MINISTERIO DE PRODUCCIÓN SOSTENIBLE, MEDIO AMBIENTE Y AGUA
VICEMINISTERIO DE SEGURIDAD HÍDRICA, AGUA, SANEAMIENTO BÁSICO Y RIEGO

cooperación alemana
DEUTSCHE ZUSAMMENARBEIT

Cofinanciado por la Unión Europea

Implementada por:
giz Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



Dr. Miguel Suárez

Presidente de INSAAP S.A., empresa especializada en ingeniería y servicios ambientales aplicados a la gestión integral de residuos. Cuenta con una experiencia de 30 años en diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios, sistemas de tratamiento de lixiviados, gestión y aprovechamiento energético de biogás. Asimismo, ha participado en proyectos impulsados por organismos internacionales como el BID, el Banco Mundial y la GIZ en distintos países de América Latina.

FORO NACIONAL

DE APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE RESIDUOS



Captación y Valorización Energética de Biogás en Rellenos Sanitarios

Expositor: Miguel E. Suárez Fecha 27/10/2026

MINISTERIO DE PRODUCCIÓN SOSTENIBLE, MEDIO AMBIENTE Y AGUA
VICEMINISTERIO DE SEGURIDAD HÍDRICA, AGUA, SANEAMIENTO BÁSICO Y RIEGO

cooperación alemana DEUTSCHE ZUSAMMENARBEIT

Cofinanciado por la Unión Europea

Implementada por: giz Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

ÍNDICE

Del Residuo a la Energía



FORO NACIONAL
DE APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE RESIDUOS









De botaderos a Cielo Abierto a Rellenos Sanitarios



Un desafío compartido por toda la región

541.000 t/día

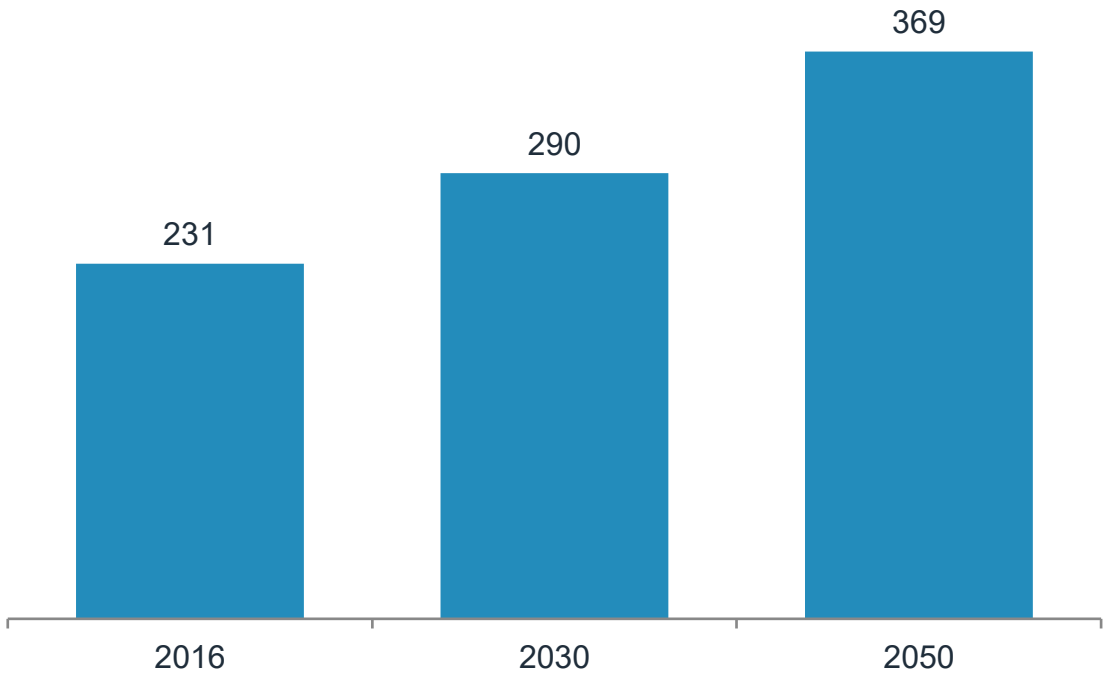
de residuos urbanos se generan en América Latina y el Caribe

1 de cada 3

toneladas aún termina en botaderos, quemada o sin recolectar

+25%

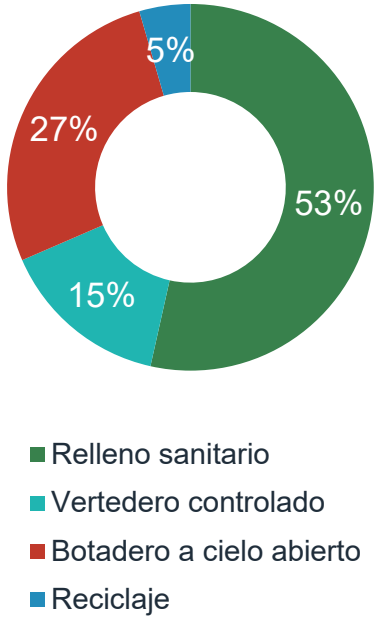
Generación de residuos en América Latina y el Caribe (millones de t/año)



Fuentes: PNUMA, Perspectiva de la Gestión de Residuos en América Latina y el Caribe (2018); Banco Mundial, What a Waste 2.0 (2018), proyección 2030–2050.

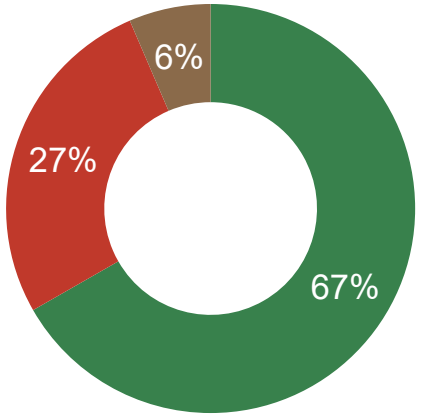
Disposición final en la región: avances y brechas

Por tipo de disposición



≈ 27% aún en botaderos

Por toneladas diarias



≈ 145.000 t/día en botaderos o quema

- **Avances:** más de la mitad de los residuos de la región ya llega a rellenos sanitarios.
- **Brecha persistente:** la proporción en botaderos sigue siendo elevada y sin solución estructural por ahora.
- **El reto se concentra** en ciudades pequeñas e intermedias, con poca escala y capacidad técnica.
- **Escenario común** a muchos países de Sudamérica, también a Bolivia.

Fuentes: Banco Mundial, What a Waste 2.0 (2018): botadero ≈27%, vertedero controlado 15%, reciclaje 4,5%; relleno sanitario = resto. PNUMA (2018): 541.000 t/día generadas; 145.000 en botaderos o quema; 35.000 sin recolectar.

Impactos de los botaderos a cielo abierto

Metano sin control

Emisión difusa y olores; el CH_4 calienta ~28 veces más que el CO_2 a 100 años.

Incendios y quema

Combustión espontánea o provocada: humo tóxico, dioxinas y furanos.

Lixiviados

Sin impermeabilización ni drenaje: contaminación de suelos, ríos y acuíferos.

Salud y vectores

Roedores, insectos y aves; riesgo sanitario para la población vecina.

Segregación informal

Trabajo precario dentro del sitio, sin protección ni seguridad social.

Inestabilidad

Residuos sin compactar: taludes inestables, deslizamientos y colapsos.

