

Estimación de emisiones y modelización del comportamiento ambiental de los gases de efecto invernadero para un relleno sanitario

Estimation of emissions and modeling of the environmental behavior of greenhouse gases for a landfill.

MSc Carlos Andrés Martínez Salcedo¹, PhD. Jacipt Alexander Ramón Valencia² PhD(c). Álvaro Orlando Pedroza Rojas³

¹ Geoenergía, Universidad Francisco de Paula Santander, Colombia, Orcid: <https://orcid.org/0009-0003-1748-9535>, Email: carlosandresmasa@ufps.edu.co

² Grupo de investigaciones Ambientales Agua, Aire y Suelo, Universidad de Pamplona, Colombia, Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2030-4904>, Email: jacipt@unipamplona.edu.co

³ Geoenergía, Universidad Francisco de Paula Santander, Colombia, Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4174-2815>, Email: alvaroorlandopr@ufps.edu.co

Cómo citar: C.A. Martínez-Salcedo, J.A. Ramón-Valencia y A. O. Pedroza-Rojas, "Estimación de emisiones y modelización del comportamiento ambiental de los gases de efecto invernadero para un relleno sanitario", *Rev. Ingenio*, Vol. 21, n°1, pp. 36-44, 2024, doi: <https://doi.org/10.22463/2011642X.4172>

Fecha de recibido: 13 de junio de 2023
Fecha aprobación: 22 de noviembre de 2023

RESUMEN

Palabras claves:

Emisión de Metano,
Gases de Efecto
Invernadero
(GEI), LANDSAT,
Mitigación Ambiental,
Modelización
Ambiental, Relleno
Sanitario, Trayectorias
de Gases.

El estudio abordó el problema de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en el Relleno Sanitario La Cortada (RSLC) de Pamplona, Norte de Santander, desde su creación en 2006, este vertedero ha recibido una cantidad significativa de residuos diariamente, contribuyendo a la liberación constante de GEI. El objetivo principal fue estimar las emisiones de GEI, comprender sus trayectorias y modelar su dispersión en el entorno. Para lograrlo, se utilizaron herramientas especializadas como LandGEM, Hysplit y Aermod, se seleccionaron imágenes satelitales del sensor OLI a bordo del satélite Landsat 8 en periodos entre agosto y octubre de los años 2016 al 2020. También se aplicó un modelo empírico de estimación de metano (CH₄ estimado), que relaciona la temperatura superficial terrestre (LST) con las concentraciones de metano medidas en campo entre 2021-2023 (CH₄ observado). Los resultados mostraron que las mediciones mediante imágenes satelitales arrojaron valores inferiores a las obtenidas en campo (0.007 mg/m³ por año, promedio anual de CH₄ Estimado) y (0.05 mg/m³ por año, promedio anual de CH₄ observado). En conclusión, el RSLC representó una fuente significativa de GEI, y este enfoque de estimación basado en imágenes satelitales y mediciones en campo validó la importancia de abordar estas emisiones para promover prácticas más sostenibles en la disposición de residuos sólidos y proteger la calidad del aire y el bienestar regional, de igual forma permite argumentar la implementación de sistemas de captura de biogás en el relleno sanitario para reducir las emisiones de metano (CH₄), y la exploración para que este recurso pueda utilizarse como fuente de energía renovable para producir calor o electricidad, lo que contribuiría a la sostenibilidad y la reducción de emisiones.

ABSTRACT

Keywords:

Methane Emissions,
Greenhouse Gases
(GHG), LANDSAT,
Environmental
Mitigation,
Environmental
Modeling, Landfill, Gas
Trajectories.

The study addressed the problem of greenhouse gas (GHG) emissions at the La Cortada Landfill (RSLC) in Pamplona, Norte de Santander. Since its creation in 2006, this landfill has received a significant amount of waste daily, contributing to the constant release of GHGs. The main objective was to estimate GHG emissions, understand their trajectories and model their dispersion in the environment. To achieve this, specialized tools such as LandGEM, Hysplit and Aermod were used, satellite images from the OLI sensor on board the Landsat 8 satellite were selected in periods between August and October from 2016 to 2020. An empirical methane estimation model was also applied. (estimated CH₄), which relates land surface temperature (LST) to methane concentrations measured in the field between 2021-2023 (observed CH₄). The results showed that measurements using satellite images gave lower values than those obtained in the field (0.007 mg/m³ per year, annual average of Estimated CH₄) and (0.05 mg/m³ per year, annual average of observed CH₄). In conclusion, The RSLC represented a significant source of GHGs, and this estimation approach based on satellite imagery and field measurements validated the importance of addressing these emissions to promote more sustainable solid waste disposal practices and protect air quality and regional well-being. , likewise allows arguing the implementation of biogas capture systems in the landfill to reduce methane (CH₄) emissions, and the exploration so that this resource can be used as a source of renewable energy to produce heat or electricity, which would contribute to sustainability and emissions reduction.

Autor para correspondencia

Correo electrónico: carlosandresmasa@ufps.edu.co (Carlos Andrés Martínez Salcedo)



La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña
Artículo bajo la licencia CC BY-NC (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es>)

1. Introducción

Pese a los esfuerzos concertados a nivel internacional para hacer frente al cambio climático, los desafíos persisten y, en muchos aspectos, se intensifican. El calentamiento global continúa aumentando, y los niveles de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera continúan aumentando a un ritmo alarmante, esto no solo amenaza el equilibrio ambiental de nuestro planeta, sino que también tiene profundos impactos en la economía, la salud y la seguridad de las comunidades de todo el mundo. En Colombia se recolecta y dispone en rellenos sanitarios 26.975 toneladas diarias de residuos sólidos domiciliarios Bogotá es la ciudad donde más se produce residuos, cerca de 6.300 toneladas/día, seguido del departamento de Antioquia (3.260 ton/día), Valle del Cauca (3.072 ton/día) y Atlántico (1.907 ton/día), en cuanto a emisiones el sector residuos contribuye con el 6% para alcanzar la meta de reducción del 20% de emisiones en 2030 en el marco del cambio climático [1], con especial atención del metano que es un gas con una alta capacidad para retener el calor en la atmósfera.

