



Methane to Markets

Modelo Colombiano de Biogás para Rellenos Sanitarios

**Alex Stege
SCS Engineers**

Medellín, Colombia
14 de Septiembre, 2010

Temas a Presentar

- **¿Por que un Modelo de Biogás Colombiano?**
- **Pasos para el desarrollo del modelo**
- **Resumen del Modelo Colombiano de LMOP**
- **Conclusiones y evaluación futura del modelo**

¿Porque un Modelo de Biogás Colombiano?

- **Para estimar la generación y recuperación de metano en los proyectos de biogas para rellenos sanitarios**
 - Herramienta de evaluación para el desarrollo de proyectos
 - Base para el análisis de factibilidad de proyectos
 - Se requiere para estimar las reducción de emisiones (CERs) en los PDDs
- **Otros modelos actualmente disponibles para evaluar rellenos sanitarios en Colombia**
 - Modelo de la Agencia Protectora de Medioambiente de los EE.UU. (EPA) para estimar Emisiones de Gas para Rellenos Sanitarios en los EE.UU. (LandGEM)
 - Modelo del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) (2006)
 - Modelos globales o de los EE.UU. no diseñado para Colombia – loa cuales introducen errores significativos en las estimaciones
- **Se necesita un modelo el cual incorpore condiciones actuales en Colombia (composición de residuos, clima, características del sitio)**

Bases de la Generación y Recuperación de Metano para Rellenos Sanitarios

- **Metano (CH_4) generado = CH_4 emitido + CH_4 recuperado + CH_4 oxidado + ΔCH_4 almacenado en el relleno sanitario**
 - La generación de metano en los rellenos sanitarios es desconocida (no sabe)
 - La recuperación de metano típicamente es el único término conocido en la ecuación de generación de metano
 - Las emisiones de metano se pueden reducir a un % relativamente pequeño de generación en los sitios con sistemas de captura comprensivos
 - El modelo provee métodos para estimar la generación y recuperación de biogas para rellenos sanitarios a través del tiempo

Recuperación de Biogás

- **La recuperación y generación de biogás en los rellenos sanitarios esta relacionada por medio de la “eficiencia de captura”**
 - Generación de biogás x % de eficiencia de captura = recuperación de biogás
- **Eficiencia de captura esta en función de:**
 - El diseño del sistema de captura
 - La operación y mantenimiento del sistema de captura
 - La configuración del relleno sanitario, operación y condiciones del sitio
- **Si la recuperación de biogás es conocida (medida):**
 - $$\text{Eficiencia de captura} = \frac{\text{Recuperación de biogás (medida)}}{\text{Generación de biogás (modelada)}}$$
- **Si la recuperación de biogás es desconocida (no se cuenta con un sistema de captura):**
 - $$\text{Recuperación de biogás} = \text{Generación de biogás (modelada)} \times \text{eficiencia de captura (estimada en base a la evaluación del sitio)}$$

Factores que Influyen en la Generación de Biogás

- **La generación de biogás esta en función de:**
 - Los índices de disposición de los residuos
 - La caracterización de los residuos (disponibilidad del material orgánico para que los microorganismos descompongan los residuos y produzcan CH_4 y CO_2)
 - Las condiciones dentro de la masa de los residuos:
 - Humedad (la precipitación se usa para estimar la humedad)
 - Temperatura y pH (impactos secundarios)
 - Condiciones anaerobias (esta limitado por la profundidad del relleno sanitario, compactación de los residuos o recubrimiento superior, pueden promover las condiciones aerobias tóxicas a las bacterias)

Ecuación de Primer Orden para Estimar la Generación de Metano

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 k \cdot L_0 \cdot \left[\frac{M_i}{10} \right] \cdot e^{-kt_{ij}}$$

- **Ecuación de generación de metano para rellenos sanitarios usada por la EPA LandGEM con las siguientes variables:**
 - Q_{CH_4} = Generación anual de metano en el año calculado ($m^3/año$)
 - M_i = Índice de disposición de residuos ($Mg/año$)
 - L_0 = Potencial de la generación de metano (m^3/Mg)
 - k = Constante del índice de generación de metano ($1/año$)
 - n = (año calculado) – (año inicial de aceptación de los residuos)
 - i = 1 incremento del año
 - j = 0.1 incremento del año
 - t_{ij} = Año de la j sección de residuos aceptados en el i año

Variable L_0 del Modelo

- **Variable L_0 (m^3/Mg)**
 - Representa el volumen de metano que se puede producir por un Mg de residuos.
 - Esta en función del contenido orgánico de los residuos (no incluyendo el agua)
 - Afecta directamente (linealmente) la generación de metano
 - Valor promedio de L_0 usado por la EPA para residuos en los EE.UU. = $100 \text{ m}^3/\text{Mg}$