SEIS ETAPAS DE UN PROYECTO DE BIOGAS

01

Relleno sanitario

Diseño, operación y su rol como reactor

02

Formación de biogás

Fases de descomposición y composición

03

Potencial de generación: LandGEM

Modelo, parámetros y sensibilidad

04

Acondicionamiento del biogás

Captación, tratamiento y calidad de gas

05

Generación eléctrica con motores

Tecnología, balance y dimensionamiento

06

Aspectos clave de éxito

Factores críticos por instancia y riesgos



RELLENO SANITARIO Y SU INFRAESTRUCTURA

Confinamiento

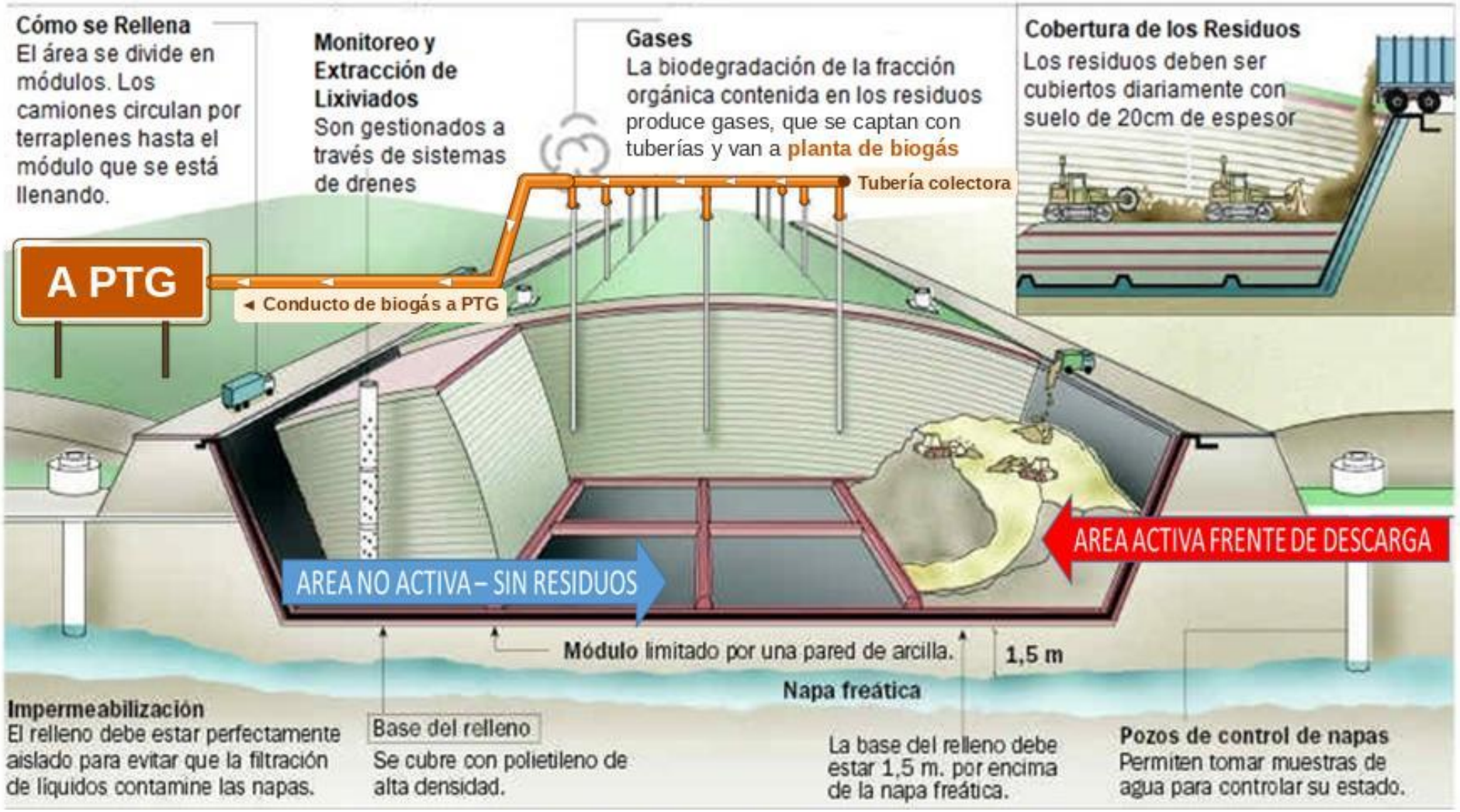
Barreras inferior y superior aíslan los residuos del suelo, el agua y el aire.

Celdas compactadas

Capas con cobertura diaria crean el ambiente anaerobio que genera metano.

Dos efluentes

Lixiviados y biogás deben captarse y gestionarse durante décadas.



Corte esquemático ilustrativo, sin escala

PLANTA DE GENETACIÓN (VISTA: RS – PTG – PG)



Biogás de RS de Un problema a una Oportunidad

28×

Potencial de calentamiento global del metano frente al CO_2 en un horizonte de 100 años (IPCC AR5)

Los rellenos están entre las principales fuentes antrópicas de metano a nivel mundial.

Clima

Quemar o aprovechar el metano lo convierte en CO_2 biogénico y habilita créditos de carbono.

Seguridad

El metano es explosivo entre 5 % y 15 % en aire; la captación evita migraciones e incendios.

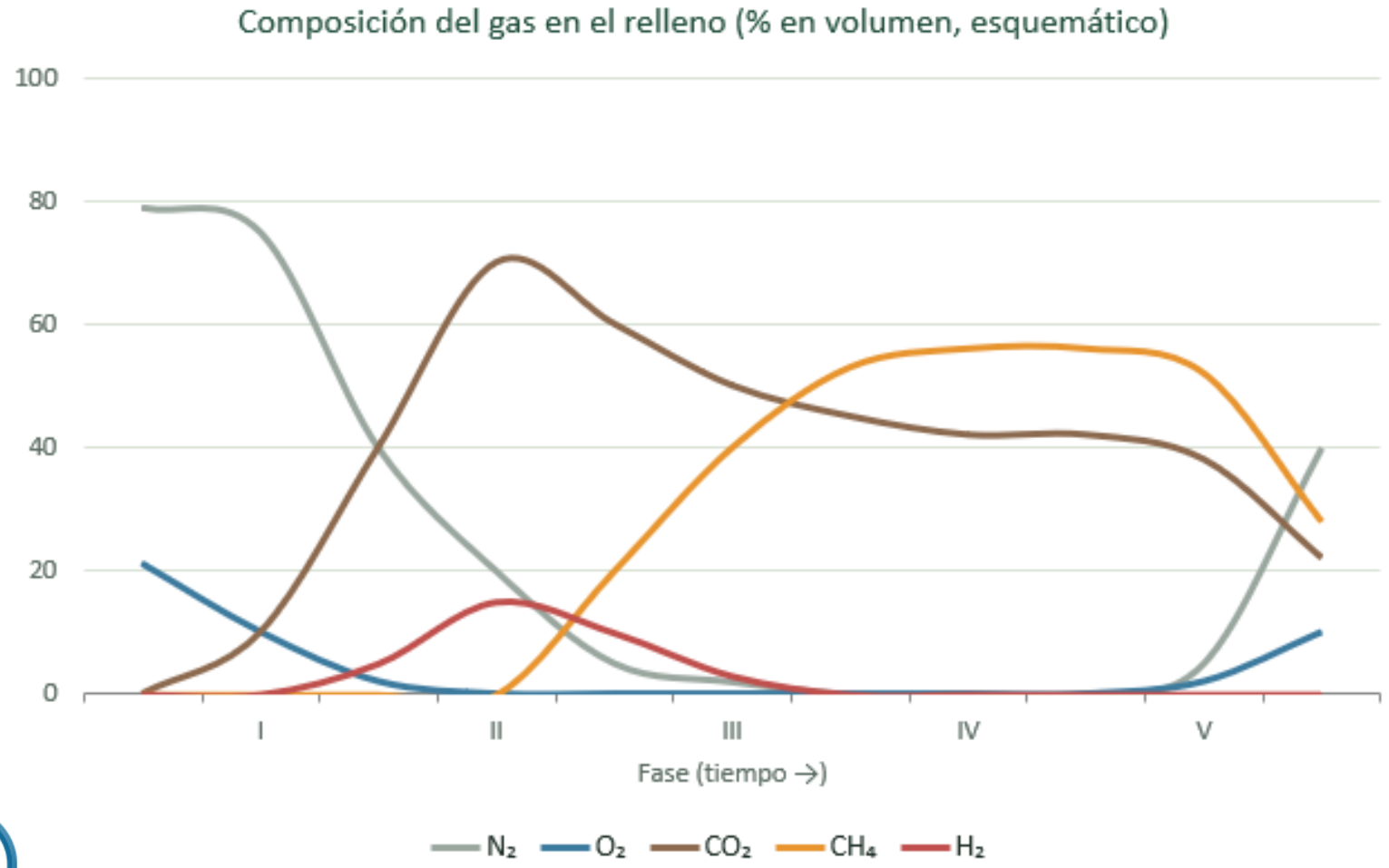
Comunidad

Reduce olores y mejora la aceptación social del sitio y su entorno.

Energía e ingresos

Transforma un pasivo ambiental en electricidad vendible y renovable.

El biogás se forma en cinco fases de descomposición



I — Aeróbica
Se consume el O_2 atrapado; dura días a semanas.