La generación de estos gases depende de factores como la edad de los residuos y las condiciones climáticas locales [2].

El progreso de la sociedad y la resolución de desafíos globales dependen en gran medida de la investigación científica y la acumulación de conocimiento, en este contexto, es esencial comprender las relaciones entre los diversos componentes, elementos, temas y aspectos relacionados con la gestión de residuos sólidos, la mitigación del cambio climático y la preservación del medio ambiente, en la investigación se propone explorar estas relaciones y abordar aspectos críticos en estas áreas a través de una revisión del estado del arte y una investigación propia.

El estado del arte proporciona una visión panorámica de investigaciones previas que han abordado cuestiones clave en estos campos. Entre los estudios relevantes se encuentran las investigaciones de Colomer (2017) en donde presentan una comparación entre diversos modelos matemáticos para la estimación de biogás del relleno sanitario de HASAR, en el estado de Jalisco (México), los resultados de estos modelos lo contrastaron con los datos obtenidos entre 2009 y 2011 en términos de generación de biogás. Entre los modelos comparados, se encuentra el LandGEM, con el que concluyeron que este modelo sobreestima la generación de gases [3], por su parte Vega (2019) [4], realizó la estimación de las emisiones de GEI y sus trayectorias en grandes incendios forestales en Cataluña, España, presentando la estimación de GEI generados en incendios forestales durante los últimos 10 años en Cataluña, España, donde también se determinaron las trayectorias de las columnas de humo

mediante el uso del programa HYSPLIT, mostrando que fueron desplazadas a grandes distancias.

Tello (2019), sobre la evaluación de emisiones de gas metano en rellenos sanitarios en Colombia, las estrategias ambientales implementadas en campus universitarios en el estudio de los autores [2], y la caracterización geotécnica del subsuelo del Relleno sanitario Regional de La Cortada en Pamplona, Norte de Santander, como lo abordó Sánchez (2023) [6], también se destaca el trabajo de Sofan (2022), que se enfoca en la estimación de energía a partir de biogás de relleno sanitario [7], y la evaluación del potencial de producción de gas metano en el relleno sanitario de residuos sólidos de la mancomunidad Patate-Pelileo en Ecuador [8], además, se considera el proyecto de grado desarrollado por Ballesteros (2021) para la detección de azufre de hidrógeno como contaminante y el estudio de Vergara sobre la influencia del cambio climático en la subcuenca del río Chagres en Panamá [9] [10].

La importancia de esta revisión del estado del arte radica en que estos estudios previos contribuyen significativamente a la comprensión de los desafíos ambientales y ofrecen un conocimiento valioso que guía el desarrollo de la investigación propia, se han abordado cuestiones fundamentales como la evaluación de emisiones de gases de efecto invernadero en rellenos sanitarios, la implementación de estrategias ambientales en instituciones educativas, la caracterización geotécnica del subsuelo, la generación de energía a partir del biogás, la calidad del aire en áreas cercanas a rellenos sanitarios y la influencia del cambio climático en cuencas fluviales.

La importancia de estudiar estos componentes radica en su impacto directo en la sostenibilidad ambiental, la gestión de residuos sólidos y la mitigación del cambio climático. Los hallazgos de estos estudios previos resaltan la necesidad de abordar estas cuestiones de manera efectiva para promover un desarrollo sostenible y el bienestar humano [17].

Teniendo como objetivo general construir sobre esta base sólida de conocimiento y comprender aún mejor las relaciones entre estos componentes, elementos, temas y aspectos. Se propone estimar las emisiones y modelar el comportamiento ambiental de los gases de efecto invernadero en un relleno sanitario, con el fin de contribuir al manejo adecuado de residuos sólidos y la planificación de futuras ampliaciones o modificaciones de rellenos sanitarios. Con el respaldo de investigaciones sólidas y recientes, esta investigación se sitúa en la vanguardia de la lucha contra el cambio climático y la promoción de prácticas sostenibles en la gestión de residuos sólidos [15].

En los últimos años las investigaciones acerca de las emisiones contaminantes originadas en la operación de sistema de combustión y las regulaciones ambientales han ido incrementándose, lo cual ha motivado el desarrollo de equipos que operen con combustibles de fuentes fósiles y con fuentes renovables. Estas mezclas de combustibles permiten disminuir en gran medida las emisiones de dióxido de carbono (uno de los gases responsables del efecto invernadero) a la atmósfera gracias a la presencia de combustibles como el hidrógeno (H₂) y gas de síntesis [18].

2. Materiales y Métodos

El Relleno Sanitario Regional La Cortada, ubicado en la vereda Chichira al noreste de la carretera Pamplona-Chitagá, tiene coordenadas geográficas en el rango Norte 1.307.000 y 1.308.000 y Este 1.159.000 y 1.160.000, con una altitud promedio de 2.375 metros sobre el nivel del mar (msnm) (Sánchez et al., 2020).