Variable k del Modelo

- **Variable k (1/año)**

- Representa el índice de descomposición de los residuos o la fracción del potencial restante de metano emitido por año
- La variable k también puede ser expresado como el período según la ecuación siguiente:

$$\text{Periodo } (t_{1/2}) = \ln(2) / k$$

- La variable k esta en función de la humedad de los residuos, disponibilidad del nutriente, temperatura y pH
- La variable k es una constante y el exponente en la ecuación de primer orden
- El valor de la EPA para residuos en los EE.UU. en climas moderadamente mojados es = 0.04/año U.S. EPA

EE.UU. EPA LandGEM

- **Deficiencias del modelo LandGEM para aplicaciones internacionales:**
 - El modelo asume la caracterización de residuos de los EE.UU.
 - La caracterización de residuos de Colombia es diferente – mayor % de residuos alimenticios
 - El modelo proporciona valores de k “mojado” y “seco” únicamente
 - Los índices de descomposición de los residuos varían a menudo con la precipitación
 - La estructura del modelo – un solo valor de k, que no cambia conforme pasa el tiempo – error se debe al alto contenido de residuos alimenticios
 - La estructura del modelo con un solo valor de k tiende a sobrestimar la generación de biogas, particularmente en climas mojados después del cierre del sitio
 - No indica como estimar la eficiencia de captura para calcular la recuperación

Modelo IPCC (2006)

- Es un modelo de descomposición de primer orden para estimar la generación de metano
- Utiliza 4 categorías de residuos
- Utiliza 4 categorías de climas
 - Mojado (precipitación >1000 mm/año) vs. seco
 - Tropical (temperatura promedio >20°C) vs. templado
- Los PDDs para proyectos del MDL requieren el uso de un modelo de descomposición de primer orden con las variables presentadas en el modelo de la IPCC
- Incluye un factor de corrección de metano (MCF)
- Incluye cálculos de oxidación

Deficiencias del Modelo de la IPCC

- **El modelo no está diseñado específicamente para Colombia**
 - Utiliza por falta de información la caracterización de residuos para toda Sudamérica
- **Utiliza 4 categorías de climas pero solo 2 categorías de precipitación**
 - Mojado vs. seco, atajo de 1000 mm/año
 - La mayoría del territorio en Colombia recibe más de 1000 mm/año – ninguna diferenciación
 - 2 regímenes de precipitación demasiado amplios para capturar efectos sobre los valores de k
 - La información de los EE.UU. demuestra una variación más continua de k con respecto a la precipitación
 - La temperatura probablemente no presenta efectos significativos
- **La relación de descomposición de residuos alimenticios vs. madera es muy bajo excepto en climas tropicales**
- **No indica cómo estimar la eficiencia de captura**

Países Específicos que Cuentan con Modelos de Biogás

- LMOP reconoció la necesidad de modelos para pises en específico en el 2003 (Modelo Mexicano v.1)
- 2007: LMOP presenta el Modelo de Biogás para rellenos sanitarios de Centroamérica
- 2009-10: LMOP presenta varios modelos de biogás para rellenos sanitarios de los siguientes países:
 - Ecuador
 - China
 - México Versión 2
 - Ucrania
 - Tailandia y Filipinas