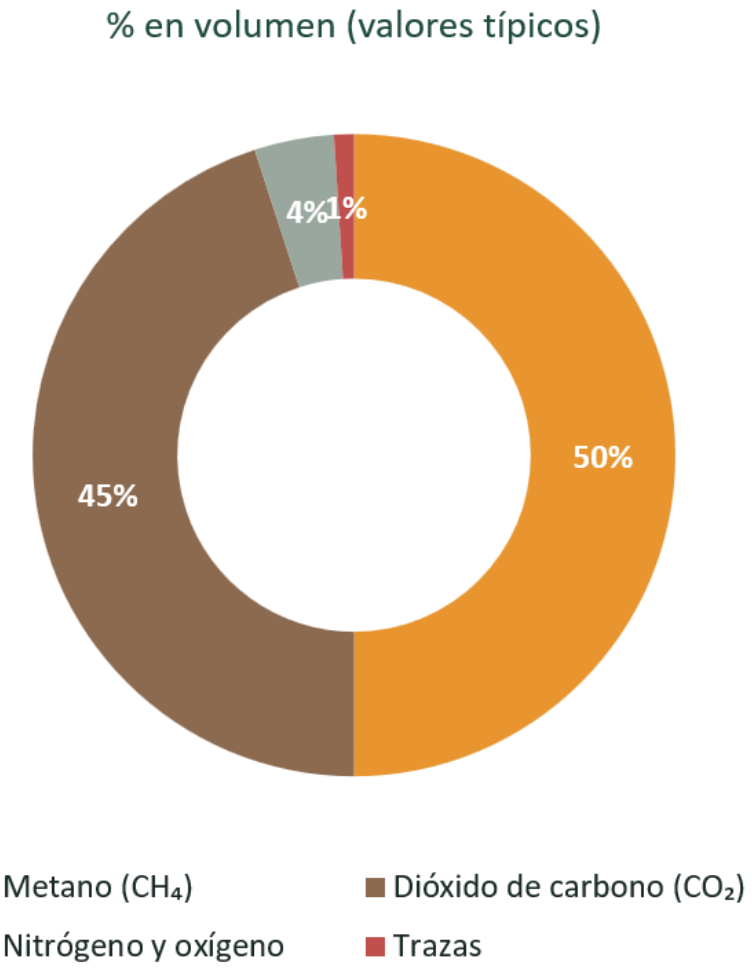
II — Transición
Se instala la anaerobiosis y comienza a bajar el pH.

III — Ácida
Hidrólisis y acidogénesis: ácidos grasos, CO_2 y H_2.

IV — Metanogénica
CH_4 estable en 50–60 % durante décadas: la fase útil.

V — Maduración
La generación declina y el aire vuelve a ingresar.

Composición típica del biogás de relleno



≈ 5 kWh/Nm³

Poder calorífico inferior con 50 % de CH_4

100 % HR

Sale del relleno saturado en vapor de agua

Componente	Rango típico	Efecto en equipos
Sulfuro de hidrógeno (H_2S)	20 – 1.000 ppm	Corrosión, acidifica el aceite
Siloxanos	5 – 50 mg/Nm³	Depósitos abrasivos de sílice
Halogenados (Cl, F)	10 – 200 mg/Nm³	Ácidos corrosivos en combustión
Partículas y COV	Variable	Desgaste, olores, ensuciamiento

Rangos orientativos; cada sitio debe caracterizarse con análisis de laboratorio.

Seis factores controlan la velocidad de generación

Humedad

Es el factor más influyente: más humedad acelera la degradación; la recirculación de lixiviados la favorece.

Temperatura

Óptimo mesofílico de 30 a 40 °C; la propia actividad biológica calienta la masa.

pH y alcalinidad

La metanogénesis requiere un pH cercano a neutro, entre 6,8 y 7,4.

Composición del residuo

Más fracción orgánica rápidamente degradable implica mayor k y mayor L_0.

Operación y cobertura

Compactación, espesor de capas y cobertura definen el ambiente anaerobio.

Ingreso de aire

El oxígeno inhibe a los metanógenos: la succión en pozos debe controlarse.

LandGEM: modelo de decaimiento de primer orden

$$Q_{CH4} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=0,1}^{1} k \cdot L_0 \cdot (M_i / 10) \cdot e^{-k \cdot t_{ij}}$$

Q CH4	Metano generado en el año de cálculo (m^3/año)
k	Constante de generación de metano ($año^{-1}$)
L_0	Potencial de generación de metano (m^3 CH_4/t)
M_i	Masa de residuos ingresada en el año i (t)
t_{ij}	Edad de la fracción j de la masa M_i (años)
i, j	Incrementos de 1 año y de 0,1 año

Herramienta de la US EPA

Planilla de cálculo gratuita, estándar internacional para estimar emisiones de rellenos.

Cinética de primer orden

Cada tonelada genera metano en forma exponencialmente decreciente desde su disposición.

Del metano al biogás

Biogás = CH_4 / fracción de metano (por defecto 50 %).

Elegir k y L_0 es la decisión más sensible del modelo

Escenario por defecto (EPA)	k (año^{-1})	L_0 (m^3 CH_4/t)
CAA – convencional	0,05	170
CAA – zona árida	0,02	170
Inventario – convencional	0,04	100
Inventario – zona árida	0,02	100
Inventario – húmedo (biorreactor)	0,70	96

CAA: valores regulatorios conservadores (Clean Air Act). Inventario: valores de AP-42 para estimar emisiones. Zona árida: precipitación < 635 mm/año.

k — **Velocidad**

Depende de humedad, temperatura y fracción orgánica. Residuos latinoamericanos, más orgánicos, suelen justificar k mayores que el valor por defecto.

L_0 — **Potencial total**

Depende del carbono orgánico degradable del residuo. Se estima a partir de la caracterización física de los residuos.

Qué necesita el modelo y qué entrega

ENTRADAS

- Años de apertura y cierre
- Toneladas ingresadas por año (históricas y proyectadas)
- Capacidad de diseño del relleno
- Parámetros k, L_0 y % de CH_4