Figura 1. Ubicación Area de Estudio

Clasificado como categoría I según el Decreto 1784 de 2017 [11], es fundamental para la gestión de residuos sólidos en varias localidades y municipios, beneficiando a más de 114.000 habitantes. Se proyecta su operatividad hasta 2034, lo que lo convierte en un punto crucial para la evaluación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

La ubicación estratégica del relleno se relaciona con las condiciones meteorológicas locales, como temperatura, humedad, precipitación y horas de sol, que afectan la temperatura y nubosidad, elementos esenciales para el procesamiento de imágenes satelitales. Por tanto, los meses de agosto a octubre se eligieron como período favorable para el estudio.

Aunque el día solar local tiene varios parámetros importantes en el día, y que además detalla el caso de un punto en un valle rodeado de montañas, en el cual la irradiación solar no llega a ese punto sino después del ángulo de inclinación mínimo inicial y se oculta la radiación, tal como se presume ocurre en el área de estudio por su posición geográfica. [19]

Se utilizó un dispositivo GPS Garmin 64s (Margen de error para la ubicación exacta, tiene una precisión de +/- 12 pies (+/- 4 metros) [16] para datos georreferenciados que se corrigieron y superpusieron mediante obtener el software Magna Sirgas V 5.1 para delimitar la zona de estudio en las imágenes satelitales. Además, se empleó un archivo en formato kml basado en el plano topográfico disponible en la entrada del relleno sanitario.

En la modelación de trayectorias y concentraciones de GEI, se adoptaron períodos de tiempo homólogos por año y se utilizó el método de dispersión para lograr correlaciones precisas entre la concentración de GEI y la trayectoria y dispersión de contaminantes del Relleno Sanitario La Cortada.

Es importante destacar que, tanto las mediciones in situ como las estimaciones de imágenes satelitales, se reportaron originalmente en partes por millón (ppm), convirtiéndolo en gramos por metro cúbico (g/m³) para una mayor coherencia y utilidad en esta investigación.

2.1. Diseño experimental y análisis estadístico

La investigación se concentra en la determinación de las emisiones, trayectorias y el comportamiento ambiental de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) que se originan en el relleno sanitario La Cortada, situado en la localidad de Pamplona, en el departamento de Norte de Santander, Colombia.

Con el propósito de abordar este desafío de manera integral, se recurrirá a la utilización de tres modelos reconocidos a nivel global: LandGEM, Hysplit y el procesamiento y análisis de imágenes LANDSAT-8. El diseño metodológico se encuentra estructurado en cuatro etapas cruciales.

En la primera etapa, se procederá a la caracterización del relleno sanitario, con el objetivo de comprender sus particularidades y funcionamiento, a continuación, en la segunda fase, se estimarán las emisiones de GEI, poniendo un énfasis especial en el gas metano (CH₄), considerando aspectos como la composición de los residuos y la edad de estos, alineándose con las investigaciones previas de Tello et al., (2019) en rellenos sanitarios, lo anterior permitirá establecer una línea base para la investigación.

En la tercera etapa, se llevará a cabo la modelación de trayectorias de los GEI. Se empleará el modelo Hysplit para evaluar la dispersión y transporte de los contaminantes emitidos, considerando las condiciones meteorológicas locales, siguiendo ejemplos de trabajos similares realizados en zonas de estudio relevantes [5][9].

Finalmente, en la cuarta fase, se abordará el procesamiento y análisis de imágenes LANDSAT-8. Esta etapa permitirá la evaluación de la relación entre las condiciones ambientales, como la temperatura superficial y la cobertura del suelo, y la concentración de GEI en la zona de estudio, siguiendo el enfoque de Vergara, la combinación de estos modelos y enfoques permitirá una comprensión holística de las emisiones y el comportamiento de los GEI en el relleno sanitario La Cortada, contribuyendo a la gestión adecuada de los residuos sólidos y brindando información relevante para la planificación de futuras acciones y modificaciones en este sitio [6].

La combinación de estos modelos proporciona una comprensión completa de las emisiones y el comportamiento de los GEI en La Cortada, informando la gestión de residuos y futuras acciones, en la Figura 1, se presentan las etapas de la metodología.

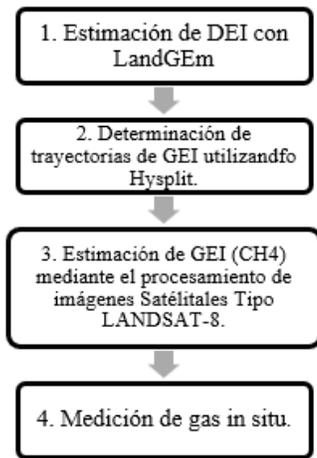


Figura 2. Etapas de la Metodología.

Para el análisis de trayectorias y concentraciones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en el relleno sanitario, se abordará un período de dos años, desde el 21 de agosto de 2019 al 21 de agosto de 2021, para capturar variaciones temporales y estacionales en las trayectorias de GEI. Las trayectorias se evaluarán cuatro veces al día (00:00, 06:00, 12:00 y 18:00) con un análisis de 6 horas para considerar las fluctuaciones diurnas, nocturnas y condiciones climáticas cambiantes que afectan la dispersión de contaminantes, lo anterior se enfocará en el metano (CH4) como GEI principal debido a su compresión con factores evaluables mediante imágenes LANDSAT-7 y LANDSAT-8.

El método de Avdan y Jovanovska (2016) se utilizará para relacionar la temperatura superficial (Land Surface Temperature, LST) con la concentración de metano y comprender las condiciones ambientales que influyen en la dispersión de GEI en la zona de estudio. En la Tabla 1, se presenta el Desarrollo Matemático para el cálculo de LST.

Tabla 1. Desarrollo Matemático para el cálculo de LST.

| Factor | Modelo Matemático Propuesto | Desarrollo para SIG |
|---|--|---|
| TOA (Top of Atmospheric) radiancia espectral. | $L\lambda = M_L * Q_{cal} + A_L - O_i$ | TOA = 0.0003342 * "Band 10" + 0. |
| BT Brightness Temperature (Temperatura de brillo) | $BT = \frac{K_2}{\ln[(K_1/L\lambda) + 1]} - 273.15$ | BT = (1321.0789 / Ln ((774.8853 / " %TOA%" + 1))) 273.15 |
| Normal Difference Vegetation Index (NDVI) | $NDVI = \frac{NIR(\text{band } 5) - R(\text{band } 4)}{NIR(\text{band } 5) + R(\text{band } 4)}$ | NDVI = (Banda 5 - Banda 4) / (Banda 5 + Banda 4) |
| Proportion of Vegetation P_v | $P_v = \left(\frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \right)^2$ | Pv= Square ((NDVI - NDVI _s) / (NDVI _v - NDVI _s)) |
| Land Surface Emissivity, ϵ (Emissividad) | $\epsilon_\lambda = \epsilon_{v\lambda} P_v + \epsilon_{s\lambda} (1 - P_v) + C_\lambda$ | $\epsilon = 0.004 * Pv + 0.986$ |
| Land Surface Temperature (LST) | $T_s = \frac{BT}{\{1 + [(\lambda BT / \rho) \ln \epsilon_\lambda]\}}$ | LST = (BT / (1 + (0.00115 * BT / 1.4388) * Ln(ϵ))) |

Nota. Tomado y modificado de [14].

Por su parte, para la aplicación del modelo empírico de estimación de CH4 propuesto por (Cortez.2013) y Agarwal y Garg (2009), en la tabla 2 se presentan los ajustes para el desarrollo del modelo matemático:

Tabla 2. Desarrollo Matemático para el Desarrollo de la Emisión de CH4.

| Factor | Modelo Matemático Propuesto | Desarrollo para SIG |
|--------------------------------|---|---|
| Ft, factor de temperatura | $F(Ts) = \frac{e^{0.334(TLS-23)}}{1 + e^{0.334(TLS-23)}}$ | (Power (2.71828182845,0.334 * ("LST.TIF" -23))) / (1 + Power (2.71828182845,0.334 * ("LST.TIF" -23))) |
| E_{CH4} Estimación de Metano | $E_{CH4} = E_{obs} * Ft * A$ | Ft * 0.0093 |

Nota. Tomado y modificado de [12] [13].

En la última etapa, se midieron los gases del relleno La Cortada con un Multidetector de Gas, modelo Ibrid MX6 de Industrial Scientific, dispositivo de última generación que cumple con las regulaciones y garantiza precisión y confiabilidad, fortaleciendo la calidad de los resultados.

3. Resultados

3.1. Estimación de GEI con LandGEM

Los resultados obtenidos en el estudio pusieron de manifiesto que el relleno sanitario de La Cortada emite una cantidad significativa de Gases de Efecto Invernadero (GEI), destacando especialmente la presencia de metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) en sus emisiones.

Estas emisiones no son constantes, sino que varían a lo largo del tiempo y están sujetas a múltiples factores que influyen en su magnitud, entre estos factores, se destacan la composición de los residuos depositados en el relleno sanitario, las condiciones meteorológicas locales y las prácticas de gestión de residuos implementadas en el lugar.

El análisis reveló que se esperan picos de emisión de GEI hacia el año 2035, con cifras significativas. En concreto, se proyecta que las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) alcanzarán valores en el orden de 6x10⁵ metros cúbicos por año, mientras que las emisiones de metano (CH₄) podrían ascender a alrededor de 1,20x10⁶ metros cúbicos anuales.

Estos valores son indicativos de la relevancia de abordar la gestión de GEI en el relleno sanitario La Cortada, con el propósito de mitigar su impacto y promover prácticas ambientales más sostenibles en la disposición de residuos sólidos, en la figura 2, se representan los resultados de las estimaciones por medio de LanGEM.

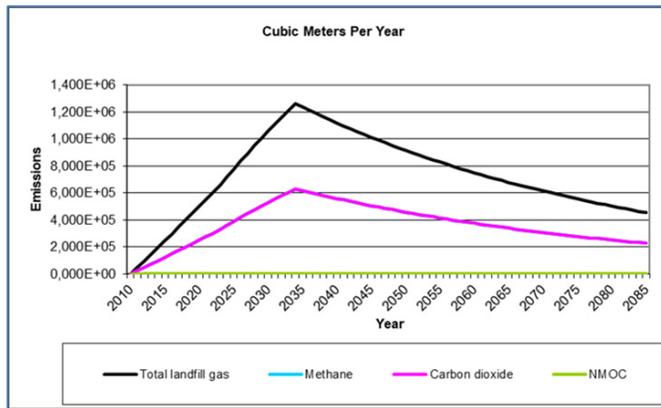


Figura 3. Resultados Estimación con LandGEM.

El modelado de trayectorias, realizado en agosto de 2019, 2020 y 2021 con mediciones en cuatro intervalos diarios a 50 metros de altura, ofreció información valiosa sobre la dispersión de contaminantes del Relleno La Cortada. La salida gráfica se integró con éxito en el Sistema de Información Geográfica (SIG) del proyecto, brindando una representación geoespacial detallada de los contaminantes, incluyendo concentraciones y trayectorias.