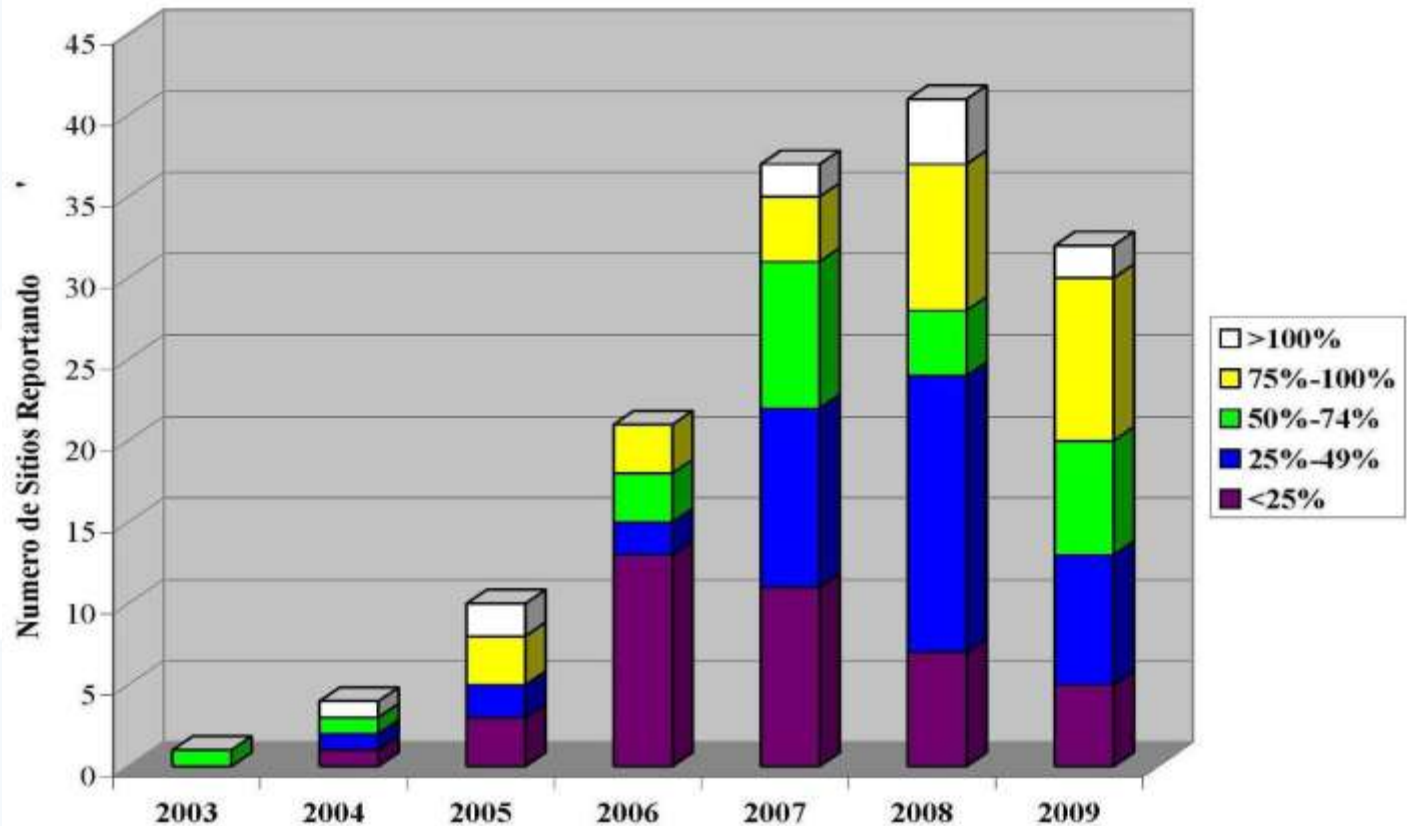
Sobrestimación Histórica de la Recuperación de Biogás para Proyectos del MDL PDD

- **Los índices de recuperación de biogás se ven afectados por:**
 - Condiciones inapropiadas del sitio
 - Instalación parcial del sistema – causa común de baja eficiencia de captura
 - Falta de experiencia con la operación de los sistemas de captura de biogás en países en vías de desarrollo
- **Dependencia en los desarrolladores del proyecto que tiene incentivos para sobreestimar las proyecciones**
 - El proceso de licitación tiende a ser asignado a propuestas con estimaciones optimistas de CERs
 - La necesidad de estimaciones independientes de recuperación de biogás

(Continuación) Sobrestimación Histórica de la Recuperación de Biogás para Proyectos del MDL PDD

- **Efectos de las condiciones del sitio y composición de los residuos sobre los índices de recuperación de biogás no tomadas en cuenta en modelos**
 1. Inapropiada selección de los valores de k y L_0
 2. Sobrestimando la eficiencia de captura alcanzable
 3. Un programa de construcción demasiado optimista para el desarrollo del sistema de captura en todas las áreas de disposición (activas)
 4. Deficiencias del modelo con un solo valor de k
- **Medición de la sobrestimación histórica de la recuperación de biogás – Reportes de Monitoreo del MDL**
 - Proveen resultados reales que indican el funcionamiento del proyecto
 - Dividiendo la recuperación actual entre las proyecciones del PDD – promedio histórico (2003-2009) = ~50%

Funcionamiento del Proyecto MDL de Biogás como un % de la Recuperación Proyectada – Mundial



Funcionamiento del Proyecto MDL de Biogás como un % de la Recuperación Proyectada – Colombia

Relleno Sanitario	Doña Juana	La Pradera	Antanas
Ciudad:	Bogota	Medellin	Pasto
Estimado 2009 (m3/hr @50% CH ₄)	10,373	1,574	-
2009 Actual (m3/hr @50% CH ₄)	5,613	1,157	-
2009 Actual/Estimado (%)	54.1%	73.5%	-
2010 Estimado (m3/hr @50% CH ₄)	11,150	2,295	384
2010 Actual (m3/hr @50% CH ₄)	7,907	1,392	486
2010 Actual/Estimado (%)	70.9%	60.7%	126.4%

Consideraciones en Proyecciones en el PDD para Doña Juana

- **Sobrestimación:**
 - Se asume que toda o mayor parte de el sitio será desarrollada
 - Únicamente las Zonas 2 y 8 tienen pozos
 - Una sequía prolongada disminuye la generación de biogás