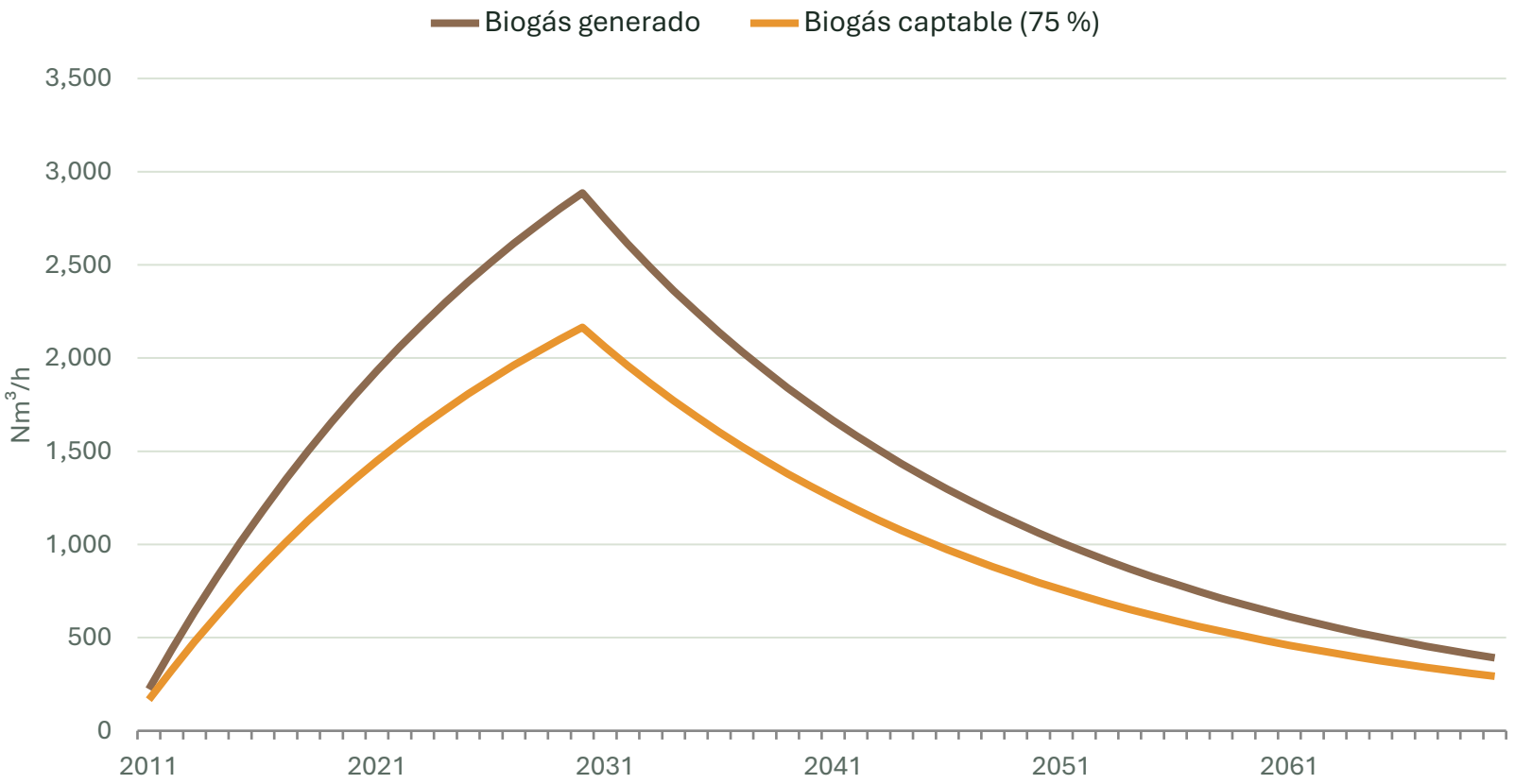


SALIDAS

- Biogás, CH_4 y CO_2 generados (m^3/año y t/año)
- Contaminantes y COV no metánicos
- Curva anual de generación durante toda la vida del sitio

El modelo estima lo que se genera. Lo que realmente se aprovecha depende de la eficiencia de captación, típicamente entre 50 % y 85 %.

Ejemplo: Relleno de 200.000 t/año durante 20 años



2030

Año de máxima generación (al cierre)

≈ 2.900

Nm^3/h de biogás generado en el pico

≈ 4,3 MW

Potencia eléctrica posible en el pico

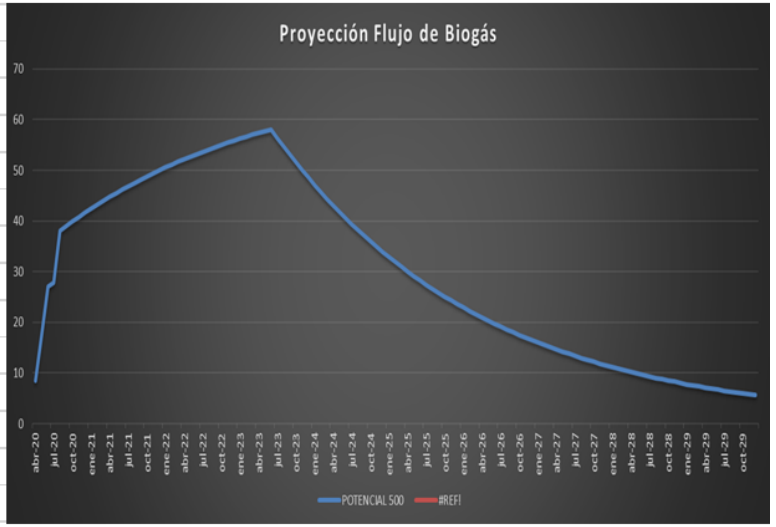
Supuestos: ingreso 2010–2029, k = 0,05 año $^{-1}$, L_0 = 100 m^3/t, 50 % CH_4, captación 75 %, eficiencia eléctrica 40 %. Ejemplo ilustrativo

.

NOTA IMPORTANTE - LA EFICIENCA DE CAPTACIÓN SEGUN EL EJEMPLO ES DEL 75%, DEBERÁ AJUSTARSE EN VIRTUD DE LA EFICIENCIA POSIBLE Y ESPERABLE EN EL SITIO, EN VIRTUD DE LAS CONDICIONES OPERATIVAS.

Modelización típica Proyecto de Valorización Energética de Biogás

Landfill gas production rate, k =	**0,03**	$month^{-1}$
Gas Production potential, Lo =	**150**	m^3/tonnes
lag time before start of gas production, lag =	5	months
year landfill opened	0	
year landfill closed	2024	
number of production years after closure	100	
methane (by volume)	50%	
carbon dioxide (by volume)	50%	
methane (density) - STP	0,7168	kg/m^3
carbon dioxide (density)	1,80	kg/m^3
percentage of inert material	0%	
energy value	500	btu/ft^3
VOC factors based on average of all landfills		
(**Boldface** number indicate a required input)		



Estimación de la Generación del Biogás El Modelo LANDGEM Environmental Protection Agency (EPA)

Generación de biogás = 2 k L 0 M e-kt donde:

k = Índice de generación de metano (1/año)
L 0 = Generación potencial de metano (m 3/ton)
M = Cantidad de residuos depositados por año (tons)
t = Número de años (Edad) de los residuos (años)

	Year	Year Number	Annual Tonnage (Tonnes)	Annual Decomposible Tonnage (Tonnes)	Annual Gas Production (m^3/mo.)	Annual Gas Production (cfm)	Annual Methane Production (kg/mo)	Annual Carbon Dioxide Production (kg/mo)	Annual Methane Emissions (tonnes CH4/mo)	Annual Methane as eCO2 (tonnes/mo)	Annual Gas Collected (m^3/hr)	Collection Efficiency
jun-19	17		410.000	410.000	19.559.856	15.987	7.010.252	17.592.134	7.010	147.215	0	0%
jul-19	18		410.000	410.000	20.826.774	17.023	7.464.316	18.731.601	7.464	156.751	0	0%
ago-19	19		410.000	410.000	22.056.250	18.028	7.904.960	19.837.391	7.905	166.004	0	0%
sep-19	20		410.000	410.000	23.249.392	19.003	8.332.582	20.910.503	8.333	174.984	0	0%
oct-19	21		410.000	410.000	24.407.268	19.950	8.747.565	21.951.897	8.748	183.699	0	0%
nov-19	22		410.000	410.000	25.530.924	20.868	9.150.283	22.962.513	9.150	192.156	0	0%
dic-19	23		410.000	410.000	26.621.372	21.759	9.541.100	23.943.262	9.541	200.363	0	0%
ene-20	24		410.000	410.000	27.679.592	22.624	9.920.366	24.895.025	9.920	208.328	0	0%
feb-20	25		410.000	410.000	28.706.536	23.464	10.288.423	25.818.658	10.288	216.057	0	0%
mar-20	26		410.000	410.000	29.703.128	24.278	10.645.601	26.714.993	10.646	223.558	0	0%
abr-20	27		410.000	410.000	30.670.268	25.069	10.992.224	27.584.839	10.992	230.837	4.260	10%
may-20	28		410.000	410.000	31.608.828	25.836	11.328.604	28.428.980	11.329	237.901	8.780	20%
jun-20	29		410.000	410.000	32.519.644	26.580	11.655.040	29.248.168	11.655	244.756	13.550	30%
jul-20	30		410.000	410.000	33.403.544	27.303	11.971.830	30.043.147	11.972	251.408	13.918	30%
ago-20	31		410.000	410.000	34.261.320	28.004	12.279.257	30.814.631	12.279	257.864	19.034	40%
sep-20	32		410.000	410.000	35.093.744	28.684	12.577.598	31.563.313	12.578	264.130	19.497	40%
oct-20	33		410.000	410.000	35.901.568	29.345	12.867.122	32.289.870	12.867	270.210	19.945	40%
nov-20	34		410.000	410.000	36.685.512	29.985	13.148.088	32.994.949	13.148	276.110	20.381	40%
dic-20	35		410.000	410.000	37.446.292	30.607	13.420.751	33.679.195	13.421	281.836	20.803	40%