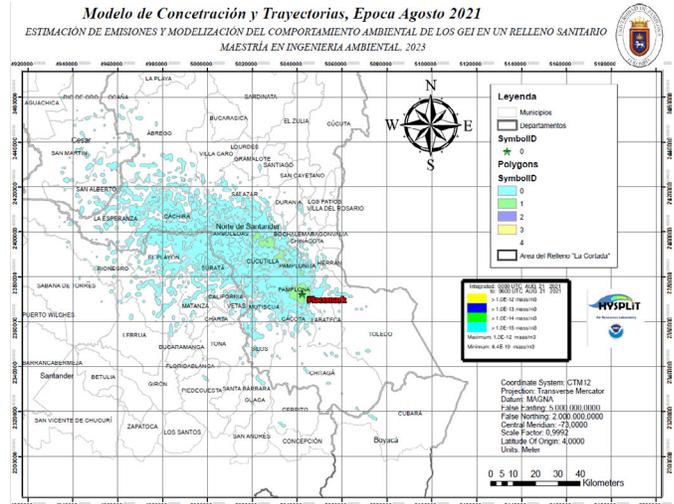


Figura 4. Salida Gráfica Trayectorias y Concentración de contaminates

Las trayectorias principales apuntan hacia el noroeste (NW), impactando principalmente a Pamplona. Otros municipios como Pamplonita, Cucutilla, Chinácota, Bochalema y Arboledas también muestran rastros de contaminantes, aunque con concentraciones menores, estos resultados subrayan la importancia de comprender la dinámica de los contaminantes y la necesidad de gestionar y mitigar los GEI para proteger la calidad del aire y el bienestar regional.

3.2. Estimación de Metano mediante el procesamiento de imágenes satelitales LANDSAT

Land Surface Temperature (LST), específicamente, se emplea el método propuesto por [10], el cual presenta un algoritmo eficiente para llevar a cabo el mapeo automatizado de la temperatura superficial de la superficie terrestre, este método se basa en la utilización de datos proporcionados por el satélite LANDSAT-8, la aplicación de esta técnica resulta fundamental para el análisis preciso de las condiciones ambientales y la obtención de estimaciones confiables de las emisiones de metano.

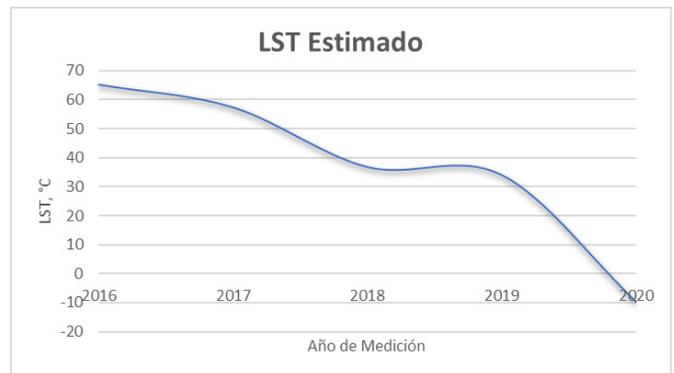


Figura 5. Resultados Cálculos LST.

La Figura. 3, presenta el promedio de Land Surface Temperature (LST) estimado para el período de 2016 a 2020, a temperaturas profundas que oscilan entre los 70°C y los -10°C. Es fundamental destacar que la temperatura superficial, o LST, difiere de la temperatura ambiente

A raíz del proceso realizado, se obtiene un mapa que refleja la temperatura de la superficie terrestre, la cual debe distinguirse de la temperatura ambiente.

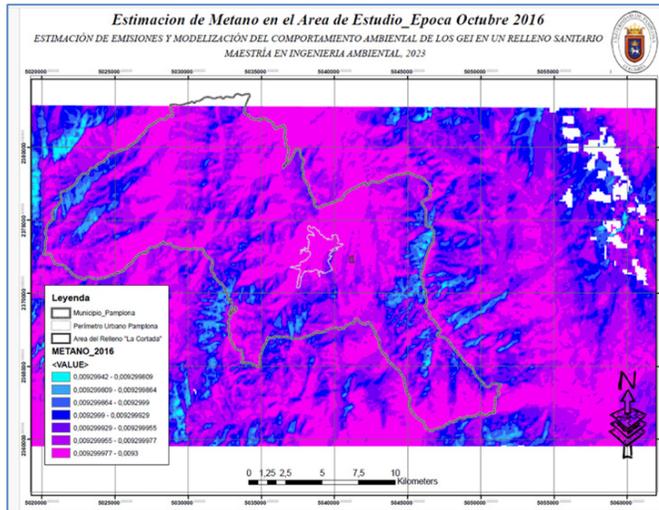


Figura 6. Mapa de Estimación de CH4.

Respecto a la estimación del metano, los resultados del análisis y procesamiento de imágenes LANDSAT8 en períodos durante 2021 al 2023 posibilitaron la estimación de las cantidades emitidas en momentos diferentes en los que se llevó a cabo la medición de metano in situ utilizando el Equipo multidetector.

La figura 5 presenta los resultados del procesamiento de la imagen LANDSAT-8 empleada para la estimación de metano en octubre de 2016, como se interpreta la leyenda para el área de estudio se tienen medidas con máximo (0.093).

