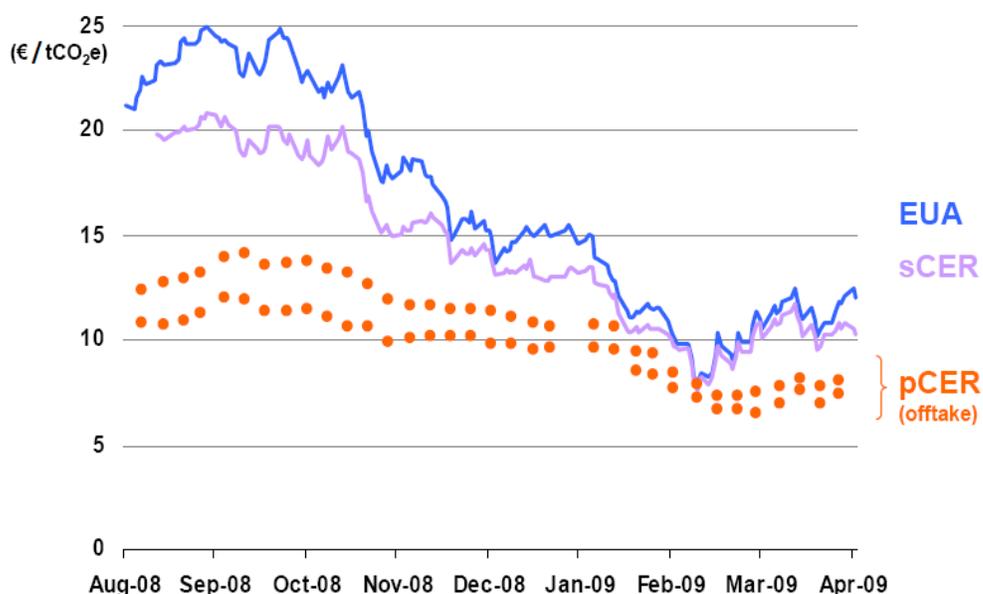
El valor del CER presenta una gran variación con el tiempo, por lo que es muy importante considerar el valor de mercado al momento de iniciarse la evaluación y realizar un análisis de sensibilidad del proyecto para diferentes valores del CER. A modo de ilustración, el gráfico 5.2 muestra las variaciones en el precio de CER durante 2008-2009.

No necesariamente el retorno por las reducciones de emisiones (ER) logradas está marcado por el valor de mercado. Existen proyectos en que el valor a cobrar por tonelada de CO₂e que se obtendrá dependerá de la negociación entre el dueño del proyecto y el comprador de los bonos. Por ejemplo, se obtendrán precios más bajos a los de mercado en aquellos proyectos en que se busca el pago por adelantado por las ER, o en aquellos casos en que el comprador invierte a riesgo en el proyecto (ya sea en los costos de diseño e implementación o de transacción).

Por lo general, como es lógico de esperar, los mejores precios se obtienen en proyectos que no requieren ningún pago por adelantado o inversión.

Gráfico 5.2

Variaciones en el precio de los CER



Fuente: State and Trend of the Carbon Market 2009, World Bank.

NOTAS:

EUA: *European Union Allowances* (Permisos de emisión de la Unión Europea); pCER: CER primarios (CER comprados directamente a entidades de países en vías de desarrollo que los generaron); sCER: CER secundarios (CER comprados a otro que no sea la entidad que los generó).

5.6 Beneficios por ahorro de energía

En proyectos que contemplen la generación de energía (eléctrica o calórica) a partir de biogás, esta actividad representa un beneficio adicional.

El valor monetario de este beneficio depende del precio local de la energía eléctrica o combustible cuyo uso se pretende desplazar por el uso de biogás; además, presenta una gran oportunidad para regiones donde resulta difícil acceder a combustibles fósiles o energía de red.

Basándose en los lineamientos proporcionados en la sección 2.3 de la presente nota técnica y teniendo en cuenta los costos de energía locales, pueden estimarse los beneficios por ahorro de energía del proyecto a lo largo de su ciclo de vida.

Costos y beneficios asociados a un proyecto MDL

- Costos de evaluación y diseño del proyecto.
- Costos de transacción (durante las distintas etapas del ciclo MDL).
- Costos de inversión inicial.
- Costos de operación y mantenimiento del nuevo sistema.
- Beneficios por la venta de bonos (dependen del valor de mercado de los CER o del precio negociado de las ER).
- Beneficios por ahorro de energía (si el proyecto contempla la generación de energía a partir de biogás).
- Beneficios socio-ambientales (p. ej. generación de empleo, mejora de la calidad ambiental en la zona donde se implementa el proyecto).

5.7 Beneficios socio-ambientales

Por reglamento, un proyecto MDL debe contribuir al desarrollo sostenible de la región donde se implementa. Esto quiere decir que intrínsecamente traerá consigo beneficios socio-ambientales.

Algunos ejemplos de beneficios socio-ambientales que aportan estos proyectos son:

- Generan empleos debido a la demanda de mano de obra calificada para la construcción, operación y mantenimiento de las nuevas instalaciones.
- Mejoran la calidad ambiental de las zonas afectadas mediante la

implementación de sistemas de tratamiento de efluentes más efectivos.

- Contribuyen a crear una matriz energética más limpia a través de la sustitución de combustibles fósiles por combustible renovable (biogás).
- Ayudan a reducir el uso de fertilizantes químicos mediante la generación de fertilizantes biológicos de alta calidad.

5.8 Alternativas para reducir costos en proyectos pequeños

Paquete de proyectos (*bundling*)

Para ciertos proyectos de pequeña escala resulta difícil absorber los altos costos de evaluación y desarrollo del proyecto, validación, monitoreo y verificación, aun bajo las modalidades simplificadas para los proyectos MDL de pequeña escala. Por esta razón se creó el concepto de “paquete (ramillete) de proyectos” (en inglés, *bundling*).

Mediante la agrupación de una cantidad significativa de proyectos pequeños en un solo proyecto MDL, puede lograrse una considerable reducción de los costos de transacción en los que se incurre en las distintas etapas del ciclo MDL. Así, puede decirse que el

objetivo de esta modalidad es permitir que pequeños proyectos, que en forma individual no hubieran tenido la oportunidad, puedan presentarse como proyectos MDL dentro de una agrupación.

Principios generales aplicables a agrupaciones de proyectos:

- Los proyectos que deseen agruparse en un paquete deben indicarlo al momento de solicitar el registro del proyecto.
- La composición de la agrupación no podrá cambiar con el tiempo (es decir, no se podrá agrupar o desagrupar ningún proyecto luego del registro del paquete).
- Todos los proyectos que componen el paquete deben tener el mismo periodo de acreditación²⁷ (misma fecha de comienzo y duración).
- En la solicitud de registro deberá incluirse un formulario con información de la agrupación.
- El formulario debe incluir temas como: título del paquete de proyectos, descripción general, participantes del proyecto, locaciones, tipos y categorías, cantidad estimada de reducción de emisiones, periodo de acreditación y plan de monitoreo.
- Para el registro debe presentarse un solo Documento de Diseño de Proyecto (PDD) para todo el paquete.
- Si la reducción de emisiones supera los 60.000 tCO₂e/año (límite para proyectos de pequeña escala) en algún año, la reducción se considerará igual a este límite.
- Pueden tener una duración máxima de 21 años.

Además, los siguientes principios se aplican a agrupaciones de proyectos del mismo tipo,²⁸ categoría y tecnología:

- Los proyectos pueden utilizar el mismo escenario de base.
- Una Entidad Operacional Designada puede validar esta agrupación.
- Los proyectos pueden utilizar un plan de monitoreo común.

²⁷ El periodo de acreditación es durante el cual las reducciones de emisiones son verificadas y certificadas por la Entidad Operacional Designada.

²⁸ Los tipos de proyecto son: (I) Cambio de combustible, (II) Cambio de proceso y (III) Cambio de tecnología.

Programático MDL

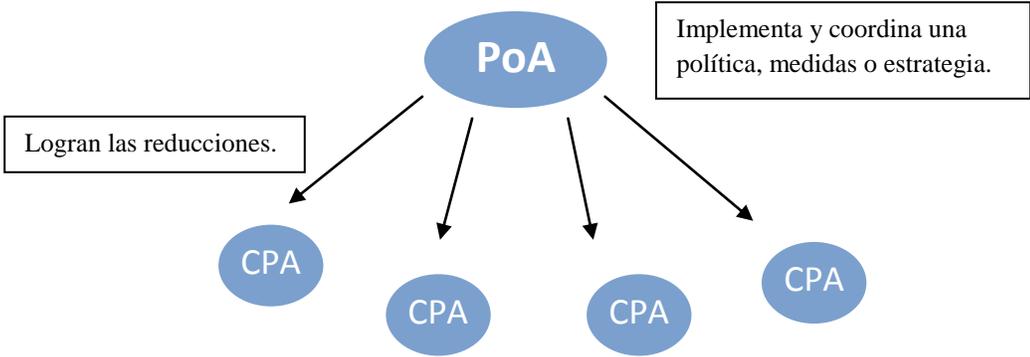
Un Programático MDL (PoA, *Programme of Activities*) es una iniciativa voluntaria de reducción de emisiones, definida para un cierto tipo de actividades, que puede ser coordinada e implementada por una entidad pública o privada.