Análisis e Interpretación de Modelización de Proyección de Biogás

Grafico de Proyección curva Biogás

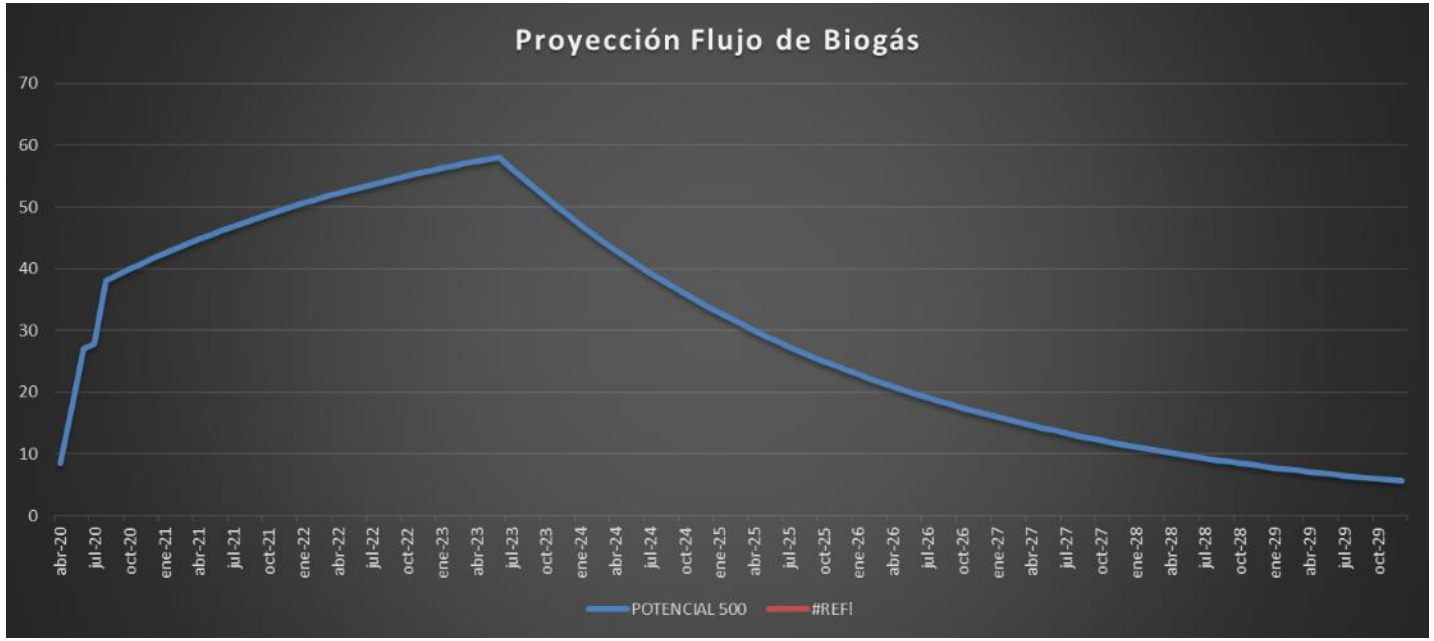
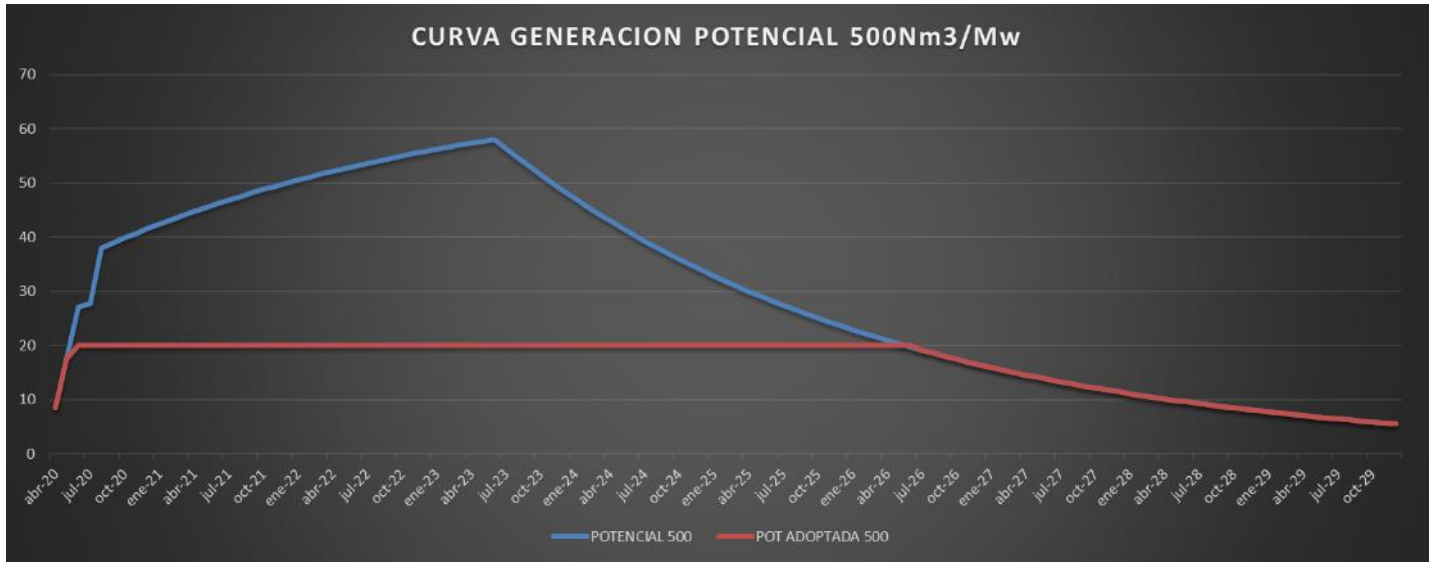
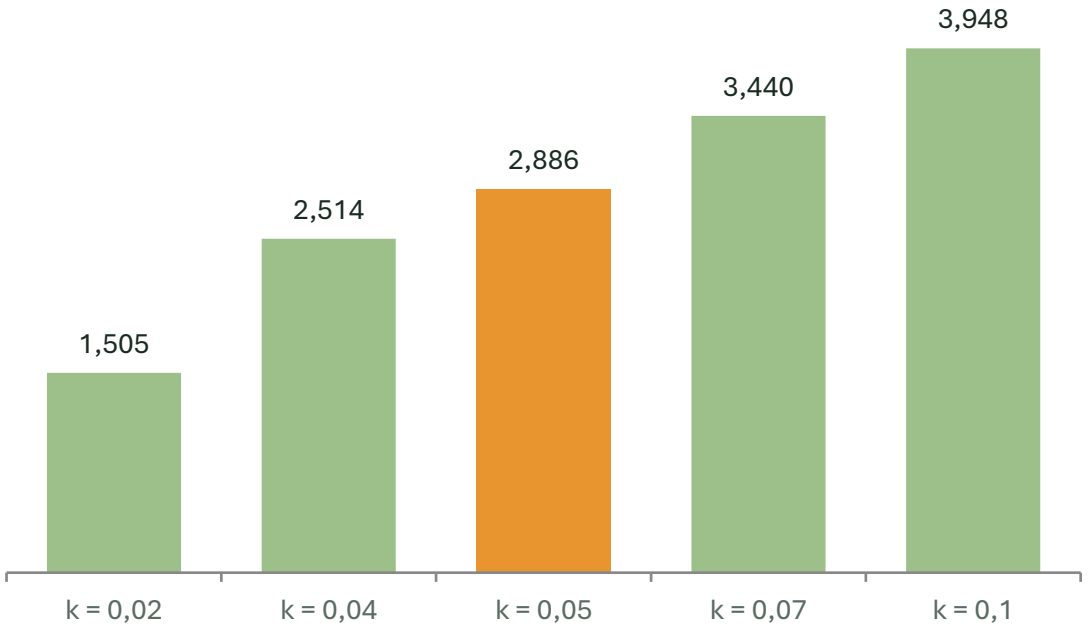


Grafico de Proyección de Curva de Biogás con Proyección estimada de Generación Eléctrica

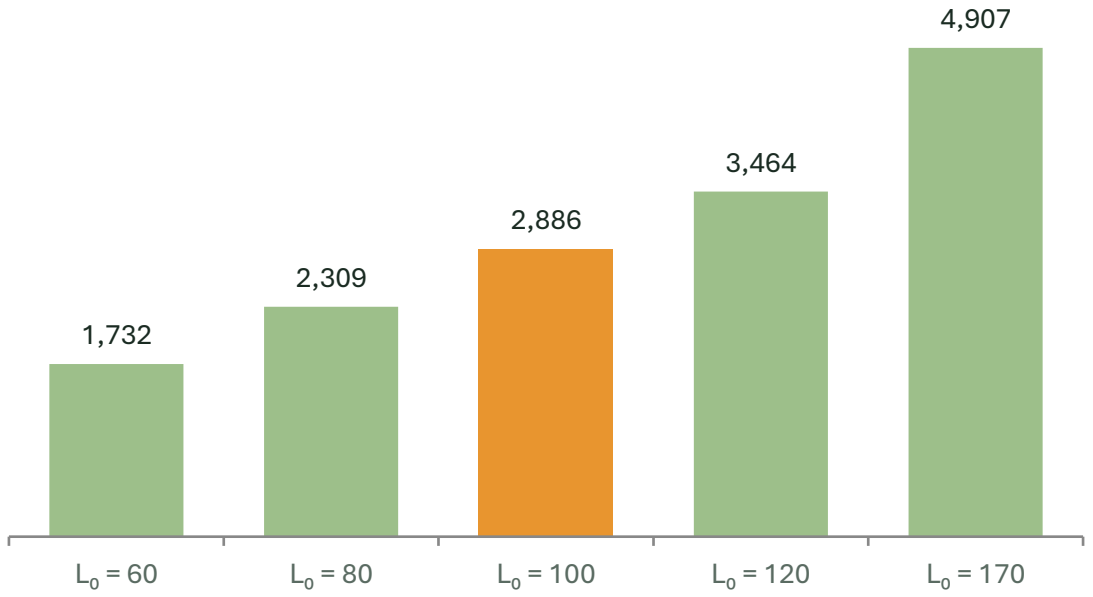


El pico puede variar de –50 % a +70 % según k y L_0

Pico de biogás (Nm^3/h) según k · L_0 = 100



Pico de biogás (Nm^3/h) según L_0 · k = 0,05



Antes de comprometer potencia: calibrar el modelo con pruebas de bombeo en campo y trabajar con escenarios conservadores.