- **Suposiciones que no causaron sobrestimación:**
 - Se aplicaron los valores de k de la IPCC para clima mojado templado
 - A pesar de que el sitio es mas seco de lo que se reporta en el PDD, el valor de k es apropiado
 - Se asumió una eficiencia de captura relativamente baja (52-53% en 2009-2010)

Consideraciones en Proyecciones en el PDD para La Pradera y Antanas

- **La Pradera, Medellín - Sobrestimación**
 - Aplica los valores máximos de k del modelo de la IPCC para el clima mojado tropical que puede ser un poco alto
 - Podría no haber alcanzado las eficiencias de captura estimadas (40% en 2009; 55% en 2010)
- **Antanas, Pasto - Subestimación**
 - Utiliza los valores de k del modelo de la IPCC para los climas templado y mojado que pueden ser bajos (la temperatura no es un factor)
 - La eficiencia de captura estimada (60%) es algo conservadora
 - “Factor de corrección del modelo” – se uso una reducción del 10%
 - La subestimación de las proyecciones del PDD puede ser un problema si la recuperación real excede la generación de las proyecciones del PDD (perdida de CERs)

Desarrollo del Modelo Colombiano de Biogás para Rellenos Sanitarios

- **Hacer que el modelo refleje condiciones locales**
 - El modelo debe reflejar las condiciones climáticas y caracterización de los residuos de todas las regiones de Colombia
- **El modelo esta estructurado para capturar las condiciones de Colombia**
 - Utiliza la estructura del modelo IPCC de 4 valores de k para tomar en cuenta los índices de descomposición de los diferentes tipos de residuos
 - Incluye los ajustes para condiciones deficientes del sitio
- **Utiliza información de sitios con sistemas de captura de biogás en funcionamiento**
 - El modelo puede ser probado comparando las proyecciones del modelo con la recuperación real de biogás
- **Permite que el modelo funcione con valores alimentados por el usuario**
 - Los índices de disposición, valores de k y L_0 , y eficiencia de captura son estimados basado en información alimentada

Desarrollo del Modelo – Fase 1: Recopilación de la Caracterización de los Residuos

- **Recopilación de la Caracterización de los Residuos**
 - Se recopiló información de reportes de evaluación y estudios de prefactibilidad elaborados previamente por LMOP-SCS y de otros (21 ciudades)
 - PDDs (4 ciudades)
 - PGIRS (32 ciudades)
- **La base de datos para la caracterización de los residuos comprende 57 ciudades en 21 departamentos**
 - La caracterización de los residuos promedio calculada para cada departamento
 - 12 departamentos sin información de caracterización de residuos, se les asignará el valor promedio de departamentos vecinos

Desarrollo del Modelo – Fase 2: Evaluar la Información Climática

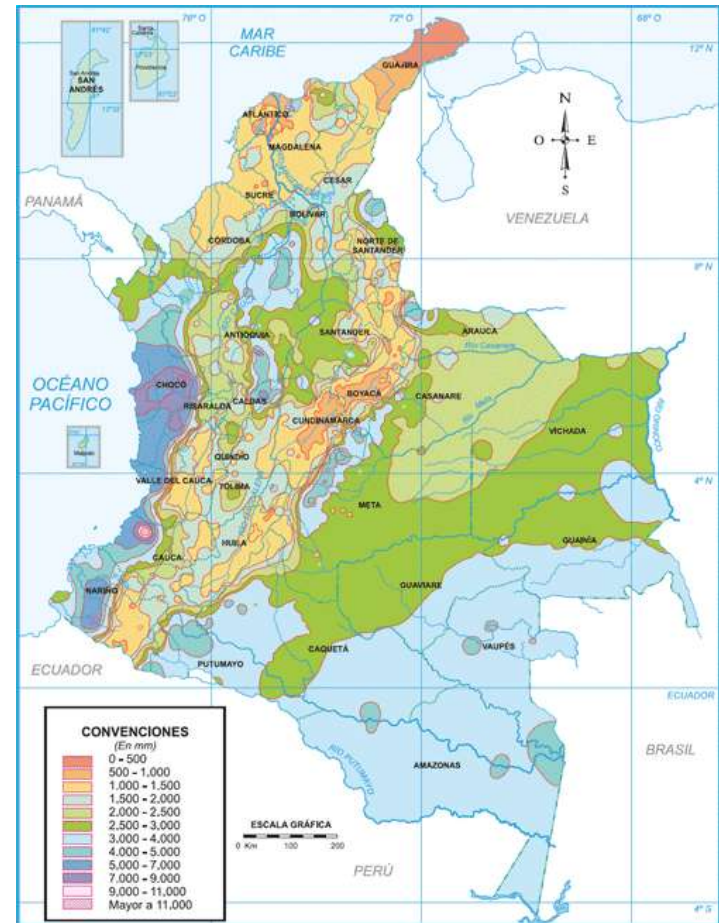
- La información de precipitación anual promedio y temperatura fue obtenida de de las siguientes fuentes:
 - www.worldclimate.com
 - Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) (<http://bart.ideam.gov.co/cliciu/climatol.htm>)
 - Weatherbase: <http://www.weatherbase.com/>
 - Información climática reportada en PDDs
- La precipitación es la variable critica