Al igual que los Paquetes de Proyectos, esta modalidad posibilita la implementación de proyectos que de forma individual no serían viables. El coordinador del proyecto debe presentar un Documento de Diseño del Programa MDL (PoA-DD) en que se definan, entre otras cosas:

- Criterios de elegibilidad para que un determinado proyecto (CPA, por *CDM Programme Activity*) sea considerado para formar parte del programático.
- Límites geográficos del programa.
- Política o meta que el programa persigue.
- Plan de monitoreo.

Gráfico 5.3

Programático MDL



Otras características de los Programáticos MDL son:

- Los proyectos individuales (CPA) pueden incorporarse al programa en cualquier momento desde el inicio del mismo.
- Los CPA terminan cuando vence el programa.
- Cada CPA debe presentar su Documento de Diseño de Proyecto (CPA-DD).
- El límite geográfico puede extenderse a uno o más países.
- Aplica la misma metodología para todos los CPA (aunque puede solicitarse la aplicación de una combinación de metodologías a todos los CPA).
- Duran un máximo de 28 años y requieren renovación cada 7 años.

Programa MDL vs. paquete de proyectos	
Programa MDL	Paquete de Proyectos
Pueden agregarse proyectos en cualquier momento de la vida del programa.	El paquete debe registrarse con todos los proyectos individuales ya identificados.
Duración máxima 28 años.	Duración máxima 21 años.
PoA-DD + CPA-DD	PDD
Los CPA pueden empezar en distintas fechas.	Todos los proyectos deben tener el mismo periodo de acreditación.

6 Lineamientos para un análisis de pre-factibilidad de proyectos MDL

En esta sección se presentan los lineamientos generales a seguir para realizar un análisis de pre-factibilidad de un determinado proyecto MDL en el campo del tratamiento de aguas residuales.

El análisis de pre-factibilidad consiste, básicamente, en la comparación de los costos y beneficios asociados a un proyecto MDL. Los pasos a seguir son los siguientes:

- Análisis de la línea de base y estimación de la posibilidad teórica de implementar un proyecto MDL.
- Definición de las posibles alternativas con respecto a la reducción de GEI para ese determinado escenario.
- Cálculo estimado de la reducción de emisiones de las alternativas potencialmente viables.
- Cálculo estimado de los costos asociados a las alternativas potencialmente viables.

6.1 Análisis de la línea de base

El primer paso a seguir durante un análisis de factibilidad radica en el estudio de la situación de base. La situación de base no es necesariamente la situación actual, sino la más probable en el momento de implementar el proyecto MDL. Para definir la línea de base, la UNFCCC publicó una guía llamada “Herramienta combinada para identificar el escenario de base y demostrar la adicionalidad” (*Combined tool to identify the baseline scenario and demonstrate additionality*), la cual puede ser encontrada en el siguiente URL: <<http://cdm.unfccc.int/methodologies/PAMethodologies/approved.html>>.

En líneas generales, puede decirse que para que exista potencial de implementación de un proyecto MDL deben cumplirse dos condiciones básicas:

- Que en la situación de base se estén generando y liberando GEI a la atmosfera (ya sea directa o indirectamente).

- Que dicha situación de base esté contemplada en alguna Metodología Aprobada de la UNFCCC.

A continuación se presentan las situaciones de base que poseen potencial de reducir GEI en el marco de un proyecto MDL:

- **Tratamiento anaeróbico sin sistema de recuperación de metano.** Como fue descrito en el Capítulo 2, los sistemas de tratamiento anaeróbicos generan metano y, al carecer de una instalación destinada a capturarlo, el metano es liberado a la atmosfera. Esta situación es aplicable tanto al tratamiento anaeróbico de aguas residuales como a la digestión anaeróbica de los lodos generados por un sistema de tratamiento de aguas residuales.
- **Tratamiento aeróbico (con aireación forzada).** Los sistemas de aireación requieren de energía, que puede ser proporcionada por la red eléctrica, por un generador eléctrico instalado en el sitio o mediante un motor a combustión. En el caso de extraer energía de la red eléctrica, la planta de tratamiento genera emisiones indirectas de GEI (se denominan indirectas porque ocurren fuera de los límites físicos de la planta de tratamiento pero se deben, indirectamente, al funcionamiento de la planta). Si se utiliza un motor que funcione a base de combustibles fósiles (ya sea un generador eléctrico o un motor que mueva el sistema de mezcla/aireación), se están generando y emitiendo GEI en forma directa. Esta situación es aplicable tanto al tratamiento aeróbico de aguas residuales como a la digestión aeróbica de los lodos generados por un sistema de tratamiento de aguas residuales.
- **Descarga directa a un curso de agua anóxico.** Al igual que en el caso de tratamiento anaeróbico, la degradación de la materia orgánica en un cuerpo de agua que no contiene oxígeno disuelto genera metano.
- **Lodo no tratado se dispone en un relleno sanitario.** En muchos casos, el lodo generado por un sistema de tratamiento de aguas residuales es dispuesto en un relleno sanitario sin antes ser digerido. En los rellenos sanitarios (o basurales no gestionados), el medio donde se encuentran los residuos dispuestos es en gran parte anaeróbico, por lo que su inevitable degradación produce metano. En el caso de que el relleno sanitario en cuestión posea un sistema de captura de metano, la emisión

de metano se presume mínima, eliminando las posibilidades de implementar un proyecto MDL.

6.2 Definición de las posibles alternativas

Dependiendo de la línea de base definida, existen generalmente distintas alternativas posibles a implementar para lograr una reducción en la emisión de GEI en el marco de un proyecto MDL.

En el Anexo II, cuadro A, se definen los posibles escenarios de proyecto para cada una de las situaciones de base definidas en el punto 6.1.

6.3 Cálculo de reducción de emisiones y costos asociados

Con el objeto de comparar las distintas alternativas de proyecto para una determinada línea de base, deben estimarse el potencial de reducción de emisiones de GEI y los costos asociados a cada alternativa.

En el Capítulo 4 se describió la metodología para realizar la estimación de reducción de emisiones.

En el capítulo 5 se definieron los lineamientos a seguir para evaluar los costos asociados a un proyecto MDL; además de otros beneficios que pueden obtenerse a partir de un proyecto de este tipo (adicional a los beneficios asociados con la generación de bonos de carbono).

Este tipo de proyectos contiene beneficios no fácilmente cuantificables en términos económicos, como son los beneficios ambientales; es por esto que un VAN negativo no siempre significa que el proyecto sea inviable.

6.4 Casos de aplicación

A continuación se presentan, a modo de ejemplo, tres casos de aplicación en que se evalúa la factibilidad de distintos proyectos MDL.

6.4.1 Caso 1

Una planta de tratamiento recibe las aguas residuales de una ciudad de 120.000 habitantes. La planta consiste en un sistema de lagunas. El afluente pasa en una primera instancia por

dos lagunas anaeróbicas en serie sin sistema de recuperación de metano y luego por una laguna aeróbica poco profunda (aireación natural –no forzada).

Análisis de la línea de base

Dado que las leyes del país donde se encuentra esta planta no exigen la instalación de un sistema de recuperación de metano, y el sistema de tratamiento con lagunas es una práctica común, éste puede considerarse como el escenario de base. Este escenario está contemplado dentro de las Metodologías Aprobadas de la UNFCCC.

Definición de las posibles alternativas

Según el cuadro A del Anexo II, las alternativas para reducir la emisión de GEI en el marco de un proyecto MDL son las siguientes:

- Implementación de un sistema de captura y utilización o quemado de metano.
- Reemplazo de las lagunas anaeróbicas por un sistema aeróbico.
- Introducción de una primera etapa de tratamiento anaeróbica con recuperación de metano.
- Co-compostaje con residuos sólidos urbanos.
- Introducción de un sistema de separación de sólidos volátiles.

En el marco de este caso de aplicación, se evalúan las dos primeras alternativas por ser las más adecuadas a los sistemas de tratamiento de aguas residuales.

La introducción de una primera etapa de tratamiento anaeróbico con recuperación de metano (típicamente un reactor cerrado) es más utilizada en casos de efluente industrial y donde el tratamiento anterior consista 100% en lagunas anaeróbicas. La alternativa de co-compostaje con residuos sólidos para este nivel de caudal requeriría de un proyecto paralelo de compostaje de residuos sólidos de gran envergadura, el cual habría que evaluar en conjunto con el presente proyecto para lograr una estimación adecuada de su viabilidad. La introducción de un sistema de separación de sólidos volátiles es más común en sistemas de tratamiento de residuos animales.

Cálculo de reducción de emisiones

La planta recibe 24.000 m³/día (8.760.000 m³/año) de aguas residuales (200 litros/habitante/día) con una DQO de 500 mg/l (0,0005 t/m³). Sesenta por ciento (60%) de la DQO es degradada en las lagunas anaeróbicas; otro porcentaje se degrada en las lagunas aeróbicas y el resto se descarga a un cuerpo de agua. La profundidad de las lagunas es de 3 metros.