La red de captación define cuánto gas llega a la planta

Pozos verticales

Tubería perforada en grava; espaciamiento típico de 30 a 60 m según profundidad y permeabilidad.

Drenes horizontales

Se instalan en celdas en operación para captar gas antes del cierre.

Cabezales de pozo

Válvula de regulación y puertos para medir caudal, presión, CH_4 y O_2.

Red de colectores

Tuberías de PEAD con pendiente que permita drenar el condensado.

Trampas de condensado

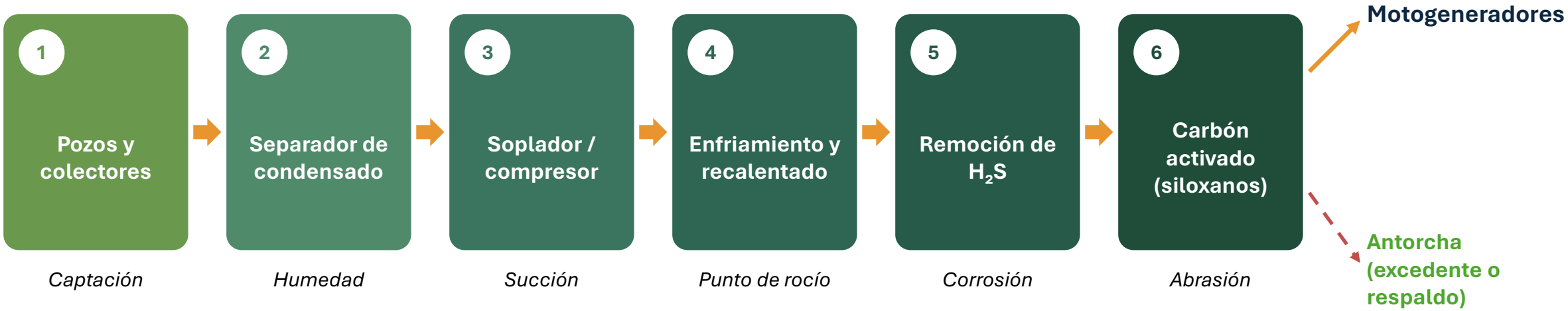
Retiran el agua en puntos bajos y evitan bloqueos en la red.

Soplador y antorcha

Generan la succión y queman el gas excedente o en paradas de motores.

Tren de acondicionamiento: del gas crudo al combustible

Biogás crudo · CH_4 45–55 % · saturado en agua · H_2S · siloxanos · partículas



Humedad

Enfriar a 5–10 °C condensa el agua; recalentar unos grados baja la humedad relativa y protege el motor.

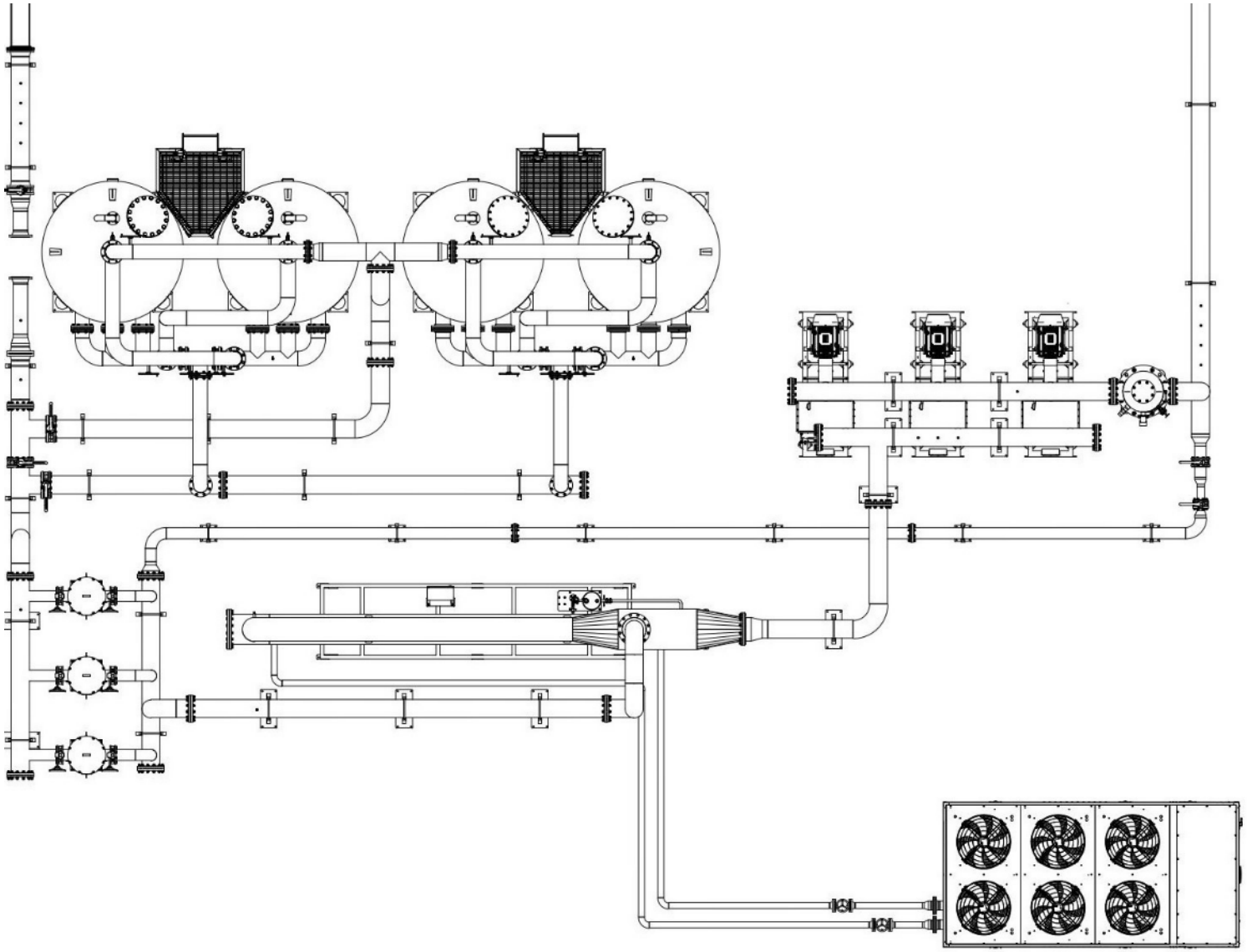
H_2S

Remoción por lavado biológico, óxido de hierro o carbón activado impregnado según la carga.

Siloxanos

Adsorción en carbón activado o gel de sílice; el recambio del lecho es un costo operativo clave.





Calidad de gas que exigen los motores

Parámetro	Biogás crudo	Exigencia típica del motor	Cómo se logra
Metano (CH_4)	45 – 55 %	≥ 40 %, con variaciones lentas	Calibración de pozos y control de O_2
Humedad	Saturado	HR < 80 %, sin condensado	Enfriamiento y recalentamiento
H_2S	20 – 1.000 ppm	Según límite de azufre del fabricante	Desulfuración biológica o química
Siloxanos	5 – 50 mg/Nm^3	Muy bajo, del orden de pocos mg/Nm^3	Carbón activado / gel de sílice
Partículas	Polvo, arenilla	Filtrado fino (pocos µm)	Filtros de cartucho
Presión y temperatura	Depresión en red	Sobrepresión estable, gas < 40 °C	Soplador y control de rampa

Valores orientativos: los límites dependen del modelo de motor. Verificar siempre la especificación técnica del fabricante, ya que condiciona la garantía.