Variación de la Precipitación en Colombia



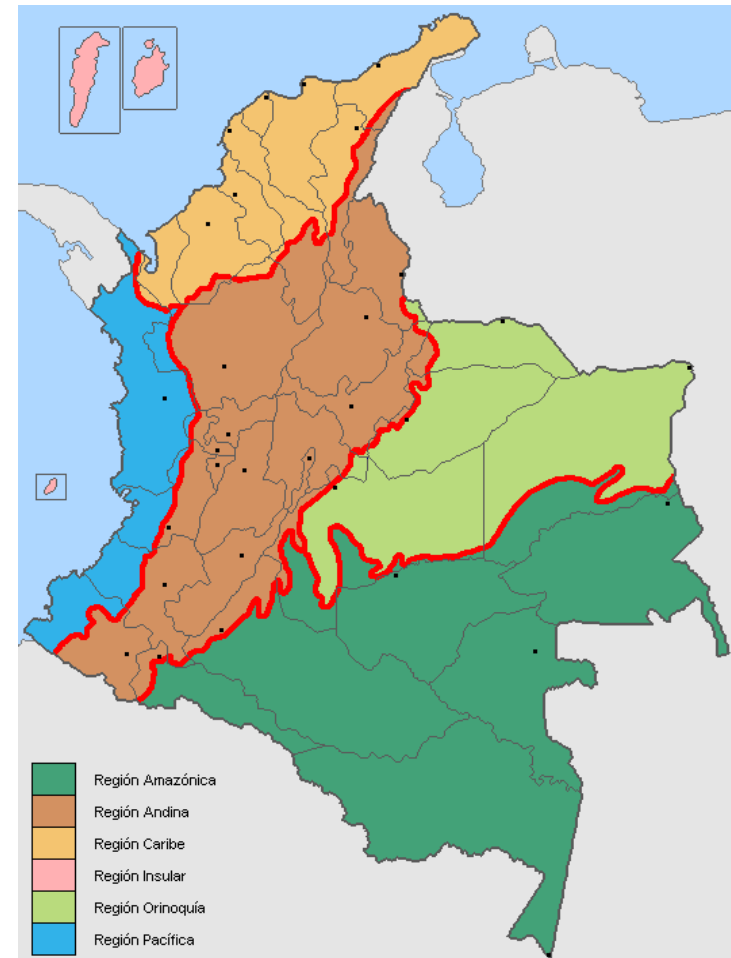
Fuente: <http://pwp.supercabletv.net.co/garcru/colombia/Colombia/clima.html>



Fuente: <http://www.kalipedia.com/geografia-ecuador/tema/graficos-precipitacion-media-multianual.html>

Regiones Geográficas en Colombia

1. **Amazónica:** muy húmedo
2. **Andina:** moderadamente seco a muy húmedo
3. **Caribe e Insular:** seco a muy húmedo
4. **Orinoquía:** húmedo a muy húmedo
5. **Pacífica:** muy húmedo



Fuente.: <http://geografia.laguia2000.com/biogeografia/colombia-vegetacion>

Evaluación de la Precipitación Estimada

- **Departamento:** La precipitación puede variar extensamente dentro de los departamentos
- **Elevación:** Mientras que la elevación causa la variación en la precipitación, no es consistente
 - Región del Caribe: precipitación incrementa con la elevación
 - Región Andina: las ciudades como Bogotá en elevaciones altas son a menudo secas debido a las montañas aledañas
- **Región Geográfica:**
 - Las regiones Pacífica y Amazónica son muy húmedas en lo general
 - La región Orinoquía es muy húmeda en la parte sur, con menos lluvia en la parte norte pero aun húmeda
 - La región Caribe el clima varia de seco en la parte norte a mojado en la parte sur con mucha elevación
 - La región Andina el clima varia de moderadamente seco a muy húmedo
- **El departamento y la región geográfica combinados son mejores para predecir la precipitación pero aún varia en las regiones de Andina y Caribe**

Categorías de Clima (Precipitación)

- **El modelo requieren que el usuario seleccionar una de 5 categorías de clima basadas en la precipitación anual promedio:**
 1. Seco: 0 – 499 mm/año
 2. Moderadamente Seco: 500 – 999 mm/año
 3. Moderadamente Húmedo: 1,000 – 1,499 mm/año
 4. Húmedo : 1,500 – 1,999 mm/año
 5. Muy Húmedo : 2,000+ mm/año
- **5 categorías suficientes para tomar en cuenta la gama de valores de k debido a las variaciones del clima en Colombia**
- **El modelo hará la corrección si se selecciona el clima incorrecto**