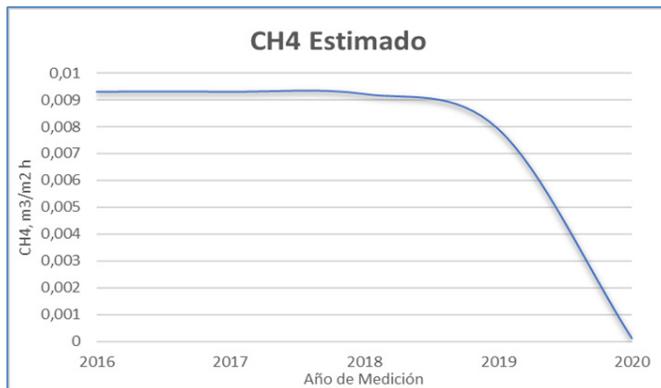


Figura 7. Análisis de CH4 estimado con LANDSAT-8

En la Figura 6, se presenta la estimación de las emisiones de metano (CH4) basada en imágenes de satélite de los sensores de Landsat 8 (ETM+) correspondientes a los años 2016 al 2020, en comparación con las mediciones in situ realizado en el Relleno Sanitario La Cortada.

Es importante destacar que, si bien la estimación con LANDSAT-8 es una medición histórica, las mediciones in situ se llevaron a cabo en momentos diferentes (2021 al 2023), el propósito de esta comparación fue obtener una referencia sobre las cantidades de metano utilizando los distintos métodos de medición, observando que las mediciones a través de imágenes satelitales muestran valores inferiores a los registrados en el campo.

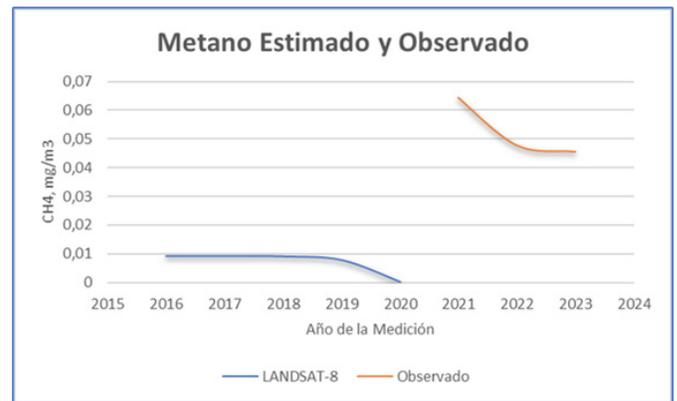


Figura 8. Metano Observado y Metano Estimado.

Como se mencionó anteriormente, las mediciones estimadas a través de imágenes satelitales exhiben valores inferiores a las mediciones en campo. La figura ilustra las tendencias de concentración de metano estimadas durante los años 2016 al 2020 (metano estimado) en comparación con los valores observados para 2021 al 2023 (metano observado).

3.3. Calculadora Inventario de Emisiones para Rellenos Sanitarios

En el marco de este proceso de investigación y en consonancia con los objetivos establecidos, se ha desarrollado una herramienta computacional integral tipo software de uso libre. Esta herramienta consta de una calculadora de inventario de emisiones diseñada específicamente para rellenos sanitarios, este software se encuentra alojado en un micrositio de Google, el cual no solo proporciona acceso a la calculadora, sino que también brinda información detallada sobre la metodología empleada para su funcionamiento, respaldada por bases teóricas sólidas, conjuntamente, esta herramienta se integra con una aplicación (APK) que se ha creado para dispositivos móviles, facilitando así el acceso a la calculadora y proporcionando una breve presentación del autor.

Esta estrategia de desarrollo y distribución de la herramienta busca ampliar su accesibilidad y utilidad al permitir que los usuarios la utilicen desde sus dispositivos móviles, lo que promueve una mayor difusión y aplicación práctica de la calculadora de inventario de emisiones para rellenos sanitarios.

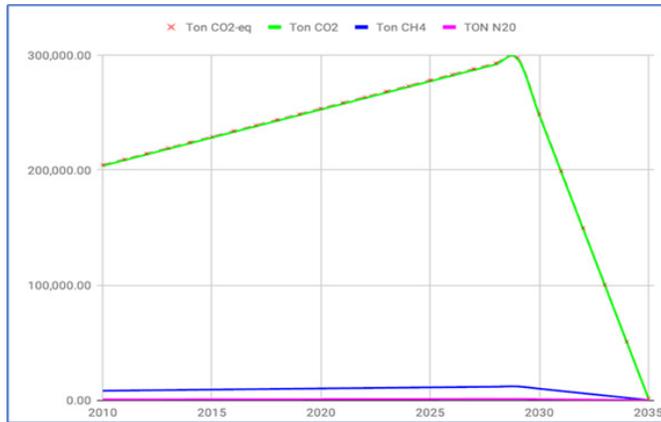


Figura 9. Calculadora de Inventario de Emisiones para rellenos sanitarios.

En conclusión, los resultados de este estudio destacan la emisión significativa de Gases de Efecto Invernadero (GEI) por parte del relleno sanitario de La Cortada, con una particular relevancia en la liberación de metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), estas emisiones no son constantes y están sujetas a una serie de factores, incluida la composición de los residuos, las condiciones meteorológicas y las prácticas de gestión de residuos implementadas en el relleno.

Por otro lado, se proyectarán picos de emisión hacia el año 2035, con valores significativos de CO₂ y CH₄. Esto subraya la necesidad de abordar la gestión de GEI en el relleno La Cortada para mitigar su impacto y promover prácticas más sostenibles en la disposición de residuos sólidos.

En conjunto, los resultados de este estudio contribuirán a comprender mejor las emisiones de GEI en el relleno La Cortada y ofrecen herramientas prácticas para abordar la gestión de estos contaminantes, promoviendo prácticas ambientales más sostenibles y protegiendo la calidad del aire y el bienestar de las comunidades circundantes.