Alternativa 1 – Introducción de un sistema de captura y utilización de metano

El primer paso consiste en calcular las emisiones de GEI en el **escenario de base**, según la ecuación presentada en el cuadro A (Anexo II):

$$\mathbf{BE = Q \times COD_d \times MCF \times B_o \times GWP_{CH_4} \times UF}$$

donde,

BE: emisiones de línea de base (tCO₂e/año)

Q: caudal de entrada a la planta de tratamiento: 8.760.000 m³/año

COD_d: DQO degradada por el sistema (t/m³): 0,0005 x 0,6 = 0,0003

MCF: factor de corrección de metano (según cuadro B del Anexo II): 0,8

B_o: capacidad máxima de producción de metano (kgCH₄/kgDQO): 0,21

GWP_{CH₄}: potencial de calentamiento global del metano (kgCO₂e/kgCH₄): 21

UF: factor de corrección por incertidumbre: 0,94

Por lo tanto, las emisiones de la línea de base son:

$$BE = 8.760.000 \times 0,0003 \times 0,8 \times 0,21 \times 21 \times 0,94$$

$$\mathbf{BE = 8.715 \text{ tCO}_2\text{e/año}}$$

A continuación se estiman las emisiones de GEI que generará el **proyecto**.

El proyecto consiste en la instalación de una membrana de HDPE (polietileno de alta densidad) y un sistema de captación que extrae el biogás atrapado en la membrana y lo conduce, en parte, a un motor de combustión para generar energía eléctrica y otra fracción a una caldera donde se generará calor para calefaccionar las lagunas. Se asume que el sistema

de captación presenta una pérdida de 20% del total del biogás generado, debido a ineficiencias comunes en la operación de este tipo de sistemas.

Debido al sistema de calefacción de las lagunas y a que luego de ser cerradas con membranas éstas serán 100% anaeróbicas, para el proyecto se estima una eficiencia en la degradación de la materia orgánica de 75% (mayor a la del escenario de base).

En el escenario de base se consumen 50 MWh/año (electricidad de red) y se estima que las instalaciones del proyecto requerirán de 300 MWh/año adicionales. La energía generada por el proyecto a partir del biogás será suficiente para cubrir ambos consumos; el excedente se exportará a la red eléctrica nacional.

La cantidad de metano generado por el proyecto se define según la siguiente ecuación:

$$GM = Q \times COD_d \times B_o \times (1 - L) / DM$$

donde, DM: densidad del metano.

$$= 8.760.000 \times 0,000375 \times 0,21 \times 0,8 / 0,00067$$

$$= 823.701 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{año}$$

Asumiendo una eficiencia de 2,5 kWh/m³CH₄, se podrían generar:

$$= 823.701 \times 2,5 = 2.059 \text{ MWh/año}$$

Las emisiones del proyecto serán entonces:

$$PE_1 = Q \times COD_d \times B_o \times GWP_{CH_4} \times L - EG \times EF$$

donde,

PE₁: emisiones del proyecto –alternativa 1 (tCO₂e/año)

Q: caudal de entrada a la planta de tratamiento: 8.760.000 m³/año

CODd: DQO degradada por el sistema (t/m³): 0,0005 x 0,75 = 0,000375

B_o: capacidad máxima de producción de metano (kgCH₄/kgDQO): 0,21

GWP_{CH₄}: potencial de calentamiento global del metano (kgCO₂e/kgCH₄): 21

L: fracción del biogás generado que se pierde en el sistema de captura, ruteo y utilización o quemado: 0,2

EG: cantidad de energía generada excedente (= generación – consumo del proyecto) que desplace el uso de combustibles fósiles o electricidad (en este caso, MWh/año): 2.059 - 300 = 1.759

EF: factor de emisión de la red eléctrica (tCO₂e/MWh): 0,45

Por lo tanto, las emisiones del proyecto son:

$$PE_1 = 8.760.000 \times 0,000375 \times 0,21 \times 21 \times 0,2 - 1.759 \times 0,45$$

$$PE_1 = 2.105 \text{ tCO}_2\text{e/año}$$

Por último, se calcula la **reducción de emisiones** (ER) como la diferencia entre las emisiones de base y las del proyecto:

$$ER_1 = BE - PE_1$$

donde,

ER₁: reducción de emisiones de alternativa 1 (tCO₂e/año)

$$ER_1 = 8.715 - 2.105$$

$$ER_1 = 6.610 \text{ tCO}_2\text{e/año}$$

Alternativa 2 – Reemplazo por un sistema aeróbico

Las emisiones del escenario de base son las mismas que las calculadas para la alternativa 1 (8.715 tCO₂e/año).

A continuación se calculan las emisiones que generará esta alternativa de proyecto:

En este caso, las emisiones del proyecto se deben a:

- Zonas anaeróbicas dentro del futuro reactor aeróbico.
- Energía consumida por el sistema de aireación.
- Tratamiento anaeróbico de los lodos generados: Un sistema aeróbico genera una cantidad de lodos considerablemente mayor que uno anaeróbico. Este componente debe ser considerado únicamente en el caso de que el lodo adicional generado sea tratado de forma anaeróbica o dispuesto en un relleno sanitario (en ambos casos sin recuperación de metano).

El nuevo tratamiento aeróbico consistirá en un sistema de lodos activados, con aireación por difusores sumergidos de poro fino. Se asume que el nuevo sistema tendrá una eficiencia de 90%. Los lodos purgados serán digeridos de forma anaeróbica, con sistema de recuperación y quemado de metano.

$$PE_2 = Q \times COD_d \times MCF \times B_0 \times GWP_{CH_4} + EC \times EF$$

donde,

PE_2 : emisiones del proyecto –alternativa2 (tCO₂e/año)

Q: caudal de entrada a la planta de tratamiento: 8.760.000 m³/año

COD_d: DQO degradada por el sistema (t/m³): 0,0005 x 0,9 = 0,00045

MCF: factor de corrección de metano (según cuadro B del Anexo II, valor más alto para un sistema aeróbico correctamente operado): 0,1

B₀: capacidad máxima de producción de metano (kgCH₄/kgDQO): 0,21

GWP_{CH₄}: potencial de calentamiento global del metano (kgCO₂e/kgCH₄): 21

EC: energía consumida por el proyecto (MWh/año): para un sistema de lodos activados se asume un consumo de 32 KWh/(hab x año) = 3.840 MWh/año

EF: factor de emisión de la red eléctrica (tCO₂e/año): 0,45

Por lo tanto, las emisiones del proyecto son:

$$PE_2 = 8.760.000 \times 0,00045 \times 0,1 \times 0,21 \times 21 + 3.840 \times 0,45$$

$$PE_2 = 3.466 \text{ tCO}_2\text{e/año}$$

Por último, se calcula la **reducción de emisiones** como la diferencia entre las emisiones de base y las del proyecto:

$$ER_2 = BE - PE_2$$

donde,

ER₂: reducción de emisiones de alternativa 2 (tCO₂e/año)

$$ER_2 = 8.715 - 3.466$$

$$ER_2 = 5.249 \text{ tCO}_2\text{e/año}$$

Se observa que la reducción de emisiones es levemente mayor para la alternativa 1 (6.610 tCO₂e/año vs. 5.249 tCO₂e/año).

Para estos cálculos se asumieron valores (como la pérdida de 20% del metano generado en la alternativa 1) que podrían variar según las características de cada proyecto, y se realizaron cálculos con ecuaciones simplificadas. Para realizar una estimación más acertada de la reducción de emisiones que podría lograr cada alternativa deben utilizarse las Metodologías Aprobadas aplicables a cada caso.

Cálculo de costos y beneficios asociados

A continuación se realiza una estimación aproximada de los costos involucrados en cada alternativa para un periodo de acreditación de 10 años, según las siguientes consideraciones:

- Los costos de evaluación y diseño del proyecto y de transacción se asumieron iguales para ambas alternativas.
- Se consideran dos precios de venta de los CER expedidos: 10 USD/tCO₂e y 20 USD/tCO₂e.
- Los CER se venden en el momento de su emisión, una vez por año.
- Para el cálculo del valor actual neto (VAN) se utilizó una tasa de descuento de 10%.
- Con el objetivo de mostrar la sensibilidad ante la variación del precio de la energía eléctrica, se evalúan dos escenarios para cada alternativa: uno donde la energía eléctrica tiene un costo de 0,05 USD/KWh y otro donde el costo es de 0,10 USD/KWh.
- El costo de la energía no se incluye en los costos de operación sino en “beneficios por ahorro de energía”. En la alternativa 1 se ahorran 50 MWh/año y se exportan a la red otros 1.759 MWh/año, en la alternativa 2 se consumen 3.840 MWh/año adicionales.

El siguiente cuadro presenta los costos de cada etapa y componente del proyecto para cada alternativa, incluyendo dos escenarios de precios para la energía eléctrica:

Cuadro 6.1

COSTOS y BENEFICIOS en USD	Alternativa 1				Alternativa 2			
	0,05 USD/KWh		0,10 USD/KWh		0,05 USD/KWh		0,10 USD/KWh	
	10 USD/ tCO ₂ e	20 USD/ tCO ₂ e	10 USD/ tCO ₂ e	20 USD/ tCO ₂ e	10 USD/ tCO ₂ e	20 USD/ tCO ₂ e	10 USD/ tCO ₂ e	20 USD/tCO ₂ e
Costos de evaluación y diseño del proyecto	- 5.000	- 5.000	- 5.000	- 5.000	- 5.000	- 5.000	- 5.000	- 5.000
Costos de transacción	- 30.000	- 30.000	- 30.000	- 30.000	- 30.000	- 30.000	- 30.000	- 30.000
Costos de inversión inicial	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 1.000.000	- 6.000.000	- 6.000.000	- 6.000.000	- 6.000.000
Costos de operación y mantenimiento (VAN)	- 614.000	- 614.000	- 614.000	- 614.000	- 3.687.000	- 3.687.000	- 3.687.000	- 3.687.000
Beneficios por la venta de CER (VAN)	406.000	812.000	406.000	812.000	323.000	646.000	323.000	646.000
Beneficios o costos por ahorro/ exportación/ consumo de energía (VAN)	556.000	556.000	1.112.000	1.112.000	- 1.180.000	- 1.180.000	- 2.360.000	- 2.360.000
VAN TOTAL	- 687.000	- 281.000	- 132.000	274.000	- 10.582.000	- 10.259.000	- 11.762.000	- 11.439.000

Claramente, la alternativa 1 presenta mayor viabilidad económica; aunque, como se puede observar, se justificaría la ejecución del proyecto sólo con un valor de CER de 20 USD/ tCO₂e. Los costos y beneficios se presentan a modo ilustrativo y algunos de ellos (por ej., costo de inversión inicial y operación) pueden tener una gran variabilidad.

Los factores más importantes en el momento de evaluar alternativas de estas características son el precio de la energía eléctrica, el factor de emisión de la red eléctrica que se prevé utilizar y la inversión inicial requerida. La sensibilidad a los costos de energía eléctrica y al valor de venta de los CER debería evaluarse en mayor profundidad. Un aumento del valor de los CER que los llevara a valores iguales o superiores a los observados en septiembre-octubre de 2008, o un aumento del costo de energía eléctrica (sobre 10 centavos de USD/kWh), justificaría la implementación de la alternativa 1.

6.4.2 Caso 2

Una planta de tratamiento aeróbica que consiste en un sistema de lodos activados recibe las aguas residuales de una ciudad de 120.000 habitantes. Los lodos generados por la planta son tratados de forma anaeróbica, sin recuperación de metano.

Análisis de la línea de base

Dado que este tipo de tratamiento cumple con las leyes del país donde se encuentra esta planta, y el sistema de lodos activados es una práctica común, éste puede considerarse como el escenario de base. Este escenario está contemplado dentro de las Metodologías Aprobadas de la UNFCCC.

Definición de las posibles alternativas

De acuerdo con el cuadro A del Anexo II, la única alternativa posible para reducir la emisión de GEI en el marco de un proyecto MDL consiste en reemplazar el sistema de lodos activados por uno anaeróbico con sistema de recuperación de metano.

Cálculo de reducción de emisiones

La planta recibe 24.000 m³/día (8.760.000 m³/año) de aguas residuales (200 litros/habitante/día) con una DQO de 500 mg/l (0,0005 t/m³). Noventa por ciento (90%) de la DQO es degradada por el sistema de lodos activados y el resto se descarga a un cuerpo de agua.

El primer paso consiste en calcular las emisiones de GEI en el **escenario de base**, según la ecuación presentada en el cuadro A del Anexo II:

$$BE = (Q \times COD_d \times MCF \times B_o + S \times DOC \times MCF_S \times DOC_F \times F \times 16/12) \times GWP_{CH_4} \times UF + EC \times EF$$

donde,

BE: emisiones de línea de base (tCO₂e/año)

Q: caudal de entrada a la planta de tratamiento (m³/año): 8.760.000

COD_d: DQO degradada por el sistema (t/m³): 0,0005 x 0,9 = 0,00045

MCF: factor de corrección de metano (según cuadro B del Anexo II, valor más bajo): 0

B_o: capacidad máxima de producción de metano (kgCH₄/kgDQO): 0,21

S: cantidad de lodo generado en peso seco (t/año): 1.100 (se asumió una producción de lodos de 0,25 kg TSS/kg COD que entra al tratamiento biológico)

DOC: contenido de materia orgánica en el lodo generado (en peso seco): 0,5

MCF_S: factor de corrección de metano para el sistema de tratamiento del lodo (según cuadro B, valor más bajo): 0,8

DOC_F: fracción del DOC que se transforma en biogás: 0,5

F: fracción de metano en el biogás: 0,5

GWP_{CH₄}: potencial de calentamiento global del metano (kgCO₂e/kgCH₄): 21

UF: factor de corrección por incertidumbre: 0,94

EC: energía consumida: 3.840 MWh/año

EF: factor de emisión de la red eléctrica (tCO₂e/MWh): 0,45

Por lo tanto, las emisiones de la línea de base son:

$$BE = (8.760.000 \times 0,00045 \times 0 \times 0,21 + 1.100 \times 0,5 \times 0,8 \times 0,5 \times 0,5 \times 16/12) \times 21 \times 0,94 + 3.840 \times 0,45$$

$$BE = 4.623 \text{ tCO}_2\text{e/año}$$

Cabe señalar que las emisiones debidas al tratamiento anaeróbico de los lodos generados representan más de 60% del total de las emisiones de la línea de base.

A continuación se estiman las emisiones de GEI que generará el **proyecto**.

El proyecto consiste en reemplazar el sistema actual de lodos activados por un tratamiento basado en un reactor anaeróbico, con un sistema de captación que extrae el biogás y una parte la conduce a un motor de combustión para generar energía eléctrica y otra fracción a una caldera donde se generará calor para calefaccionar el reactor. Se asume que el sistema de captación presenta una pérdida de 10% del total del gas generado debido a ineficiencias comunes en la operación de este tipo de sistemas.

Para el proyecto se estima una eficiencia en la degradación de la materia orgánica de 75%.

Las instalaciones del proyecto requerirán de 700 MWh/año, los cuales serán proporcionados por la generación de energía eléctrica y calórica a partir del biogás captado; el excedente será exportado a la red nacional. En total, el proyecto generará 2.059 MWh/año.

$$PE = Q \times COD_d \times B_o \times GWP_{CH_4} \times L - EG \times EF$$

donde,

PE: emisiones del proyecto (tCO₂e/año)

Q: caudal de entrada a la planta de tratamiento (m³/año): 8.760.000

COD_d: DQO degradada por el sistema (t/m³): 0,0005 x 0,75 = 0,000375

B_o: capacidad máxima de producción de metano (kgCH₄/kgDQO): 0,21

GWP_{CH₄}: potencial de calentamiento global del metano (kgCO₂e/kgCH₄): 21

L: fracción del biogás generado que se pierde en el sistema de captura, ruteo y utilización o quemado: 0,1

EG: cantidad de energía generada excedente (= generación – consumo del proyecto) que desplace el uso de combustibles fósiles o electricidad (en este caso MWh/año):
 $2.059 - 700 = 1.359$

EF: factor de emisión de la red eléctrica (tCO₂e/MWh): 0,45

Por lo tanto, las emisiones del proyecto son:

$$PE = 8.760.000 \times 0,000375 \times 0,21 \times 21 \times 0,1 - 1.359 \times 0,45$$

$$PE = 838 \text{ tCO}_2\text{e/año}$$

Por último, se calcula la **reducción de emisiones** (ER) como la diferencia entre las emisiones de base y las del proyecto:

$$ER = BE - PE$$

donde,

ER: reducción de emisiones (tCO₂e/año)

$$ER = 4.623 - 838$$

$$ER = 3.785 \text{ tCO}_2\text{e/año}$$

Cálculo de costos y beneficios asociados

A continuación se realiza una estimación aproximada de los costos involucrados en el proyecto MDL, para un periodo de acreditación de 10 años, según las siguientes consideraciones:

- Se consideran dos precios de venta de los CER expedidos: 10 USD/tCO₂e y 20 USD/tCO₂e.
- Los CER se venden al momento de su emisión, una vez por año.
- Para el cálculo del valor actual neto (VAN) se utilizó una tasa de descuento de 10%.
- Con el objetivo de mostrar la sensibilidad ante la variación del precio de la energía eléctrica, se evalúan dos escenarios: uno donde la energía eléctrica tiene un costo de 0,05 USD/KWh y otro donde el costo es de 0,10 USD/KWh.

- El costo de la energía no se incluye en los costos de operación sino en “beneficios por ahorro de energía”. Debido a las actividades del proyecto, se ahorran 3.840 MWh/año y se exportan a la red local otros 1.359 MWh/año.

El cuadro siguiente presenta los costos de cada etapa y componente del proyecto:

Cuadro 6.2

Costos y beneficios en USD	0,05 USD/KWh		0,10 USD/KWh	
	10 USD/tCO ₂ e	20 USD/tCO ₂ e	10 USD/tCO ₂ e	20 USD/tCO ₂ e
Costos de evaluación y diseño del proyecto	- 5.000	- 5.000	- 5.000	- 5.000
Costos de transacción	- 30.000	- 30.000	- 30.000	- 30.000
Costos de inversión inicial	- 3.500.000	- 3.500.000	- 3.500.000	- 3.500.000
Costos de operación y mantenimiento (VAN)	- 1.450.000	- 1.450.000	- 1.450.000	- 1.450.000
Beneficios por la venta de CER (VAN)	233.000	466.000	233.000	466.000
Beneficios o costos por ahorro/exportación/consumo de energía (VAN)	1.600.000	1.600.000	3.200.000	3.200.000
VAN TOTAL	- 3.180.000	- 2.947.000	- 1.580.000	- 1.347.000

Los costos y beneficios se presentan a modo ilustrativo y algunos de ellos (por ej., costo de inversión inicial) pueden tener una gran variabilidad. Para el presente caso, ninguno de los dos proyectos sería financieramente viable. Obviamente, resta evaluar beneficios ambientales, sociales y sanitarios relacionados con el proyecto.

6.4.3 Caso 3

Por último, se presenta un caso en que las aguas residuales de otra ciudad de 120.000 habitantes son descargadas sin tratar a un cuerpo de agua receptor en la cercanía de la ciudad. El cuerpo receptor se encuentra en condiciones anaeróbicas debido a la alta carga orgánica que recibe. De esta forma, la materia orgánica se descompone en el cuerpo receptor generando metano que pasa a la atmosfera.

Análisis de la línea de base

Las leyes del país donde se pretende implementar el proyecto MDL no contemplan la descarga de aguas residuales; por lo tanto, es práctica común descargar las aguas residuales a los cursos de agua naturales. Dicho escenario se encuentra incluido en las Metodologías Aprobadas de la UNFCCC.

Definición de las posibles alternativas

Según el cuadro A del Anexo II, la única alternativa posible para reducir la emisión de GEI en el marco de un proyecto MDL consiste en instalar un sistema de tratamiento anaeróbico con recuperación de metano.

Cálculo de reducción de emisiones

El arroyo recibe 24.000 m³/día (8.760.000 m³/año) de aguas residuales (200 litros/habitante/día) con una DQO de 500 mg/l (0,0005 t/m³).

El primer paso consiste en calcular las emisiones de GEI en el **escenario de base**, según la ecuación presentada en el cuadro A del Anexo II:

$$BE = Q \times COD \times MCF \times B_0 \times GWP_{CH_4} \times UF$$

donde,

BE: emisiones de línea de base (tCO₂e/año)

Q: caudal de entrada a la planta de tratamiento (m³/año): 8.760.000

COD: DQO del agua servida descargada al arroyo (t/m³): 0,0005

MCF: factor de corrección de metano (según cuadro B del Anexo II): 0,1

B₀: capacidad máxima de producción de metano (kgCH₄/kgDQO): 0,21

GWP_{CH_4} : potencial de calentamiento global del metano ($kgCO_2e/kgCH_4$): 21

UF: factor de corrección por incertidumbre: 0,94

Por lo tanto, las emisiones de la línea de base son:

$$BE = 8.760.000 \times 0,0005 \times 0,1 \times 0,21 \times 21 \times 0,94$$

$$BE = 1.816 \text{ tCO}_2\text{e/año}$$

A continuación se estiman las emisiones de GEI que generará el **proyecto**.

El proyecto consiste en instalar un sistema de tratamiento basado en un reactor anaeróbico con sistema de recuperación de metano y generación de energía. La energía generada será utilizada para abastecer los requerimientos de la planta (bombeo, calefacción del reactor) y el excedente se exportará a la red. Se asume que el sistema de captación presenta una pérdida de 10% del total del gas generado debido a ineficiencias comunes en la operación de este tipo de sistemas.

Para el proyecto se estima una eficiencia en la degradación de la materia orgánica de 75%.

Las instalaciones del proyecto requerirán de 700 MWh/año, los cuales serán proporcionados por la generación de energía eléctrica y calórica a partir del biogás captado. En total, el proyecto generará 2.059 MWh/año.

$$PE = Q \times COD_d \times B_o \times GWP_{CH_4} \times L - EG \times EF$$

donde,

PE: emisiones del proyecto ($tCO_2e/año$)

Q: caudal de entrada a la planta de tratamiento ($m^3/año$): 8.760.000

CODd: DQO degradada por el sistema (t/m^3): $0,0005 \times 0,75 = 0,000375$

B_o : capacidad máxima de producción de metano ($kgCH_4/kgDQO$): 0,21

GWP_{CH_4} : potencial de calentamiento global del metano ($kgCO_2e/kgCH_4$): 21

L: fracción del biogás generado que se pierde en el sistema de captura, ruteo y utilización o quemado: 0,1

EG: cantidad de energía generada excedente (= generación – consumo del proyecto) que desplace el uso de combustibles fósiles o electricidad (en este caso MWh/año):

$$2.059 - 700 = 1.359$$

EF: factor de emisión de la red eléctrica (tCO₂e/MWh): 0,45

Por lo tanto, las emisiones del proyecto son:

$$PE = 8.760.000 \times 0,000375 \times 0,21 \times 21 \times 0,1 - 1.359 \times 0,45$$

$$PE = 838 \text{ tCO}_2\text{e/año}$$

Por último, se calcula la **reducción de emisiones** (ER) como la diferencia entre las emisiones de base y las del proyecto:

$$ER = BE - PE$$

donde,

ER: reducción de emisiones (tCO₂e/año)

$$ER = 1.816 - 838$$

$$ER = 978 \text{ tCO}_2\text{e/año}$$

Cálculo de costos y beneficios asociados

A continuación se realiza una estimación aproximada de los costos involucrados en el proyecto MDL, para un periodo de acreditación de 10 años, según las siguientes consideraciones:

- Se consideran dos precios de venta de los CER expedidos: 10 USD/tCO₂e y 20 USD/tCO₂e.
- Los CER se venden al momento de su emisión, una vez por año.
- Para el cálculo del valor actual neto (VAN) se utilizó una tasa de descuento de 10%.
- Con el objetivo de mostrar la sensibilidad ante la variación del precio de la energía eléctrica, se evalúan dos escenarios: uno donde la energía eléctrica tiene un costo de 0,05 USD/KWh y otro donde el costo es de 0,10 USD/KWh.
- El costo de la energía no se incluye en los costos de operación sino en “beneficios por ahorro de energía”. El proyecto genera un excedente de 1.359 MWh/año.

En el siguiente cuadro se presentan los costos de cada etapa y componente del proyecto:

Cuadro 6.3

Costos y beneficios en USD	0,05 USD/KWh		0,10 USD/KWh	
	10 USD/tCO ₂ e	20 USD/tCO ₂ e	10 USD/tCO ₂ e	20 USD/tCO ₂ e
Costos de evaluación y diseño del proyecto	- 5.000	- 5.000	- 5.000	- 5.000
Costos de transacción	- 30.000	- 30.000	- 30.000	- 30.000
Costos de inversión inicial	- 3.500.000	- 3.500.000	- 3.500.000	- 3.500.000
Costos de operación y mantenimiento (VAN)	- 1.450.000	- 1.450.000	- 1.450.000	- 1.450.000
Beneficios por la venta de CER (VAN)	60.000	120.000	60.000	120.000
Beneficios o costos por ahorro/exportación/consumo de energía (VAN)	418.000	418.000	835.000	835.000
VAN TOTAL	- 4.530.000	- 4.470.000	- 4.110.000	- 4.050.000

Los costos y beneficios se presentan a modo ilustrativo y algunos de ellos (por ej., costo de inversión inicial) pueden tener una gran variabilidad. Para el presente caso, resulta obvio que ninguno de los dos proyectos serían viables financieramente si se evaluaran solamente desde el punto de vista de los bonos de carbono. Obviamente, resta evaluar beneficios ambientales, sociales y sanitarios relacionados con el proyecto.

6.4.4 Cuadro comparativo

Para los tres casos se consideró como entorno una ciudad de 120.000 habitantes, la cual aporta un caudal de 24.000 m³/día (8.760.000 m³/año) con una DQO de 500 mg/l.

En el cuadro 6.4 se presentan las características más importantes de cada caso de aplicación:

Cuadro 6.4

Caso	Escenario de base	Escenario de proyecto	Reducción de emisiones (tCO ₂ e/año)	Energía generada por el proyecto (MWh/año)	Balance de costos (USD/10 años)				
					0,05 USD/ KWh		0,10 USD/ KWh		
					10 USD/ tCO ₂ e	20 USD/ tCO ₂ e	10 USD/ tCO ₂ e	20 USD/ tCO ₂ e	
1	Alternativa 1	Lagunas anaeróbicas	Instalación de sistema de recuperación de CH ₄	6.610	2.059	- 687.000	- 281.000	- 132.000	274.000
	Alternativa 2	Lagunas anaeróbicas	Reemplazo por un sist. aeróbico	5.249	-	- 10.582.000	- 10.259.000	- 11.762.000	- 11.439.000
2	Lodos activados (aeróbico)	Reemplazo por sistema anaeróbico con recuperación de CH ₄	3.785	2.059	- 3.180.000	- 2.947.000	- 1.580.000	- 1.347.000	
3	Descarga directa a curso de agua natural	Instalación de sistema de tratamiento anaeróbico con recuperación de CH ₄	978	2.059	- 4.530.000	- 4.470.000	- 4.110.000	- 4.050.000	

6.5 Comentario

Nótese que, en general, los beneficios financieros resultantes de la venta de bonos de carbono y ahorros en energía eléctrica no justifican por sí solos la implementación de proyectos MDL en sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales.

Por este motivo, existen a la fecha de preparación de esta Nota Técnica sólo dos proyectos MDL registrados en la UNFCCC (ver Capítulo 7), ninguno de los cuales ha certificado reducciones de emisiones (es decir, no ha emitido CER).

Al momento, la mayoría de los proyectos MDL registrados para sistemas de tratamiento de aguas residuales se encuentra en sistemas industriales con altas cargas orgánicas para tratar (por ejemplo, granjas de cerdos).

Esta situación puede cambiar en el corto y mediano plazo si los precios de los CER se incrementan, situación que es de esperar en proyectos MDL post-Kioto. Nótese que si el precio del CER regresara a los 20 USD/ton CO₂e (valor observado en septiembre-octubre de 2008, ver gráfico 5.2), o superara esa barrera, uno de los casos presentados en esta sección se justificaría financieramente.

Como se puede observar en los casos de esta sección, existen numerosos factores que inciden en los costos de implementación y en los beneficios derivados de proyectos MDL, por lo que no es posible identificar un tamaño de planta o condiciones particulares a partir de las cuales estos proyectos se vuelven viables. Sin embargo, más allá de las condiciones de línea de base ya explicadas, resulta obvio que a mayor carga orgánica (es decir, mayor población), mayor precio de CER, mayor costo de energía eléctrica (en aquellos proyectos donde se genera energía eléctrica) y menor necesidad de inversión, mejores son las posibilidades de justificación para un proyecto MDL.

Es importante indicar que existen beneficios intangibles que pueden impulsar la ejecución de proyectos que no se justifican desde un punto de análisis estrictamente de costo-beneficio. El tema de imagen pública y percepción del usuario es uno de ellos.

7 Experiencias en proyectos MDL en plantas de tratamiento

Por último, a modo de ejemplo, en el siguiente cuadro se citan dos casos de aplicación de proyectos MDL en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. (Nótese que existe un número mayor de proyectos en plantas de tratamiento de aguas residuales de tipo industrial, que en muchos casos, debido a sus altas cargas orgánicas, favorece este tipo de proyectos).

Cuadro 7.1

Nombre y país del proyecto	Descripción del proyecto	Metodologías aplicadas	Cantidad de lodo a tratar (t/año)	Energía generada (MWh/año)	Inversión en construcción y operación	CER (tCO ₂ e/año)	Periodo de acreditación (años)
Proyecto de actualización de la planta de tratamiento cloacal de Makati con generación de energía. Filipinas. <i>(Makati south sewage treatment plant upgrade with on-site power)</i>	Instalación de un sistema de captación de biogás y generación de energía al actual sistema de tratamiento anaeróbico de los lodos generados por un tratamiento aeróbico de aguas residuales.	AMS III.H	110.000	2.400	N/A	28.000 (estimados en el PDD)	7
Introducción de recuperación y quemado de metano en un sistema de tratamiento de lodo existente en la planta de tratamiento de aguas residuales de Cañaveralejo. Colombia. <i>(Introduction of the recovery and combustion of methane in the existing sludge treatment system of the Cañaveralejo wastewater treatment plant of EMCALI in Cali)</i>	Instalación de un sistema de captación y quemado de biogás al actual sistema de tratamiento anaeróbico de los lodos generados por un tratamiento aeróbico de aguas residuales.	AMS III.H	1.900.000	-	N/A	56.000 (estimados en el PDD)	10

8 Bibliografía

- “2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories”. IGES, 2006.
- Baumert, Kevin, Timothy, Herzog & Jonathan Pershing, 2000. “Navigating Numbers - GHG Data and International Climate Policy”. World Resources Institute.
- Belza, Juan Carlos y Vicente Gil. “Costos de Transacción, Mecanismo flexible del Protocolo de Kioto”. Presentación PowerPoint.
- Botero, Raúl y Thomas Preston, 1987. “Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas”.
- “Biogas Technology. Chapter 1: Overview of Biogas technology”. AgStar Handbook, segunda edición. US-EPA y ICF Inc.
- Clavin, M.F. and Nolasco, D.A., 2008. “Wastewater Treatment in Swine Farms to Mitigate Climate Change Effects by Implementing Clean Development Mechanism Projects”. Proceedings of WEFTEC 2008, Water Environment Federation 81st Annual Technical Conference and Exhibition, Chicago, IL, USA.
- “Digester Biogas Systems”. Nebraska Public Power District, 2006.
- Goodrich, Philip R, 2005. “Agstar Found for Rural America, the Minnesota Project”.
- Herrero, J. Marti, 2007. “Experiencia de transferencia tecnológica de biodigestores familiares en Bolivia”. GTZ-PROAGRO.
- IGES CDM Project Database: <http://www.iges.or.jp/en/cdm/report.html>
- “Lagoon Systems in Maine”: <http://www.lagoononline.com>
- LSI Group: <http://www.lsigroup.org>
- Metcalf & Eddy, 2002. “Wastewater Engineering”, 4a. edición. EUA: McGraw-Hill.
- Nolasco, D. and Migone, B., 2007. “Factors influencing sustainability of rural water supply and sanitation services in Latin America”. Proceedings of the Water Environment Federation 80th Annual Technical Conference and Exhibition, San Diego, CA., USA.
- Nolasco, D. y van den Broeck, J., 2009. Capítulo: “Climate Change Mitigation Strategies in the Water Sector in Developing Countries”. En: *Climate Change and Water International Perspectives on Mitigation and Adaptation*. International Water Association (IWA) Publishing.

- Nolasco, D., 2008. "Mitigation strategies for water utilities". En: Proceedings of IWA Conference "Water and climate", Amsterdam, The Netherlands.
- Nolasco, D., 2003. "Climate change: A primer on Kyoto Protocol and Green House Gas Emission Reductions in the Water Environment Arena". Proceedings of WEFTEC 2003, 76th Annual Technical Conference and Exhibition, Los Angeles, California, USA.
- Rosso, Diego & Michael K. Stenstrom, 2007. "The Carbon-sequestration Potential of Municipal Wastewater Treatment". Proceedings of the Water Environment Federation 80th Annual Technical Conference and Exhibition, San Diego, CA., USA.
- Shiskowski, D. M., 2007. "Nitrous Oxide - A Powerful Greenhouse Gas with a Wastewater treatment Connection". Proceedings of the Water Environment Federation 80th Annual Technical Conference and Exhibition, San Diego, CA., USA.
- von Sperling, Marcos, 2007. "Basic Principles of Biological Wastewater Treatment". IWA Publishing.

UNFCCC:

<http://cdm.unfccc.int/Statistics/Registration/RegisteredProjByScopePieChart.html>

- Williams, Douglas W., 2005. "BioCycle 5th Annual Conference on Renewable Energy from Organics Recycling".
- World Water Council, Cooperative Program on Water and Climate and International Water Association, 2008. "Perspectives on Water and Climate Change Adaptation". Presentado en el 5^{to} Foro Mundial del Agua, Estambul.
- Kolisch, G., Osthoff, T., Hobus, I., *et al.*, 2009 "Increasing the Energy Efficiency of Sewage Plants - Experiences of Energy Analyses carried out in Germany". Proceedings of the International Water Association – Water and Energy Conference, Copenhaguen.
- Mauer, C., Husmann, M., Sahlstedt, K., *et al.* 2009. "Improved Energy Savings and Recovery on WWTP by use of standardized Optimization Procedures or Simulation Studies". Proceedings of the International Water Association – Water and Energy Conference, Copenhaguen.

ANEXO I

Cuadro 1

Países que firmaron el tratado de Kioto

País	Compromiso cuantificado de limitación o reducción de las emisiones (% del nivel del año o periodo de base)
Alemania	92
Australia	108
Austria	92
Bélgica	92
Bulgaria*	92
Canadá	94
Comunidad Europea	92
Croacia*	95
Dinamarca	92
Eslovaquia*	92
Eslovenia*	92
España	92
Estados Unidos de América	93
Estonia*	92
Federación de Rusia*	100
Finlandia	92
Francia	92
Grecia	92
Hungría*	94
Irlanda	92
Islandia	110
Italia	92
Japón	94
Letonia*	92
Liechtenstein	92
Lituania*	92
Luxemburgo	92
Mónaco	92
Noruega	101
Nueva Zelanda	100
Países Bajos	92
Polonia*	94
Portugal	92
Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte	92
República Checa*	92
Rumania*	92
Suecia	92
Suiza	92
Ucrania*	100

*Países que están en proceso de transición a una economía de mercado.

Fuente: <<http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>>.

Cuadro 2

Nombre	Línea (s) de base	Proyecto (s) potencial (es)
AMS III.E - Abatimiento de la producción de metano por degradación de biomasa por medio de combustión controlada, gasificación o tratamiento mecánico/térmico	Residuos orgánicos (p. ej. lodos biológicos ²⁹) son dispuestos en rellenos sanitarios sin sistema de captura de metano	<ul style="list-style-type: none"> • Combustión controlada • Gasificación • Tratamiento mecánico/térmico³⁰
AMS III.F - Abatimiento de la emisión de metano mediante el tratamiento biológico controlado de la biomasa	Residuos orgánicos (p. ej. lodos biológicos) son dispuestos en rellenos sanitarios sin sistema de captura de metano	<ul style="list-style-type: none"> • Compostaje aeróbico • Digestión anaeróbica (con sistema de captura de metano)
	Tratamiento anaeróbico de agua residual	<ul style="list-style-type: none"> • Co-compostaje aeróbico de agua residual con residuos sólidos orgánicos
AMS III.H - Recuperación de metano en tratamiento de aguas residuales	Tratamiento aeróbico de agua residual o lodos	<ul style="list-style-type: none"> • Reemplazo por un sistema anaeróbico con captura de metano
	Tratamiento anaeróbico de agua residual o lodos, sin sistema de captura de metano	<ul style="list-style-type: none"> • Adición de una etapa secuencial basada en un reactor anaeróbico con sistema de captura de metano al sistema de lagunas anaeróbicas existente • Instalación de un sistema de captura de metano en el sistema de tratamiento existente
	Agua residual sin tratar es descargada a un curso de agua con bajo contenido de oxígeno disuelto	<ul style="list-style-type: none"> • Instalación de un sistema de tratamiento anaeróbico con sistema de captura de metano
	Lodo no tratado	<ul style="list-style-type: none"> • Instalación de un sistema de tratamiento anaeróbico con sistema de captura de metano
AMS III.I - Abatimiento de la producción de metano en tratamiento de aguas residuales mediante el reemplazo de sistemas de lagunas anaeróbicas por sistemas aeróbicos	Tratamiento en lagunas anaeróbicas	<ul style="list-style-type: none"> • Reemplazo por un sistema aeróbico
ACM0014 - Mitigación de la emisión de GEI en el tratamiento de aguas residuales industriales	Tratamiento de agua residual en lagunas anaeróbicas	<ul style="list-style-type: none"> • Adición de un reactor anaeróbico con sistema de captura de metano (anterior al sistema de lagunas) para el tratamiento de agua residual
	Almacenamiento de lodos en pozos	<ul style="list-style-type: none"> • Adición de un reactor anaeróbico con sistema de captura de metano (anterior al sistema de lagunas) para el tratamiento de lodos • Aplicación al terreno del lodo

²⁹ Lodos generados durante el tratamiento de agua residual (ver sección 2.4).

³⁰ El tratamiento térmico (deshidratación) debe ocurrir bajo condiciones controladas (hasta 300 °C) y debe generar biomasa estabilizada para ser usada como combustible o materia prima en otros procesos industriales. Biomasa estabilizada se define como biomasa adecuadamente tratada para prevenir que siga degradándose (p. ej.: pellets, briquetas).

Cuadro 1 (cont.)

Nombre	Línea (s) de base	Proyecto (s) potencial (es)
AM0039 - Reducción de las emisiones de metano del agua residual o residuos orgánicos mediante co-compostaje	Residuos orgánicos (p. ej. lodos biológicos) son dispuestos en rellenos sanitarios sin sistema de captura de metano	• Co-compostaje aeróbico de agua residual con residuos sólidos orgánicos
	Tratamiento anaeróbico de agua residual	• Co-compostaje aeróbico de agua residual con residuos sólidos orgánicos

ANEXO II

Cómo utilizar la herramienta para determinación del potencial de bonos de carbono

- 1- Debe encontrarse, en la primera columna del cuadro A, una línea de base que coincida con la situación de base de su proyecto potencial.³¹
- 2- Luego, en la segunda columna, según la línea de base elegida, se presentan los proyectos potenciales. Si su proyecto no se encuentra, posiblemente sea el primero de su tipo, por lo que tendrá que desarrollar una metodología nueva, que deberá luego ser aprobada por la Junta Ejecutiva del MDL para poder ser utilizado en su proyecto.³²
- 3- Si su proyecto coincide con una de las opciones propuestas, encontrará en las siguientes celdas de esa misma fila el nombre de la (s) metodología (s) aprobada (s) aplicable (s).
- 4- En la siguiente celda se presentan las ecuaciones para calcular las emisiones de base (BE) y las emisiones de proyecto (EP), con las que se calcula el potencial de reducción de emisiones (ER) de la siguiente forma: $ER = BE - PE$.
- 5- En la última columna (“Comentarios”) encontrará, entre otras cosas, referencias a otros cuadros con valores por defecto para algunos de los parámetros que integran las ecuaciones.
- 6- Al final del cuadro encontrará las definiciones de todos los parámetros que integran las ecuaciones.

³¹ La línea de base no debe consistir necesariamente en la situación actual, sino en la situación más probable al momento de implementar el proyecto.

³² En el siguiente link encontrará información detallada sobre cómo proponer una nueva metodología:
<<http://cdm.unfccc.int/Projects/pac/howto/CDMProjectActivity/NewMethodology/index.html>>.

Cuadro A

Línea de base	Proyectos potenciales	Metodologías aplicables	Cálculo simplificado de emisiones de base y proyecto	Comentarios
Tratamiento anaeróbico sin sistema de recuperación de metano	Implementación de un sistema de captura y utilización o quemado de metano	AMS III.H, ACM0014	$BE = Q \times COD_d \times MCF \times B_o \times GWP_{CH_4} \times UF$ $PE = Q \times COD_d \times B_o \times GWP_{CH_4} \times L - EG \times EF$	Las emisiones del proyecto se deben a fugas e ineficiencias en la captura y quemado del biogás y a las emisiones por consumo de energía (EG x EF).
	Reemplazo por un sistema aeróbico	AMS III.I	$BE = Q \times COD_d \times MCF \times B_o \times GWP_{CH_4} \times UF$ $PE = Q \times COD_d \times MCF \times B_o \times GWP_{CH_4} + EC \times EF + S \times DOC \times MCF_S \times DOC_F \times F \times 16/12 \times GWP_{CH_4}$	Se considera que el lodo generado en el proyecto es tratado anaeróbicamente sin recuperación de metano. De lo contrario, no debe tenerse en cuenta el 3 ^{er} término de PE (S x DOC x MCF _S ...).
	Introducción de una primera etapa de tratamiento anaeróbica con recuperación de metano	AMS III.H, ACM0014	$BE = Q \times COD_d \times MCF \times B_o \times GWP_{CH_4} \times UF$ $PE = (0,14 + 0,25 \times MCF) \times Q \times COD \times B_o \times GWP_{CH_4} - EG \times EF$	P. ej. Introducción de un reactor anaeróbico con recuperación de metano anterior a un sistema existente de lagunas anaeróbicas. Se supone que en el reactor anterior se degrada 70% de la materia orgánica recibida y otro 25% en la laguna existente. El MCF corresponde a la laguna existente (ver cuadro B).
	Co-compostaje con residuos sólidos orgánicos	AMS III.F, AM0039	$BE = Q \times COD_d \times MCF \times B_o \times GWP_{CH_4} \times UF$ $PE = EC \times EF$	El agua residual se utiliza como fuente de humedad y nutrientes en el proceso de compostaje.
Tratamiento aeróbico (con aireación forzada)	Reemplazo por un sistema de tratamiento anaeróbico con recuperación de metano	AMS III.H	$BE = (Q \times COD_d \times MCF \times B_o + S \times DOC \times MCF_S \times DOC_F \times F \times 16/12) \times GWP_{CH_4} \times UF + EC \times EF$ $PE = Q \times COD_d \times B_o \times GWP_{CH_4} \times L - EG \times EF$	A la cantidad de lodo generado en la línea de base (S) debe restársele lo que se estima que generará el proyecto. De esta forma sólo se incluye la generación adicional del sistema aeróbico. Se considera que el lodo generado en el tratamiento aeróbico de base es tratado anaeróbicamente (o dispuesto en un relleno sanitario) sin recuperación de metano; de lo contrario, no debe considerarse el segundo término de la primera parte de la ecuación (S x DOC x ... x 16/12).
Descarga directa a un curso de agua anóxico	Implementación de un sistema de tratamiento anaeróbico con recuperación de metano	AMS III.H	$BE = Q \times COD \times MCF \times B_o \times GWP_{CH_4} \times UF$ $PE = Q \times COD \times B_o \times GWP_{CH_4} \times L - EG \times EF$	El MCF (ver cuadro B) de la línea de base corresponde al sitio de descarga. Para lograrse una reducción de emisiones, el proyecto debe incluir generación de energía para exportar.

Cuadro A (cont.)

Línea de base	Proyectos potenciales	Metodologías aplicables	Cálculo simplificado de emisiones de base y proyecto	Comentarios
Lodo no tratado se dispone en un relleno sanitario	Implementación de un sistema de combustión de lodos	AMS III.D	$BE = S \times DOC \times MCF_S \times DOC_F \times F \times 16/12 \times UF \times GWP_{CH_4}$ $PE = EC \times EF$	<p>El MCF_S de la línea de base corresponde al del relleno sanitario donde se dispone (cuadro E).</p> <p>La energía consumida por el proyecto debe incluir el combustible auxiliar utilizado durante la combustión (además del combustible para otros usos y la electricidad).</p> <p>El proyecto debe contemplar el control de la calidad de los gases emitidos por el sistema de combustión, ya que éstos pueden presentar riesgos ambientales.</p>
	Implementación de un sistema de compostaje	AMS III.F	$BE = S \times DOC \times MCF_S \times DOC_F \times F \times 16/12 \times UF \times GWP_{CH_4}$ $PE = Q \times EC \times EF$	<p>El MCF_S de la línea de base corresponde al del relleno sanitario donde se dispone (cuadro E).</p> <p>La energía consumida por el proyecto corresponde al gasto en transporte y movimiento del lodo.</p>
Digestión aeróbica de los lodos generados	Implementación de un sistema de digestión anaeróbico con recuperación de metano	AMS III.H	$BE = S \times DOC \times MCF_S \times DOC_F \times F \times 16/12 \times UF \times GWP_{CH_4} + EC \times EF$ $PE = S \times DOC \times DOC_F \times F \times 16/12 \times L - EG \times EF$	El MCF_S de la línea de base (cuadro E) corresponde al de una planta de tratamiento aeróbica (bien o mal gestionada o sobrecargada, según sea el caso).
Tratamiento anaeróbico de los lodos generados	Reemplazo por un sistema aeróbico	ACM0014	$BE = Q \times COD_d \times MCF \times B_o \times GWP_{CH_4} \times UF$ $PE = Q \times COD_d \times MCF \times B_o \times GWP_{CH_4} + EC \times EF$	El MCF corresponde al sistema de tratamiento según el cuadro B. Este tipo de proyectos es viable cuando en la matriz energética de la red eléctrica predominan las fuentes que emiten no CO_2 (por ej. hidroeléctrica).
	Introducción de un sistema de recuperación de metano	ACM0014	$BE = Q \times COD_d \times MCF \times B_o \times GWP_{CH_4} \times UF$ $PE = Q \times COD_d \times B_o \times GWP_{CH_4} \times L$	El MCF corresponde al sistema de tratamiento según el cuadro B.
	Aplicación al terreno de los lodos generados	ACM0014	$BE = Q \times COD_d \times MCF_S \times B_o \times GWP_{CH_4} \times UF$ $PE = Q \times COD_d \times MCF_{LA} \times B_o \times GWP_{CH_4} + S \times W_N \times EF_{N_2O} \times GWP_{N_2O}$	MCF_{LA} corresponde al valor asignado para aplicación al terreno (0,05).

Cuadro A (cont.)

<p>B_o: Máxima capacidad de producción de metano del agua residual (valor conservador: 0,21 kgCH₄/kgDQO).</p> <p>BE: emisiones en la línea de base (tCO₂e/año).</p> <p>PE: emisiones del proyecto (tCO₂e/año).</p> <p>Q: caudal de agua residual o lodos (m³/año).</p> <p>COD_q: demanda química de oxígeno degradada promedio (t/m³).</p> <p>COD: demanda química de oxígeno promedio (t/ m³).</p> <p>MCF: factor de corrección de metano para el tratamiento o sitio de descarga del agua servida. Ver cuadro B.</p> <p>MCF_S: factor de corrección de metano para el sistema de tratamiento o disposición del lodo. Ver cuadro B o E.</p> <p>MCF_{LA}: factor de corrección de metano para aplicación al terreno (0,05).</p> <p>GWP_{CH4}: potencial de calentamiento global del metano (21 kgCO₂e/kgCH₄).</p> <p>GWP_{N2O}: potencial de calentamiento global del óxido nitroso (310 kgCO₂e/kgN₂O).</p>	<p>UF: factor de corrección por incertidumbre (0,94).</p> <p>UF_p: factor de corrección por incertidumbre en la estimación de emisiones del proyecto (1,06)</p> <p>EC: energía consumida en forma de combustible fósil o electricidad (toneladas/año o MWh/año).</p> <p>EG: cantidad de energía generada excedente (= generación – consumo del proyecto) que desplace el uso de combustibles fósiles o electricidad (toneladas/año o MWh/año).</p> <p>EF: factor de emisión de la red eléctrica o combustible fósil (tCO₂e/t o tCO₂e/MWh).</p> <p>S: cantidad de lodo generado o tratado (t/año).</p> <p>DOC: contenido de materia orgánica en el lodo generado (0,05 para lodo doméstico, 0,09 para lodo industrial).</p> <p>DOC_F: fracción del DOC que se transforma en biogás (0,5).</p> <p>F: fracción de metano en el biogás (0,5).</p> <p>W_N: fracción másica de nitrógeno en el lodo (tN/t lodo).</p> <p>L: fracción del biogás generado que se pierde en el sistema de captura, ruteo y utilización o quemado. Se aconseja utilizar un valor de 0,2.</p> <p>EF_{N2O}: Factor de emisión de N₂O para lodo aplicado al terreno.</p>
--	--

Cuadro B

Tipo de tratamiento	Comentarios	MCF	Rango
Descarga directa a cuerpo de agua natural (lago, río, mar)	Ríos con altas cargas orgánicas pueden volverse anaeróbicos	0,1	0 – 0,2
Planta de tratamiento aeróbica	Correctamente gestionada	0	0 – 0,1
Planta de tratamiento aeróbica	Mal gestionada o sobrecargada	0,3	0,2 – 0,4
Digestor anaeróbico de lodos	No considera recuperación de metano	0,8	0,8 – 1
Reactor anaeróbico	No considera recuperación de metano	0,8	0,8 – 1
Laguna anaeróbica poco profunda	Profundidad menor a 2 m	0,2	0 – 0,3
Laguna anaeróbica profunda	Profundidad mayor a 2 m	0,8	0,8 - 1

NOTA: Para lograr un resultado conservador en el cálculo de reducción de emisiones, se recomienda utilizar los valores más bajos del rango para las emisiones de base y los más altos para las del proyecto.

Fuente: IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2006.

Cuadro C

Tipo de combustible	EF (factor de emisión) (tCO ₂ e/t)
Gasolina	3,070
Gasoil (diesel)	3,186
Queroseno	3,149
Fuel oil	3,127
Gas natural	2,693
Gas licuado de petróleo	2,985
Carbón de coque	2,668
Otro carbón bituminoso	2,441
Carbón sub-bituminoso	1,816
Coque	3,017

Fuente: IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2006.

Cuadro D

El factor de emisión de la red eléctrica depende de cómo esté conformada la matriz de fuentes. Cuanto mayor sea la proporción de plantas generadoras que funcionan con combustibles fósiles, mayor será el factor de emisión de la red.

País o red	EF (factor de emisión de la red eléctrica- (tCO ₂ e/MWh)
Estados Unidos	0,559
China (red del este)	0,9046
India	0,81
Vietnam	0,705
Reino Unido	0,43
España	0,428
Italia (Sicilia)	0,470
Ucrania	0,807
Brasil (red interconectada del sur-sudeste-medio oeste)	0,2826
Ecuador	0,56053
Argentina	0,425
Uruguay	0,575
Colombia	0,4392
El Salvador	0,717
Chile	0,408
Perú	0,47207
Nicaragua	0,7127
Bolivia	0,581
Panamá	0,5593
Costa Rica	0,48835
Australia	0,751
Nueva Zelanda	0,161
Filipinas	0,494
Etiopía	0,00591
Ghana	0,57582
Uganda	0,5767

Cuadro E

El factor de corrección de metano para sitios de disposición final (MCF_S) define la proporción en que se encuentra presente el oxígeno en el medio.

Sitio de disposición	Características	MCF _S
Sitio de disposición anaeróbico gestionado	Debe contar con una disposición controlada y por lo menos uno de los siguientes: (1) material cobertor, (2) compactación mecánica, (3) nivelación del residuo.	1
Sitio de disposición semi-aeróbico gestionado	Debe contar con una disposición controlada y por lo menos uno de los siguientes métodos de aireación: (1) material cobertor permeable, (2) sistema de captura de lixiviados, (3) lagunas de retención de lixiviados, (4) sistema de ventilación de gases.	0,5
Sitio de disposición no gestionado - profundo y/o con nivel freático alto	Sitios que no cumplan con los requisitos de un sitio gestionado y que tengan una profundidad mayor a 5 m y/o el nivel freático cerca del nivel del suelo, es decir, rellenar un lago o estuario con residuos.	0,8
Sitio de disposición no gestionado poco profundo	Sitios que no cumplan con los requisitos de un sitio gestionado y que tengan una profundidad menor a 5 m	0,4

Fuente: IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2006.