Desarrollo del Modelo – Fase 3: Desarrollar el Modelo

- **Se comienza con la estructura del modelo de la IPCC - 4 k y valores de Lo (un par para cada grupo de residuos)**
- **Se calculan los valores de Lo para cada departamento y categoría de residuos**
 - Lo es una función del % de residuo orgánico
 - Se asignan los valores de Lo por tipo de residuo basado en la metodología del IPCC: $Lo = DOC \times DOC_F \times F \times 16/12 \times 0.0007168$
 - Los valores de Lo por departamento y categoría de residuos son valores promedio ponderados de Lo para cada tipo de residuo
- **Se estiman los valores de k para 4 grupos de residuos y 5 climas**
 - Se asignan los valores de k del modelo de la IPCC para los climas tropicales húmedos para los “muy húmedos” (2,000+ mm/año)
 - Se asignan los valores de k para otras regiones climáticas basándose en la declinación de la precipitación promedio

Desarrollo del Modelo – Fase 4: Poner a Prueba el Modelo

- **Identificación de sitios con sistemas de extracción de biogás en funcionamiento que pueden proporcionar información para probar el modelo**
 1. Relleno Sanitario Doña Juana en Bogota – se visito en Febrero del 2010
 2. Relleno Sanitario Antanas en Pasto – se visito en Julio del 2010
- **Se realizaron visitas a los sitios para capturar información y evaluar la eficiencia de captura**
 - Índice de disposición de residuos para las celdas con pozos instalados
 - Flujo de biogas y % de metano (también se obtuvo información de los reportes de monitoreo)
 - Diseño existente del sistema de captura de biogas para evaluar la cobertura del sistema (% del área de disposición con pozos en funcionamiento)
 - Se viajo al sitio para confirmar la cobertura del sistema, determinar las condiciones del sitio incluyendo el drenaje de lixiviados
 - Desarrollo una estimación independiente de la eficiencia de captura
- **Se hizo la pregunta si el modelo predice exactamente la recuperación?**

Visita a Doña Juana (Zona 8)



- Se usa plástico para el recubrimiento diario e intermedio
- Áreas limitadas con cobertura de suelo con vegetación
- Buena cobertura del sistema pero limitada por la disposición activa
- Eficiencia de captura estimada en la Zona 8 = ~45-60%



Visita a Doña Juana (Zona 2 Area 3)



- Cobertura final instalado
- Buena cobertura del sistema
- Eficiencia de captura estimada en la Zona 2, Área 3 = ~65-75%



Visita Doña Juana (Estación de Succión y Quemado)

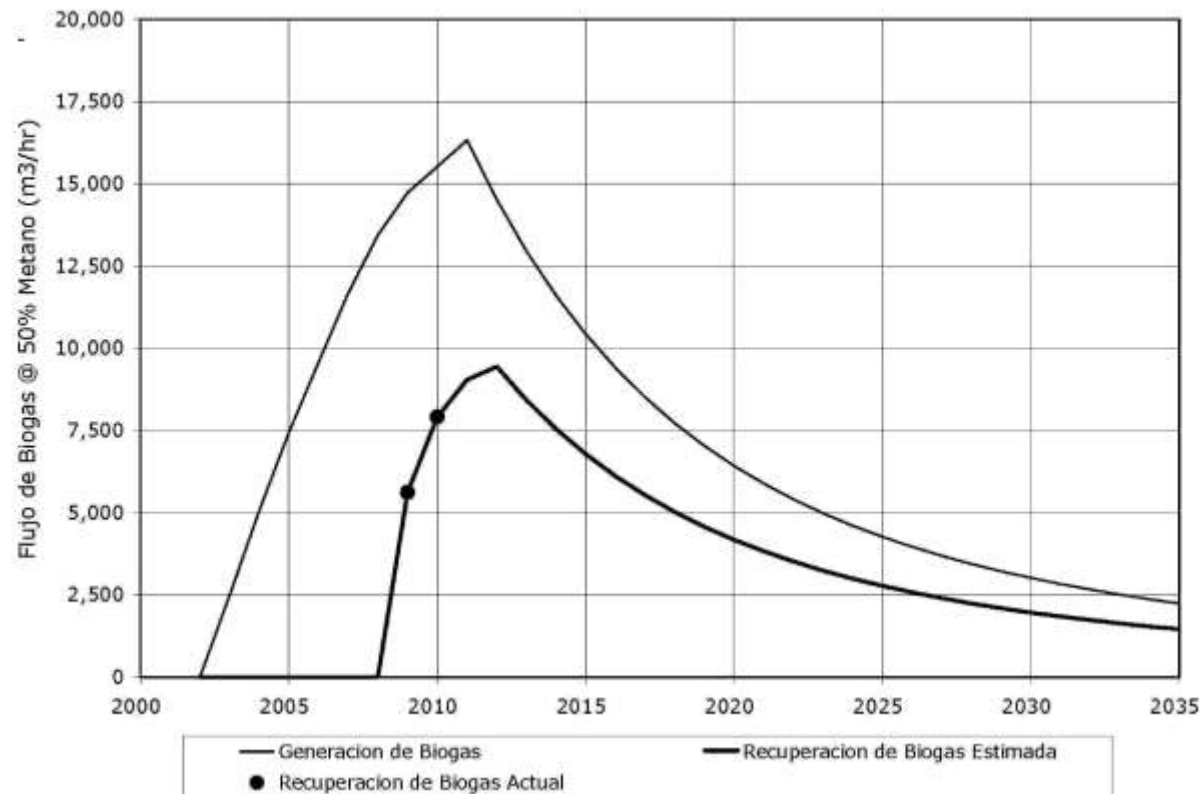


Doña Juana – Evaluación de los Datos para la Prueba Modelo

- **Correr el modelo utilizando los tonelajes para las dos zonas con pozos**
 - Se aplica la eficiencia de captura estimada para cada zona:
~55% in Zona 8 y ~70% in Zona 2 (Área 3)
- **Comparar las estimaciones del modelo con la recuperación actual**
 - Los flujos para sep – dic 2009 = ~5,600 m³/hr ajustado al 50% CH₄
 - Los flujos del 2010 calculados usando el reporte de monitoreo para dic 2009 – may 2010 = ~7,900 m³/hr @ 50% CH₄
 - El modelo subestima la recuperación actual del 2010
- **Tomando en cuenta las incertidumbres:**
 - Incertidumbre en la estimación de la eficiencia de captura, especialmente en la Zona 8
 - Sequía prolongada crea condiciones especiales
 - Se reviso el modelo utilizando “la sequía” modelando coeficientes para el 2009 y ajustando la eficiencia de captura hasta igualar aproximadamente la información de flujo
 - Eficiencia de captura 2010 requerida = 50% en la Zona 8 y 65% en la Zona 2
- **La información del relleno sanitario de Doña Juana confirma las proyecciones del modelo cuando se toma en cuenta el ajuste debido a las condiciones de sequía**
 - La prueba del modelo se vio limitada debido a las incertidumbres

Doña Juana

**Proyecciones Generacion y Recuperacion de Biogas
Zonas 2 y 8, Relleno Sanitario Doña Juana, Bogota**



Relleño Sanitario de Antanas, Pasto



Relleño Sanitario de Antanas, Pasto



Relleño Sanitario de Antanas, Pasto



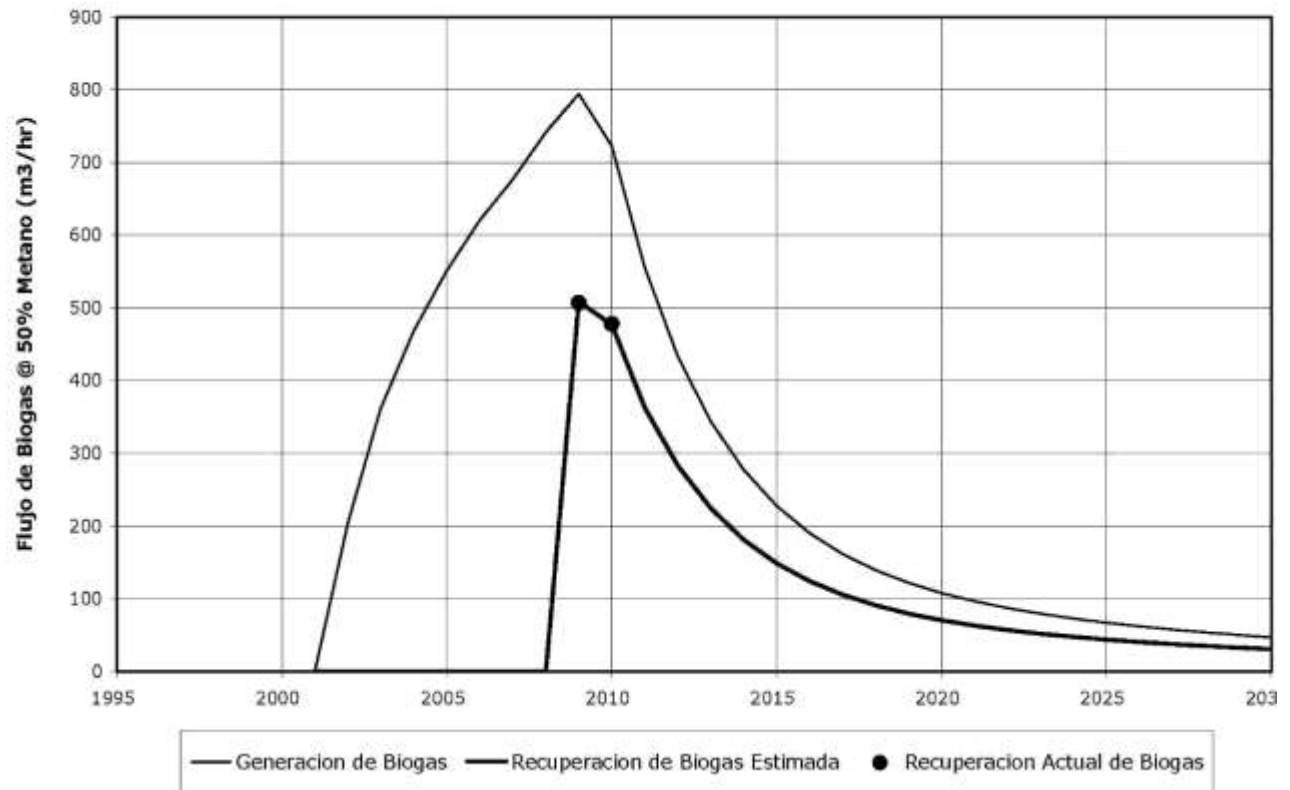
- Recubrimiento final en casi todas las áreas con pozos
- Buen drenaje a las lagunas de lixiviado
- Buena cobertura del sistema de captura
- La mayoría de los pozos son pozos de venteo modificados (se desconoce el impacto que tenga en la eficiencia)
- Pozos nuevos instalados con retroexcavadora (no son perforados)
- Eficiencia de captura estimada = ~60-70%