4. Discusión

La discusión del estudio confirma que el relleno sanitario La Cortada representaba una fuente significativa de generación de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en la región, el análisis empleado las herramientas LandGem y Hysplit permitió establecer un modelo de trayectorias que señalaba una dirección principal hacia el noroeste (NW), con un alcance que llegaba a departamentos cercanos, como Cesar, Santander, Boyacá y Arauca, aunque con concentraciones

menores, en contraste, los municipios de Pamplona, Pamplonita y Cucutilla mostraron las concentraciones más elevadas de contaminantes.

Como se muestra en la Figura 8, para la estimación de metano, se llevó a cabo una comparación exhaustiva entre los resultados obtenidos mediante el modelo propuesto por Agarwal y Garg y las mediciones in situ realizadas con un equipo de medición de gases en el sitio, pese a que se observara una tendencia a la sobreestimación de los valores de metano en las imágenes de satélite en comparación con las mediciones en campo, que arrojaron valores superiores al promedio estimado, este estudio sentó un valioso precedente para continuar perfeccionando los sistemas de monitoreo continuo de emisiones en los rellenos sanitarios del país [2].

Los resultados y productos derivados de este estudio lograron cumplir con el objetivo fundamental de validar un enfoque distinto para la estimación de GEI que permita establecer correlaciones efectivas con el trabajo de campo y mantuviera un nivel de precisión, al poner a prueba la hipótesis de que las imágenes satelitales desempeñan un papel relevante en la monitorización atmosférica a través del cálculo de diversas variables, se allanó el camino para su aplicación en el seguimiento de otros contaminantes presentes en la atmósfera.

En particular, y como se detalla en a figura 9 los valores obtenidos mediante la calculadora de emisiones y su aplicación al caso del relleno sanitario se mantuvieron en consonancia con los resultados derivados de los análisis realizados con LandGEM y el procesamiento de imágenes satelitales de tipo LANDSAT-8, este hallazgo proporciona una sólida validación a los modelos de estimación propuestos en el estudio.

5. Conclusión

Los resultados del estudio confirman que el relleno sanitario La Cortada es una fuente significativa de generación de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en la región. El análisis, realizado mediante las herramientas LandGem y Hysplit, ha permitido establecer un modelo de trayectorias con una dirección principal hacia el noroeste (NW), con alcance a departamentos cercanos, como Cesar, Santander, Boyacá y Arauca, aunque con concentraciones menores.

En contraste, los municipios de Pamplona, Pamplonita y Cucutilla muestran las concentraciones más elevadas de contaminantes, Ver concentraciones en color verde (según la leyenda) en la figura 4, para la estimación de metano, se realizó una comparación exhaustiva entre los resultados obtenidos mediante el modelo propuesto por Agarwal y Garg y las mediciones in situ realizadas con un equipo de medición de gases en el sitio.

Pese a que se observará una tendencia a la sobreestimación de los valores de metano en las imágenes de satélite, con respecto a las mediciones en campo que arrojaron valores superiores al promedio estimado, este estudio sienta un valioso precedente para continuar perfeccionando los sistemas de monitoreo continuo de emisiones en los rellenos sanitarios del país.

Los resultados y productos derivados de este estudio lograron cumplir con el objetivo fundamental de validar un enfoque distinto para la estimación de GEI que permita establecer correlaciones efectivas con el trabajo de campo, a la vez que mantuviera un nivel de precisión.

Al poner a prueba la hipótesis de que las imágenes satelitales desempeñan un papel relevante en la monitorización atmosférica a través del cálculo de diversas variables, se allana el camino para su aplicación en el seguimiento de otros contaminantes presentes en la atmósfera.

En particular, los valores obtenidos mediante la calculadora de emisiones y su aplicación al caso del relleno sanitario “La Cortada” se mantuvieron en consonancia con los resultados derivados de los análisis realizados con LandGEM y el procesamiento de imágenes satelitales de tipo LANDSAT-8, este hallazgo brinda una validación sólida a los modelos de estimación propuestos en el estudio.

En este proyecto, se emplearon imágenes térmicas provenientes de los sensores ETM+ y TIRS de los satélites Landsat 8 para el cálculo de las variables que facilitan la estimación de emisiones de metano, gracias a su alta resolución espacial de 900 m².

Se encontraron que las estimaciones de metano utilizando este tipo de imágenes, particularmente durante los períodos de agosto a octubre de los años 2016 a 2020, mostraron una clasificación más sólida con los datos recolectados en campo, no obstante, se abre la puerta a futuras mejoras mediante la inclusión de nuevas variables en el modelo, como elevación, pendiente y aspecto.

6. Agradecimientos

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a la Universidad Francisco de Paula Santander-Ocaña (UFPSO) por brindarnos la oportunidad de publicar nuestra investigación. Agradecemos a la Universidad de Pamplona por sus instalaciones y recursos que hicieron posible esta investigación, al igual que reconocemos el apoyo de nuestros compañeros por su colaboración, a la Universidad Francisco de Paula Santander (UFPS) por ser siempre nuestra Alma matter, ¡Egresado, Maestro, Estudiante loemos a la Universidad!

Agradecemos a nuestras familias por su apoyo

inquebrantable a lo largo de nuestras carreras académicas, este logro les pertenece con gratitud.