Los motores a gas son la tecnología dominante

38–42 %

Eficiencia eléctrica de motores Otto a gas pobre

0,5–3 MW

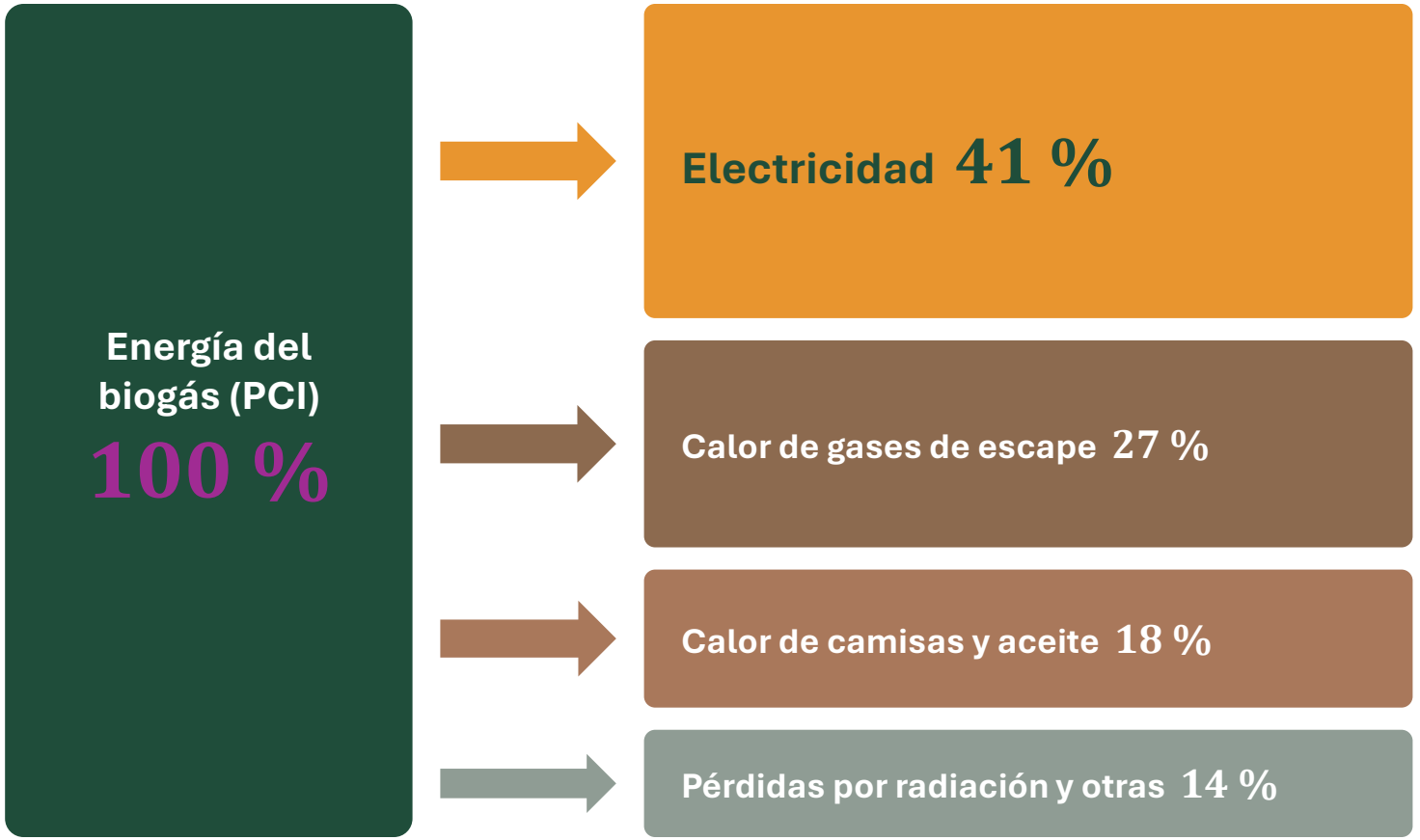
Potencia típica por módulo, en contenedor o sala

> 90 %

Disponibilidad anual objetivo con buen mantenimiento

Tecnología	Rango de aplicación	Eficiencia eléctrica	Comentario
Motor de combustión interna	0,3 – 4 MW por unidad	35 – 42 %	Robusto, modular y con amplia experiencia en rellenos
Turbina a gas	Más de 3 MW	25 – 35 %	Requiere compresión de gas; menor eficiencia
Microturbina	30 – 250 kW por unidad	25 – 30 %	Para caudales bajos o rellenos pequeños
Ciclo ORC (complemento)	Calor residual de motores	+ 5 – 10 % adicional	Aprovecha gases de escape para más electricidad

Solo el 40 % de la energía del biogás se vuelve electricidad



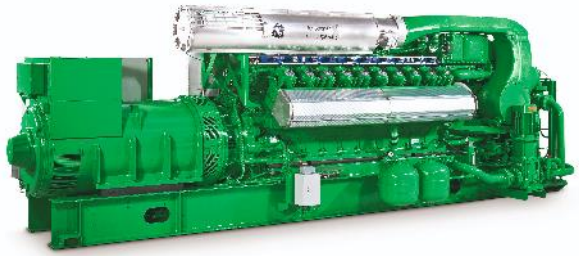
≈ 0,5 Nm^3

de biogás (50 % CH_4) por cada kWh eléctrico

≈ 45 % es calor recuperable: evaporación de lixiviados, secado o calefacción.

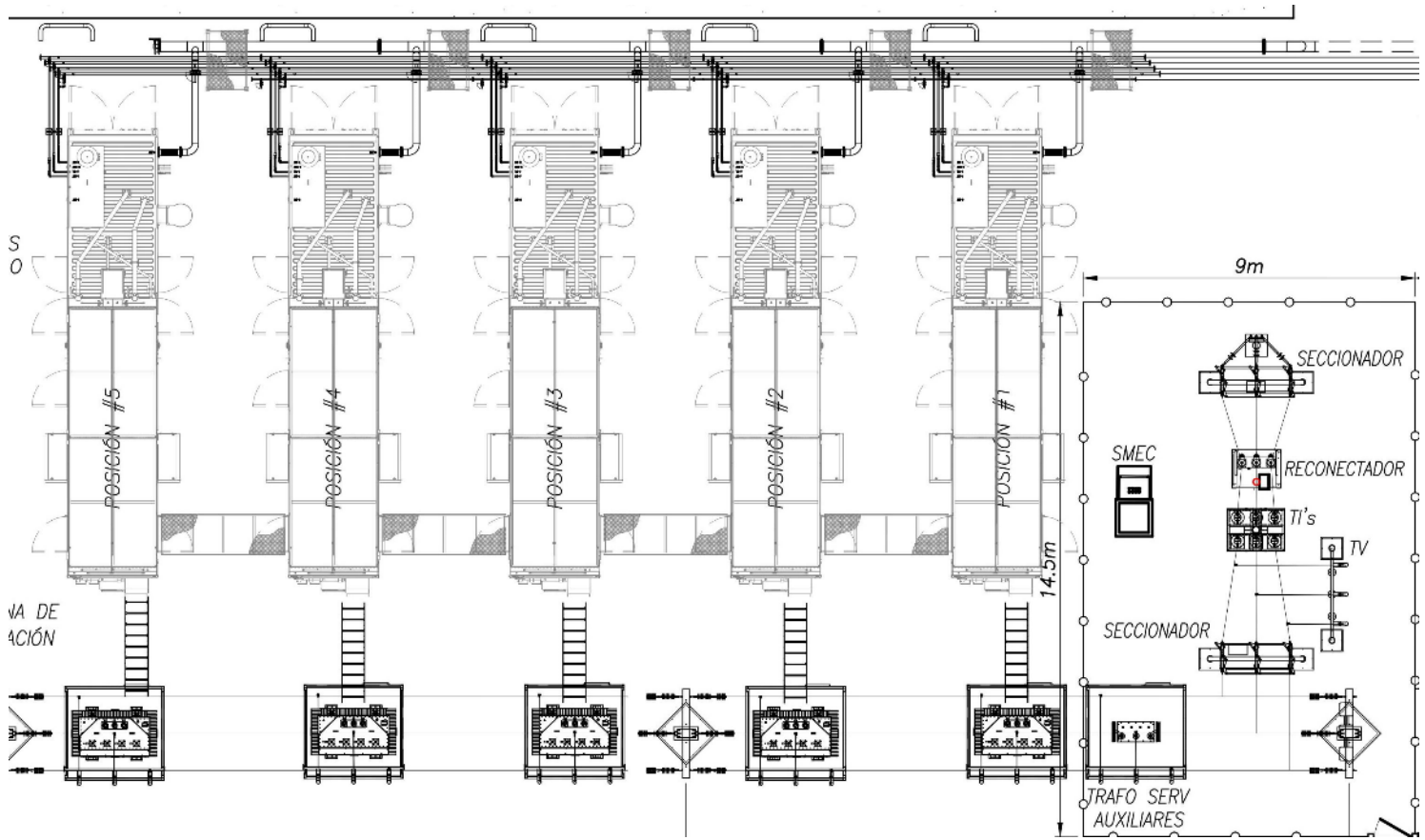
Consumos auxiliares (sopladores, tratamiento, enfriamiento) restan cerca de 5–8 % de la generación.