Antanas – Evaluación de Información para Pruebas del Modelo

- Se corrió un modelo utilizando los tonelajes y la precipitación reportada en el PDD
 - El modelo estima generación de biogás = 794 m³/hr en 2009 y 723 m³/hr en 2010
- Comparando las estimaciones del modelo con la recuperación actual de biogás
 - La información de flujo proporcionada para noviembre del 2009 – mayo 2010
 - Promedio 2009 = 507 m³/hr @ 50% CH₄
 - Promedio 2010 = 478 m³/hr @ 50% CH₄
 - La generación de biogás modelada implica una eficiencia de captura en 2009 del 64% y una eficiencia de captura del 66% en el 2010
 - Los resultados se encuentran en el punto medio de la eficiencia de captura estimada independientemente (60-70%)
- La información de flujo para Antanas confirma las estimaciones del modelo
 - No se necesitó hacer ningún ajuste

Antanas

Proyeccion de Generacion y Recuperacion de Biogas para Relleno Sanitario de Antanas, Pasto, Nariño



Resumen del Modelo Colombiano de Biogás

- **Hoja de Calculo de Alimentación**
 - El usuario contesta una serie de preguntas respecto al sitio
 - El modelo automáticamente calcula los valores de entrada de del modelo: índice de disposición de residuos, k, Lo, MCF, ajustes por fuegos y eficiencia de captura
- **Hoja de Calculo de Disposición y Recuperación de Biogás**
 - Muestra la disposición anual y estimaciones de la eficiencia de captura calculadas por el modelo
 - Permite al usuario introducir información específica de la disposición estimada, eficiencia de captura, recuperación de biogas actual y línea base de la recuperación de biogás
- **Hoja de Calculo de Caracterización de Residuos**
 - Muestra la caracterización de los residuos asignada a cada departamento
 - Permite al usuario introducir información específica sobre la caracterización de los residuos
- **Hoja del Calculo de Tabla de Resultados**
 - Muestra los resultados del modelo en forma tabular
- **Hoja de Calculo de Grafico de Resultados**
 - Muestra los resultados del modelo en forma grafica

Pasos Siguientes y Conclusiones

- **Prueba del modelo en un futuro – en cuanto mas proyectos aparezcan en línea y tengan resultados reales**
 - Se divide la recuperación de biogás medida entre las estimaciones de generación del modelo - ¿es la eficiencia de captura razonable implicada?
- **El modelo Colombiano de Biogás estará disponible en los sitios de Internet de la LMOP y M2M**
 - El modelo es fácil de utilizar y proporciona estimaciones realistas de generación y recuperación de biogás
 - El modelo se desarrollo evaluando departamentos, climas regionales, disposición y caracterización de residuos y datos reales de la recuperación de biogás
 - Se recomienda usar el modelo con herramienta para evaluaciones preliminares y PDD
 - Ayuda a evitar sobrestimar o subestimar CERs

Para mas Información:

- Modelo Colombiano de Biogás de Rellenos Sanitarios disponible en:
 - www.epa.gov/lmop/international/index.htm
- Victoria Ludwig
 - USEPA – Programa LMOP (202)
 - ludwig.victoria@epa.gov
- Alex Stege
 - SCS Engineers (602) 840-2596
 - astege@scsengineers.com
- José Luis Dávila
 - SCS Engineers (602) 840-2596
 - jdavila@scsengineers.com