7. Referencias bibliográficas

- [1] DNP, D. D. P. (2016). Rellenos sanitarios de 321 municipios colapsarán en cinco años, advierte el DNP.
- [2] Tello, D., Peña, K., Hernández, F. “Estimation of methane (CH₄) emission in the Presidente landfill through satellite images”. *Revista de Topografía Azimut*, (11), pp: 11-17. 2019. <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/azimut/article/view/15654/15698>
- [3] Colomer, F.; García, F.; Altabella, J.; Robles, F. y Aranda, G. (2017). Emisiones gaseosas de un relleno sanitario en México. Comparación con modelos de generación de biogás. *Revista Internacional de Contaminación Medioambiental* 32, 113a122. <http://dx.doi.org/10.20937/RICA.2016.32.05.08>
- [4] Vega C. (2019). Estimation of GHG emissions and their trajectories in large forest fires in Catalonia, Spain. *Instituto de Ecología A.C. Madera y bosques*, vol. 25, No. 2, E2521764, 2019 <https://www.redalyc.org/jatsRepo/617/61762610002/html/index.html>
- [5] Ortega, J., Becerra, D., Barajas, F., Ramírez, L. y Sanguino, P. “La gestión ambiental y su impacto en el desarrollo de las actividades productivas”. San José de Cúcuta, Norte de Santander, Colombia: Programa de Ingeniería Ambiental. 2018. <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://ww2.ufps.edu.co/public/archivos/pdf/2c733eaa97e54198fb591e215fecaf1f.pdf>
- [6] Sánchez, J., Contreras, M., & Torres, J. Geotechnical characterization of the subsoil in the regional landfill la “Cortada”, Pamplona (Norte de Santander) from geophysical data. *Colombian Journal of Advanced Technologies*, 9-17. 2020. doi: <https://doi.org/10.24054/16927257.v36.n36.2020.3991>
- [7] Sofán, S., Ruíz, A., Arrieta, J. y Doria, M. (2023). “Evaluación energética de la formación de biogás obtenido a partir de residuos sólidos municipales procedentes del relleno sanitario utilizando el modelo LandGEM” *Investigación e Innovación en Ingeniería*, 11(2), 16-27. 2023 <https://revistas.unisimon.edu.co/index.php/innovacion/article/view/6373>
- [8] Ambuludi, R. y Carvajal, V. (2022). “Estimación de gas metano utilizando el modelo LandGEM del relleno sanitario de residuos sólidos municipales Patate-Pelileo, Tungurahua, Ecuador”. *Revista Tecnología*, 35(1), 67-78. 2022 https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0379-39822022000100067
- [9] Vergara, K. “Estimación de la respuesta hidrológica de la subcuenca del río Chagres bajo diversos escenarios

- de cambio climático mediante la implementación de la herramienta HYDRO-BID”. República de Panamá: Universidad de Panamá. 2023. <http://up-rid.up.ac.pa/6557/>
- [10] Ballesteros, F. “Implementación de una red de sensores inalámbricos para el monitoreo de la calidad del aire. Universidad Autónoma de Bucaramanga: Bucaramanga” 2023. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgglefindmkaj/https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/14337/2021_Tesis_Fabian_Ballesteros.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [11] Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. “Decreto 1784”. 2017. <https://dapre.presidencia.gov.co/normativa/normativa/DECRETO%201784%20DON%2002%20DE%20NOVEMBER%20DE%202017.pdf>
- [12] Castro, G. “Metodología para determinar la cantidad de material particulado en la capa de la troposfera a partir de la teledetección. Área de estudio: Valle de Aburrá, Antioquia, para el año 2016”. 2019. Universidad Católica de Manizales: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgglefindmkaj/file:///C:/Users/luval/Downloads/Geraldine%20Castro%20Coca%20(1).pdf
- [13] Avdan, U. y Jovanovska, G. “Algoritmo para mapeo automatizado de la temperatura de la superficie terrestre utilizando datos del satélite LANDSAT 8”. Revista de sensores, 2016, 1-8.
- [14] Cortez, J. “Estimación de emisiones de metano del Relleno Sanitario Bordo Poniente por medio de imágenes de satélite (Doctoral dissertation, Tesis de maestría)”. Ciudad de México, Instituto Politécnico Nacional) 2013.
- [15] Centro de Objetivos de Desarrollo Sostenible para América Latina [CODS] “Lo que Colombia necesita para reducir sus emisiones en un 51% para 2030” 2021 <https://cods.uniandes.edu.co/lo-que-necesita-colombia-para-reducir-sus-emisiones-en-un-51-para-el-ano-2030/>
- [16] Triveño, R. N. C. (2016). PRECISIÓN DE LOS GPS NAVEGADOR. El Antoniano, 131(1), 109-113.
- [17] Corponor. “Resolución N.0026” 2021. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgglefindmkaj/<https://corponor.gov.co/web/wp-content/uploads/2021/01/RESOLUCIO%CC%81N-0026-DE-19-JANUARY-2021.pdf>
- [18] A. J. Cardona-Vargas, C. Echeverri-Urbe, J. Zapata-López, J. Jaramillo-Álvarez, C. Arrieta-González, y A. Amell-Arrieta, “Cálculo de propiedades de combustión y análisis de estabilidad de llama para el gas límite 65%CH₄ + 35%H₂”, Rev. Ingenio, vol. 17, n.º 1, pp. 1–8, ene. 2020, doi: <https://doi.org/10.22463/2011642X.2328>
- [19] J. E. Salinas-Carrillo, O. L. Pérez-Castañeda, B. J. Arango-Perdomo, y E. López-Sánchez, “Una propuesta de cálculo de día solar local”, Rev. Ingenio, vol. 19, n.º 1, pp. 45–51, ene. 2022, doi: <https://doi.org/10.22463/2011642X.3241>