Motogeneradores Jembacher J420

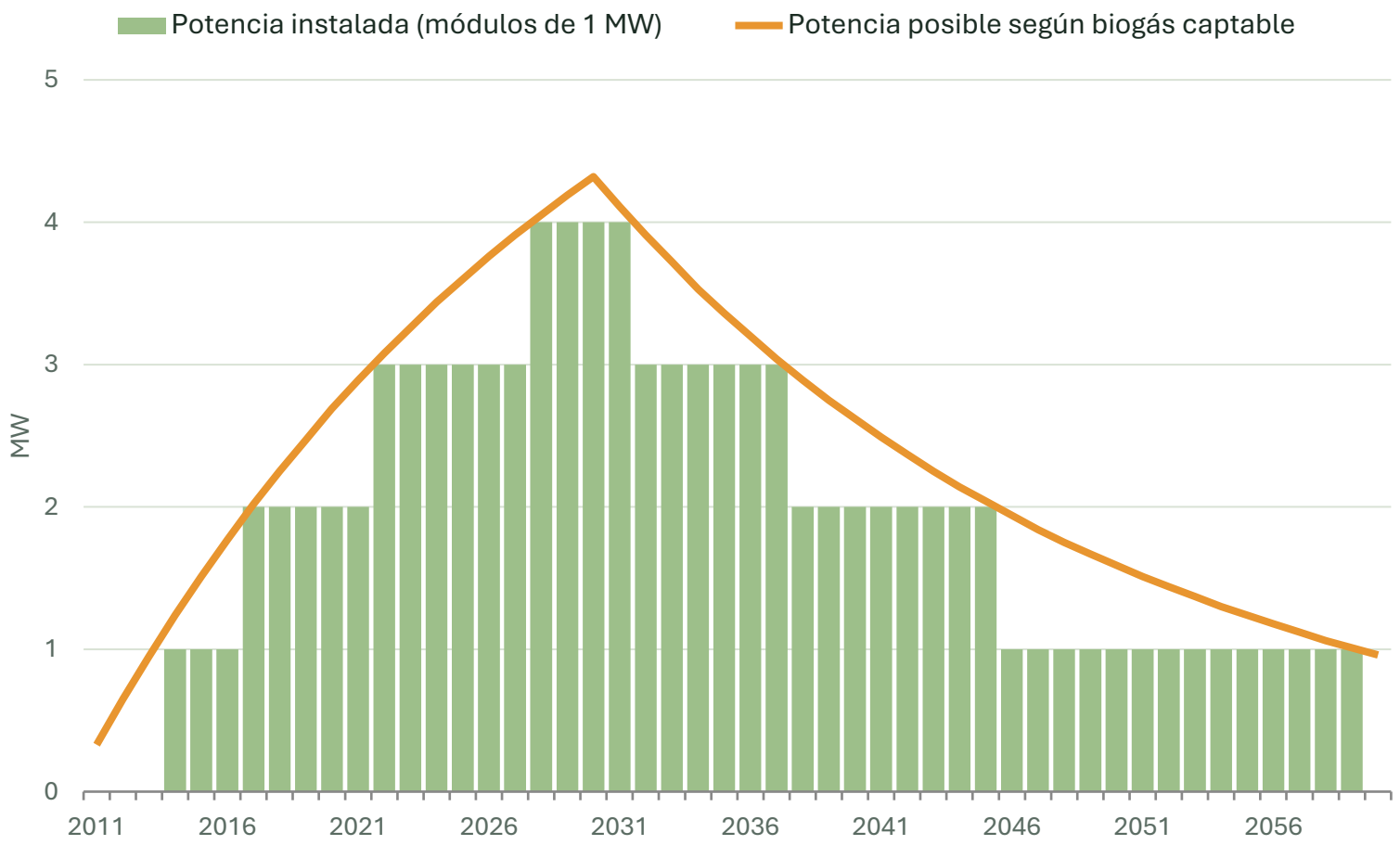








Dimensionar en módulos que sigan la curva de gas



Instalar por etapas

Agregar módulos a medida que crece el caudal; no dimensionar al pico teórico.

Módulos trasladables

Cuando la curva decae, reubicar motores en otro sitio.

Antorcha para excedentes

Quema el gas que supera la capacidad instalada.

Contrato de venta

Alinear el PPA (Power Purchase Agreement) Contrato de Compraventa de energía, con la producción realmente esperada.

Aspectos clave: del sitio a la estimación

Relleno sanitario

- Cobertura diaria e intermedia efectiva
- Compactación y espesor de celdas controlados
- Gestión de lixiviados para evitar pozos inundados
- Registro confiable de toneladas ingresadas

Formación de biogás

- Humedad adecuada en la masa de residuos
- Caracterización real de la fracción orgánica
- Evitar ingreso de aire al relleno
- Considerar el retardo hasta la fase metanogénica

LandGEM

- Datos de ingreso históricos verificados
- k y L_0 ajustados al clima y residuo local
- Eficiencia de captación realista
- Calibración con pruebas de bombeo

Aspectos clave: de la planta al negocio

Acondicionamiento

- Caracterizar H_2S y siloxanos antes de diseñar
- Drenaje de condensado en toda la red
- Monitoreo y recambio de medios filtrantes
- Balanceo periódico de pozos: CH_4, O_2 y presión

Generación eléctrica

- Módulos dimensionados a la curva, no al pico
- Mantenimiento preventivo y análisis de aceite
- Interconexión eléctrica factible y temprana
- Repuestos y servicio técnico local

Proyecto y negocio

- Permisos ambientales y marco regulatorio
- Contrato de venta de energía (PPA o tarifa)
- Ingresos por créditos de carbono
- Coordinación entre operador del relleno y de la planta

Riesgos típicos y cómo mitigarlos

Riesgo	Consecuencia	Mitigación
Sobreestimación del modelo	Motores subutilizados, menor ingreso	Escenarios conservadores, pruebas de bombeo, instalación modular
Pozos inundados por lixiviados	Caída del caudal captado	Bombeo de lixiviados en pozos y drenaje del relleno
Ingreso de aire (O_2 alto)	Incendios subterráneos, baja de CH_4	Ajuste de succión y mantenimiento de la cobertura
H_2S y siloxanos fuera de diseño	Desgaste y paradas no programadas	Caracterización periódica y tratamiento con margen
Demoras en la interconexión	Biogás quemado sin ingresos	Gestionar el acceso a la red desde el inicio
Operación desacoplada relleno–planta	Daños a la red de captación	Protocolos conjuntos de operación









Conclusiones

01 Un relleno bien operado es la base: sin cobertura ni control de lixiviados no hay biogás captable.

02 LandGEM orienta, no garantiza: calibrar k y L_0 con datos locales y mediciones de campo.

03 El acondicionamiento protege la inversión: humedad, H_2S y siloxanos definen la vida de los motores.

04 Dimensionar en módulos siguiendo la curva maximiza la utilización y el retorno.











FORO NACIONAL

DE APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE RESIDUOS





giz

FORO NACIONAL

DE APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE RESIDUOS

GRACIAS POR LA ATENCIÓN DISPENSADA

Contacto: Miguel E. Suárez
Email: msuarezlp@gmail.com msuarez@insaap.com.ar
celular: +54 9 221 591 6137

insaap
ingeniería y servicios ambientales aplicados

MINISTERIO DE PRODUCCIÓN SOSTENIBLE, MEDIO AMBIENTE Y AGUA
VICEMINISTERIO DE SEGURIDAD HÍDRICA, AGUA, SANEAMIENTO BÁSICO Y RIEGO

cooperación alemana
DEUTSCHE ZUSAMMENARBEIT

Cofinanciado por la Unión Europea

Implementada por:
giz Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH