



**Implementación de una medida de control ambiental para el proceso de combustión interna
en el morro de Moravia del municipio de Medellín, Antioquia**

Carlos Andrés Dávila Castillo

Maestría en Ingeniería Ambiental

director

Carlos Alberto Peláez Jaramillo, PhD.

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería Ambiental

Medellín, Antioquia, Colombia

2024

Cita	Dávila Castillo [1]
Referencia Estilo IEEE (2020)	[1] Dávila Castillo, “Implementación de una medida de control ambiental para el proceso de combustión interna en el Morro de Moravia del municipio de Medellín, Antioquia”, Tesis de maestría, Maestría en Ingeniería Ambiental, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2024.



Maestría en Ingeniería Ambiental.

Grupo de Investigación Interdisciplinario de Estudios Moleculares (GIEM).



Biblioteca Carlos Gaviria Díaz

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Agradecimientos

Al Grupo Interdisciplinario de Estudios Moleculares (GIEM)

Al director del grupo GIEM (PhD. Carlos Alberto Peláez Jaramillo) y a los integrantes del grupo de investigación que aportaron conceptos técnicos en el desarrollo de este proceso

A la Alcaldía de Medellín por medio de la secretaria de Medio Ambiente por todo el apoyo brindado, por los espacios y materiales suministrados.

Al grupo de Jardineros Comunitarios de Moravia por su gran apoyo en las labores realizadas en campo, en el montaje de la investigación y en la medición de variables.

A la Universidad de Antioquia por los espacios, el acompañamiento y la asesoría brindada.

A mi familia por todo apoyo y soporte en todo este proceso.

A Dios que, siendo real en mi visión de la vida, sostiene, nutre y acompaña mi caminar.

TABLA DE CONTENIDO

<i>RESUMEN</i>	10
<i>ABSTRACT</i>	11
<i>1. INTRODUCCIÓN</i>	12
<i>2. OBJETIVOS</i>	17
2.1. General:	17
2.2. Específicos:.....	17
<i>3. MARCO TEÓRICO</i>	18
3.1. Generalidades sobre la gestión de residuos sólidos urbanos (GRSU).....	18
3.2. Metodologías para la planeación sustentable de residuos sólidos urbanos	23
3.3. Conceptualización del proceso de combustión.....	25
3.3.1 Relación de procesos de combustión tecnificados y residuos sólidos.	26
3.4 Procesos de combustión no tecnificada en sitios de disposición final:	35
3.4.1 Procesos de incendios	37
Incendios o procesos de combustión superficiales	39
Incendios o procesos de combustión interna	40
3.4.2 Afectaciones ambientales y a la salud en los procesos combustión no controladas en sitios de disposición final.....	40
3.5 Medidas de control en procesos de combustión en sitios de disposición final de residuos sólidos.....	43
<i>4 METODOLIGÍA</i>	45
4.4 Enfoque.....	45
4.5 Tipo de Investigación	46

4.6	Método.....	46
4.7	Área de estudio	46
4.1.1.	Localización Área de estudio.....	46
4.2.	Metodología por objetivo específico	48
4.2.1	Metodología Objetivo 1	48
4.2.2.	Metodología Objetivo 2	51
4.2.3.	Metodología objetivo 3	53
4.2.4.	Metodología objetivo 4	59
5	<i>RESULTADOS</i>	77
5.1	Resultado objetivo 1. Caracterización Proceso de Combustión	77
5.1.1	Delimitación área de estudio.....	77
5.1.2	Análisis estadístico y monitoreos en in situ de gases	81
5.1.3	Mediciones y monitoreos in situ de temperaturas.....	91
5.2	Resultado objetivo 2. Revisión bibliográfica diferentes medidas para control ambiental de los procesos de combustión interna en una masa de residuos.	92
5.3.	Resultado objetivo 3. Matriz de valoración de impacto ambiental y económico como medida de selección de la medida de manejo ambiental para el control de la combustión interna.	103
5.4.	Resultado objetivo 4. Diseño e implementación de la medida de control ambiental para el proceso de combustión interna del sitio en estudio.	106
5.4.1	Mediciones de Pendientes y Áreas	107
5.4.2	Evaluación material de cobertura.....	109
5.4.3	Diseño e Implementación de infraestructura en bioingeniería para la medida de manejo ambiental.....	110
6	<i>CONCLUSIONES</i>	122
7	<i>RECOMENDACIONES</i>	127
8	<i>BIBLIOGRAFÍA</i>	129

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Sustancias reaccionantes.....	32
Tabla 2. Rangos indicadores de incendio según concentración de CO en PPM. [34]	37
Tabla 3. Rangos indicadores de incendio según la temperatura en °C. [34].....	37
Tabla 4. Dimensiones áreas.	50
Tabla 5. Criterios de búsqueda bibliográfica.....	52
Tabla 6. Variables para la determinación del impacto	54
Tabla 7. Valoración de impactos	56
Tabla 8. Clasificación de impactos	57
Tabla 9. Puntos de monitoreos	74
Tabla 10. Dimensiones áreas.	79
Tabla 11. Resumen estadístico parámetros Morro de Moravia	81
Tabla 12. Correlaciones entre variables.....	82
Tabla 13. Modelo Log-X: $Y = a + b \cdot \ln(X)$	84
Tabla 14. Análisis de Varianza	84
Tabla 15. Modelo X-cuadrada: $Y = b \cdot X^2$	85
Tabla 16. Análisis de Varianza	85
Tabla 17. Modelo X-cuadrada: $Y = b \cdot X^2$	85
Tabla 18. Análisis de Varianza	86
Tabla 19. Modelo Raíz cuadrada-Y: $Y = (b \cdot X)^2$	86
Tabla 20. Análisis de Varianza	87
Tabla 21. Modelo X-cuadrada: $Y = b \cdot X^2$	87
Tabla 22. Análisis de Varianza	87
Tabla 23. Revisión bibliográfica de medidas de control ambiental	93
Tabla 24. Medidas de control ambiental identificadas.....	97
Tabla 25. Ventajas y desventajas medidas de control.....	101
Tabla 26. Resumen de impactos calificados.....	103
Tabla 27. Valoración económica de las medidas de control.....	105

Tabla 28. Valores de pendiente por área.....	108
---	-----

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Triangulo de la combustión en masa de residuos. [29]	29
Fig. 2. Clasificación de las reacciones según su velocidad.[29]	29
Fig. 3 Ubicación del barrio Moravia en Medellín [12].	47
Fig. 4 Ubicación Morro de Moravia en el barrio[12].	47
Fig. 5 Recorridos e inspecciones Morro Moravia	49
Fig. 6 Áreas de investigación	51
Fig. 7 Área de influencia proceso de combustión	60
Fig. 8 Medición de pendientes	62
Fig. 9 Implementación cobertura parcela 1 y 2.....	64
Fig. 10 Varillas para medir el cambio del nivel de la superficie. [12].....	65
Fig. 11 Instalación puntos de medición parcela1	66
Fig. 12 Instalación puntos de medición parcela2	66
Fig. 13 Esquema en 3D trinchos	69
Fig. 14 Adecuación e instalación de los trinchos	69
Fig. 15 Disposición material de cobertura	71
Fig. 16 Compactación manual	72
Fig. 17 Perforaciones en masa de residuos	73
Fig. 18 Instalación maguera de medición	73
Fig. 19 Mapa puntos de monitoreo	74
Fig. 20 Mediciones de gases en campo.....	76
Fig. 21 Mediciones de temperatura en °C	77
Fig. 22 Emanación de gases	78
Fig. 23 Incendios en masa de residuos.....	78
Fig. 24 Desmoronamiento de estructuras.....	78
Fig. 25 Presencia hollín.....	79
Fig. 26 Delimitación Áreas de investigación	80
Fig. 27 Modelo Ajustado.....	83
Fig. 28 Caracterización inicial CHA4 & O2.....	89

Fig. 29 Caracterización inicial CO & H ₂ S	90
Fig. 30 Mapa de temperatura	92
Fig. 31 Mapa de temperatura con transparencia	92
Fig. 32 Aislamiento zona de incendio de residuos con material impermeable. [86]	98
Fig. 33 Aislamiento de la zona de incendio con la que no presenta combustión. [86]	99
Fig. 34 Inyección de gas inerte. [38].....	100
Fig. 35 Excavación masa de residuos. [66].....	101
Fig. 36 Matriz simplificada de valoración de impactos ambientales vs medidas de control ambiental	104
Fig. 37 Valoración económica de las medidas de control ambiental.....	106
Fig. 38 Valores pendientes Morro Moravia	107
Fig. 39 Perfil de corte áreas No 2.....	108
Fig. 40 Promedio perdido de material de cobertura.....	109
Fig. 41 Vista en planta de estructura de contención	111
Fig. 42 Esquema de estructura en bioingeniería para contención área No 2	111
Fig. 43 Esquema planta de infraestructura de bioingeniería.....	112
Fig. 44 Modelo de construcción medida de manejo	113
Fig. 45 Disposición y compactación material de cobertura	115
Fig. 46 Seguimiento Metano CH ₄	116
Fig. 47 Seguimiento Oxígeno O ₂	117
Fig. 48 Seguimiento Monóxido de Carbono CO	118
Fig. 49 Seguimiento Sulfuro de hidrógeno H ₂ S.....	119
Fig. 50 Seguimiento a las temperaturas °C	121

RESUMEN

De la disposición de residuos sólidos en los años 1977 – 1984 en la ciudad de Medellín, surge el botadero a cielo abierto - morro de basuras de Moravia; generando su clausura impactos ambientales y afectación a comunidades. El objetivo principal de esta investigación es implementar una medida de manejo ambiental para controlar el proceso de combustión interna en el morro Moravia; la metodología se enmarca bajo un enfoque mixto, contiene elementos cuantitativos y cualitativos planteados desde una perspectiva teórico práctica, el enfoque cuantitativo se aplica al realizar y definir métodos para la medición de gases, temperatura, analizando variables de estudio, con el fin de mitigar los impactos ambientales de los procesos de combustión interna en el Morro Moravia, El enfoque cualitativo se estableció en la realización de búsquedas bibliográficas de conceptos , propiedades y medidas de control para procesos de combustión interna. Como resultado, se establece que la medida de manejo ambiental óptima para el control de la conflagración es el aislamiento de la zona de combustión. La investigación permite concluir que la mitigación de procesos de combustión en el Morro de Moravia cristaliza el protocolo ambiental para solucionar problemáticas de incendios en sitios de disposición final de residuos.

Palabras claves — **Combustión, residuos sólidos, morro de basuras de Moravia, impactos ambientales, emisiones de gases, masas de residuos, valoración de impacto ambiental**

ABSTRACT

From the disposal of solid waste in the years 1977-1984 in the city of Medellin, the open-air dump emerges- Moravia garbage dump, its closure generating environmental impacts and affectation to communities. The main objective of this research is to implement an environmental management measure to control the process of internal combustion in the Moravia hill, the methodology is framed under a mixed approach, it contains elements quantitative and qualitative raised from a practical theoretical perspective, the quantitative approach is applied to the carry out and define methods for the measurement of gasses, temperature, analyzing study variables, in order to mitigate the environmental impacts of internal combustion processes in the Moravia hill, the qualitative approach is established in carrying out bibliographic searches of concepts, properties and control measures to internal combustion processes. As a result, it is established that the optimal environmental management measure for the conflagration control is the isolation of the combustion zone. The investigation allows us to conclude that the mitigation of combustion processes in the Moravia hill crystallizes the environmental protocol to solve fire problems in final waste disposal sites.

Keywords — **Combustion, solid waste, Moravia garbage dump, environmental impacts, gasses, emissions, waste masses**

1. INTRODUCCIÓN

La gestión de residuos sólidos urbanos (RSU) es una problemática que ha afectado a lo largo del tiempo a todas las comunidades sedentarias en el mundo. A medida que los países evolucionan de ingresos bajos a medios y altos, sus situaciones de gestión de residuos también se modifican. Este crecimiento está vinculado directamente al aumento en la generación per-cápita, la rápida urbanización y el crecimiento demográfico, que ha hecho que el proceso de recolección y disposición sea cada vez más complejo [1]. Es sumamente importante acotar, que el aumento considerable de la producción de RSU, ha generado problemáticas y preocupaciones en función del tipo de disposición final [2].

Según el Banco Mundial en su informe “*A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2.050*” publicado en 2.018, los procesos de disposición final de los RSU en todo el mundo, se relacionan con cifras como; el 40% de los RSU tienen como sitio de disposición los rellenos sanitarios, alrededor del 19 % son recuperados a través de procesos de compostaje y reciclaje, el 8 % se trata por medio de métodos de incineración y el 33 % tiene como sitios de disposición botaderos a cielo abierto [1]. Lo anterior, es el panorama que a lo largo del desarrollo y evolución de las comunidades han traído consigo problemáticas ambientales, pero también avances en los procesos de gestión de residuos.

En Colombia, la gran mayoría de los RSU son dispuestos en rellenos sanitarios y un porcentaje muy bajo en sitios de disposición final no adecuados (botaderos a cielo abierto y celdas transitorias) [3]. Sin embargo, aunque el avance en materia de disposición en sitios no adecuados es importante, esto no indica que no se presenten aún, riesgos al ambiente y la salud pública. En consecuencia, es relevante que las acciones en materia de legislación deben propender por el manejo adecuado de los residuos, debido a que los indicadores de crecimiento poblacional y generación per-cápita van en aumento y se necesitaran a futuro espacios y lugares propicios para realizar disposición de residuos, los cuales en la actualidad han ido disminuyendo [4].

En Antioquia, según la SUPERSERVICIOS (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios) en su informe nacional de disposición final del año 2.020, de los 125 municipios que

conforman el Departamento de Antioquia, 120 que representan el 96% de los municipios, realizan su disposición final de residuos en sitios autorizados (Rellenos Sanitarios) y 5 (4% de los municipios) realizan su disposición en sitios no autorizados (Botaderos a cielo abierto). Lo anterior, muestra que, en la actualidad todas las subregiones del departamento y su área metropolitana, presentan aún diferentes problemáticas ligadas a los procesos de gestión de residuos y manejo de los sitios de disposición final [5] .

La gestión de residuos sólidos urbanos está centrada básicamente en procesos de recolección, transporte y en algunos casos aprovechamiento y posterior disposición final. Esta última acción, es concebida como el aislamiento y confinación de residuos sólidos en forma definitiva, en lugares especiales seleccionados, ya sean rellenos sanitarios tecnificados y/o botaderos a cielo abierto sin control técnico [6]

Los rellenos sanitarios son una obra de infraestructura que utiliza métodos y técnicas de ingeniería que permite confinar y enterrar los residuos para no generar problemáticas de sanidad, por el contrario, los botaderos a cielo abierto son una forma altamente contaminante dado que se realiza la disposición sin ningún tipo control y tratamiento [7]. Hoy día se conoce, que los sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos presentan problemas; entre los cuales se evidencia la generación de lixiviados que contaminan afluentes y efluentes de agua, olores ofensivos, proliferación de vectores, contaminación de suelo, contaminación de aguas subterráneas, emisión de gases de efecto invernadero provenientes de incendios, procesos de combustión y descomposición de los mismos entre otros aspectos que disminuyen la calidad ambiental y social [8].

Los sitios de disposición final, a lo largo de su existencia, presentan y se enfrentan a múltiples riesgos y problemáticas, uno de los riesgos más graves son los incendios y/o procesos de combustión que se dan al interior de estos, cuando no se manejan de manera adecuada [9]. Este tipo de eventos se pueden presentar por la gran acumulación de residuos y materiales con alto poder calorífico, como son: papel, cartón, plástico, madera, residuos de alcohol, pinturas, textiles, así como la presencia de altas concentraciones de gas metano por la descomposición de la materia orgánica, el cual en unión con el oxígeno facilita la combustión de los componentes señalados [10]

Un antecedente de la problemática asociado a los procesos de combustión y/o incendios en sitios de disposición final, puede encontrarse en el sitio conocido como el Morro de basuras de Moravia, ubicado en la parte central de la ciudad de Medellín, el cual se conformó como resultado de la disposición indiscriminada de los residuos domésticos, industriales, agrícolas, hospitalarios y de construcción de la ciudad y municipios aledaños sobre la llanura aluvial del río Medellín. El lugar funcionó como botadero a cielo abierto entre los años 1.970 y 1.984, periodo en el que además de la inadecuada disposición de los residuos, se generaron asentamientos humanos directamente sobre su superficie [11]. Allí, habitaron alrededor 17.000 personas en un área de 7,6 hectáreas de terreno, sobre una montaña de 35 metros de altura conformada por 1,5 millones de toneladas de residuos sólidos [12]. En el lugar, a diferencia de un relleno sanitario tecnificado, por ser un botadero de residuos a cielo abierto no se realizaron las adecuaciones técnicas correspondientes, lo que generó a lo largo del tiempo problemáticas sociales y ambientales especialmente ligadas a los procesos de combustión – incendios sub-superficiales y superficiales asociados a la masa de residuos allí dispuesta.

Para el año 2004 se el Gobierno Nacional decreto la calamidad pública en el sector. Debido a ello, desde el año 2004 se empezaron a implementar medidas para la recuperación de esta zona de la ciudad de Medellín [11]. Las diferentes intervenciones realizadas para la habilitación ambiental del Morro de Moravia, han apartado desde su área de estudio dar las soluciones para mitigar y controlar los impactos ambientales que se han ido generando a lo largo de los procesos realizados allí, así mismo es de suma importancia mencionar los antecedentes en temas investigativos realizados sobre el área del Morro de Moravia, algunos de estos estudios son:

- ✓ Estudio piloto para la recuperación del Morro de Moravia: Fase 1 (2009).
- ✓ Contaminación por metales pesados en el botadero de basuras de Moravia en Medellín: transferencia a flora y fauna y evaluación del potencial fitorremediador de especies nativas e introducidas. (2010),
- ✓ Diagnóstico de la problemática ambiental del área de Moravia, (Integral, 2000), Intervención integral: proyecto de protección, paisajismo y recuperación ambiental del Morro de Moravia (2011),

- ✓ Recuperación socio-ambiental del Morro de Moravia, en el marco del proyecto “Moravia florece para la vida” para avanzar en el desarrollo cultural, paisajístico, productivo, asociativo y ambiental de la zona. (2014).
- ✓ Convenio de asociación No. 4600060447 para el desarrollo de acciones técnicas, de investigación y diagnóstico que permitan realizar la habilitación del Morro de Moravia. (2015).

Con base en lo anterior, son pocas las investigaciones que se han desarrollado acerca de la problemática de combustión interna ocurrida dentro de la masa de residuos del Morro de Moravia, que desde tiempo atrás ya se viene presentando. Dentro de las zonas más afectadas en las 7,6 hectáreas que posee el Morro de Moravia con la problemática de la combustión es la suroccidental, donde permanentemente hay emanación de gases que provienen desde la parte interna de la masa de residuos, donde también se han identificado movimientos de masa, grietas, hundimientos y desmoronamiento de estructuras. Según la literatura consultada, estos elementos están asociados a procesos de combustión en masas de residuos que afectan la seguridad del sector y la calidad del aire entorno [13].

A raíz de los procesos de incendios y permanente quema que material combustible que se encuentra dispuesto en el lugar, ha contribuido al cambio constante del terreno como apariciones de grietas, caídas de estructuras que estaban bajo cemento, hundimientos en algunos lugares de la zona suroccidental cercanos a la ignición provocando inestabilidad en esta área. De igual manera ha generado emisiones de gases con olores no agradables al olfato de visitantes y pobladores del Morro de Moravia, también se han observado presencia de llamas y quemaduras constantes de los residuos que conforman el Morro.

Los residuos dispuestos ya sea en un relleno sanitario o botadero a cielo abierto, están constituidos por combustibles de alto poder calorífico como son: cartón, papel, plástico, madera, textiles, entre otros.; material inflamable como residuos de alcohol, gasolina, solventes, pinturas, etc.; así como la presencia de altas concentraciones de diversos elementos gaseosos, facilitándose de esta forma, la combustión de todos los componentes señalados, situaciones que a diario y constantemente se presenta dentro del área de influencia del Morro de Moravia.

El proceso de habilitación ambiental del Morro de Moravia ha promovido la ejecución de diversos proyectos encaminados a diagnosticar, cuantificar, formular e implementar estrategias que mitiguen y/o solucionen los problemas allí presentados. Es por esto, que este trabajo de investigación estuvo basado, en dar alternativas de control desde la gestión ambiental, a través de la implementación de una medida de manejo ambiental, a las problemáticas de combustión y/o incendios sub-superficiales que se evidenciaron en la zona suroccidental del lugar. Dicha problemática generó: hundimientos en la masa de residuos, desmoronamiento de sustrato y estructuras existentes, emisión de gases tóxicos, inestabilidad de suelo, olores ofensivos, riesgo de colapso de estructuras nuevas y dificultades a la comunidad que se encontraba dentro del área de influencia.

Con lo relacionado anteriormente, el desarrollo de esta investigación lleva a plantear el siguiente interrogante:

¿Cuál alternativa desde la gestión ambiental, podría implementarse para el control del proceso de combustión interna en la masa de residuos del Morro de Moravia?

2. OBJETIVOS

2.1. General:

Implementar una medida de manejo ambiental para el control de los procesos de combustión interna en la masa de residuos en la zona suroccidental del Morro de Moravia-Medellín.

2.2. Específicos:

- Caracterizar el proceso de combustión interna y las variables que lo condicionan.
- Identificar mediante revisión bibliográfica diferentes medidas para control ambiental de los procesos de combustión interna en una masa de residuos.
- Determinar a través de una matriz de valoración de impacto ambiental y económico la selección de la medida de control ambiental para el manejo de la combustión interna.
- Implementar la medida de manejo seleccionada para el control del proceso de combustión interna.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Generalidades sobre la gestión de residuos sólidos urbanos (GRSU)

La Gestión de residuos sólidos urbanos, es la interacción dinámica entre actores que se desempeñan en los planos institucional, sectorial y regional, en busca de una solución eficiente y equitativa sobre el manejo de los residuos. En el marco de la sustentabilidad ambiental y de los procesos de urbanización, la gestión integral de los residuos sólidos urbanos constituye hoy una preocupación de singular importancia por sus impactos directos e indirectos, algunos de ellos irreversibles y permanentes, tanto sobre el medio ambiente (aire, agua, tierra, paisaje) como sobre la salud de la población [12].

Las sociedades contemporáneas globales, se identifican por el alto grado de consumismo de bienes y servicios, estos, están ligados a una economía lineal que ha generado un constante aumento en la generación de residuos [13]. Aproximadamente el 54,5% de la población mundial vive en zonas urbanas y generan en promedio más de 1.300 millones de toneladas de residuos sólidos urbanos por año y se proyecta que para el año 2.030 las áreas urbanas albergarán 60% de las personas a nivel mundial y generaran 2.059 millones de toneladas por año [14]. En los países de con alto nivel de desarrollo, la generación de residuos es mayor que los países con un nivel bajo de desarrollo, los cuales se pueden precisar con los porcentajes de generación por regiones a nivel mundial como son: Oriente Medio y África del Norte 6%, África Sub-Sahara 9%, América Latina y del Caribe 11% ,Norte América 14%, Asia del Sur 17%, Europa y Asia Central 20%, Asia Oriental y el Pacífico 23 % [1]. Según el Banco Mundial, la práctica de disposición final de residuos sólidos urbanos a nivel mundial, en relleno sanitario sumada a la de botadero a cielo abierto corresponde al 73% y el 26% restante a procesos de incineración, compostaje y reciclado. Lo anterior, muestra desde el contexto de gestión las falencias notorias que aún presentan las comunidades [15]

Considerando la cantidad de residuos sólidos que se expulsan diariamente desde los hogares, las organizaciones de salud públicas alrededor del mundo argumentaron la necesidad de establecer un sistema de gestión de residuos sólidos. En América Latina, este procedimiento estuvo en cabeza de

la Organización Panamericana de la Salud -OPS-, a finales de los años sesenta, quien lideró la formación de especialistas en la gestión de residuos sólidos en Estados Unidos [16].

Los avances en materia ambiental y la legislación que se ha presentado en los países de América Latina ha promovido que las políticas de Gestión de Residuos Sólidos Urbanos se conviertan en una de las problemáticas con mayor enfoque en los últimos años. En efecto, Tello, Campania y Sarafian argumentan que los programas que se enfocan en el GRSU adquieren especial relevancia en el contexto actual debido a que fenómenos como la migración, urbanización, los mayores ingresos personales y familiares han presionado la demanda de bienes y servicios, el consumo de los hogares, y por ende, un aumento en la generación y composición de los residuos sólidos [16].

Frente a este fenómeno, la Asamblea General de las Naciones Unidas en el año 2015 publicó la agenda 2030 donde se establecen los Objetivos del Desarrollo Sostenible -ODS- que plantea la necesidad de transformar los procesos productivos de las comunidades con el objetivo de promover un consumo responsable y sustentable. La delimitación de los ODS permitió que en América Latina organizaciones como AIDIS (Organización Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental) también estableciera un plan de desarrollo 2030 en donde se concretan lineamientos para el manejo de los residuos sólidos y que tiene como finalidad apoyar a los gobiernos de la región a mejorar y optimizar sus procesos de gestión de residuos sólidos [16].

En virtud de lo anterior, los procesos de GRSU requieren de una acción mancomunada por parte de las autoridades públicas en donde se tengan en cuentas aspectos como: (i) las disposiciones legales, regulatorias y de planificación nacional; (ii) el sector de la GRSU en relación con la efectividad de las organizaciones públicas, privadas, municipales y sociales; (iii) los principios económicos y financieros; (iv) la responsabilidad empresarial en los procesos de producción; (v) la responsabilidad social en el proceso de consumo y descarga donde se debe educar de forma continua a los ciudadanos; (vi) el desarrollo urbano (mega ciudades y urbanización extendida), y (vii) la prestación eficiente del servicio público de recolección de basuras [17].

Las medidas para la gestión de los residuos sólidos urbanos son un factor determinante para mejorar las condiciones medioambientales de las ciudades y que tiene una consecuencia fundamental para

mejorar las condiciones de vida de todos los agentes de la sociedad. Tal y como lo sostienen Usaquén y Sánchez [18], la GRSU es una práctica que ha colaborado con la generación de empleo y reducción de la pobreza, más aún, este enfoque satisface las necesidades básicas en relación con la conservación y disfrute de un medio ambiente sano [18].

Debido a la importancia de la gestión de los residuos sólidos urbanos, algunos países en América Latina han involucrado esta problemática en sus agendas políticas. Es así, que algunas administraciones de la región han establecido un conjunto de directrices y normativas enfocadas en el cambio de actitud de todos los miembros de la comunidad para reducir la cantidad que se genera de estos residuos y así mitigar los efectos adversos de los mismos en el medio ambiente [19].

Considerando la importancia de la GRSU, los países de América Latina han ido adoptando una serie de medidas y políticas públicas que se enfocan en la gestión integral de las mismas. Para el caso colombiano, estos lineamientos se encuentran establecidos en la Ley 142 de 1994 sobre el régimen de servicios públicos y el Decreto 2981 de 2013. En la normativa antes mencionada se contempla la generación de residuos y se expone la necesidad de establecer un proceso de logística para la recolección y responsabilidad de la prestación de dicho servicio en cabeza del Estado colombiano. Más aún, con la Política Nacional de Producción y Consumo Sostenible establecida en el año 2010, se menciona la importancia y necesidad de dotar a los desechos de un tratamiento adecuado para mitigar los impactos negativos al medio ambiente [19].

Si bien es cierto que las políticas públicas de GRSU son un elemento transcendental para apoyar los objetivos del desarrollo sostenible, es indispensable que en las políticas que se formulen desde el gobierno central se tengan programas claros para incentivar el adecuado manejo de los residuos y concientizar a la ciudadanía acerca de la necesidad de cambiar sus hábitos en sus procesos de consumo. En el mismo orden de ideas, es recomendable que en los procesos de gestión de los residuos sólidos se posibilite la construcción de bases de datos que permitan establecer con claridad las cantidades de desechos que emiten en el país con el objetivo de facilitar la toma de decisiones y el ajuste de las políticas. La existencia de bases de datos cuantitativa serias permiten facilitar los procesos de análisis inferencial, lo cual permite determinar las causas en la generación de los

desechos sólidos de las ciudades y por ende mejorar las políticas públicas para solucionar las problemáticas relacionadas con este fenómeno [19].

De manera concreta, al estimar la cantidad de desechos que se producen en el país, se calcula que en promedio se disponen 32.580,96 Ton/día de residuos sólidos urbanos presentados por los usuarios del servicio público de aseo, los cuales son depositados diariamente en los diferentes sistemas de disposición final [5] .

El país cuenta con 1.103 municipios desde el 2.020, de los cuales el 56% (617 municipios) disponen sus residuos en sistemas autorizados (rellenos sanitarios y celda de contingencia) y 32% (352) que disponen sus residuos en sistemas no autorizados (Botaderos a cielo abierto, celda transitoria y todo a aquello que no cumpla con la norma colombiana). A *grosso modo*, la disposición final de residuos en Colombia se realiza en 308 sitios disposición final divididos así; 174 rellenos sanitarios, 84 botaderos a cielo abierto, 13 celdas de contingencia, 10 celdas transitoria [5] [20].

En Antioquia, en promedio se generan 4.421,48 Ton/día de residuos sólidos urbanos, el cual representa el 14,76% de la generación a nivel nacional, lo que representa un aporte muy significativo. En el departamento, de los 125 municipios 120 disponen en sitios autorizados (rellenos sanitarios) y solo 5 municipios realiza su disposición en sitios no autorizados (botaderos a cielo abierto y celdas transitorias) [5].

Con respecto a los datos referenciados, se conoce que el manejo de los residuos sólidos urbanos es todavía una compleja problemática, la cual radica en los sistemas de disposición final, tratamiento y procesamiento de los mismo [21].

Así, a pesar de que el Documento CONPES 3874 de 2016 estableció algunas recomendaciones para el proceso de disposición final de los residuos a través de una metodología para aislar y confinar los residuos sólidos en especial los no aprovechables, en forma definitiva, en lugares especialmente seleccionados y diseñados para evitar la contaminación, los daños o riesgo a la salud humana y el ambiente, todavía persisten algunos retos para implementar un proceso de gestión de los residuos exitoso [3].

Bajo este contexto, el documento CONPES 3874 de 2016 establece que en términos de normatividad ambiental los sistemas de disposición final de los residuos se pueden dividir en dos grandes grupos: El primer corresponde a los sistemas autorizados, para los cuales la autoridad ambiental competente otorga licencia ambiental, y el otro grupo, corresponde a los sistemas no autorizados en donde se requiere un sistema de evaluación previa a la ejecución por parte de la autoridad ambiental competente, y que tampoco cuenta con los permisos ambientales requeridos; en otras palabras, este segundo grupo es aquel que no cumple con todos los requerimientos establecidos en la norma colombiana y que se constituye como un factor de riesgo para los recursos ambientales [3] [22].

Adicional a lo anterior, la Superservicios aclara que contar con todos los permisos ambientales no asegura que los sitios de disposición final estén adecuadamente funcionando, ya que esto depende de la responsabilidad del prestador y del seguimiento de los diferentes actores (interventorías, autoridades ambientales, entes territoriales como garantes de la prestación, y entes de vigilancia a nivel nacional como la Procuraduría). Así, por ejemplo, la Superintendencia realiza visita a los sitios de disposición final con el objetivo de validar la prestación de servicios, puesto que se ha encontrado en diversas ocasiones deficiencias técnicas y operativas. Igualmente, existen algunos sitios que sin tener autorización ambiental o presentan una autorización vencida no representan un riesgo para la continuidad y calidad de la prestación del servicio debido a su capacidad instalada y las buenas prácticas en la operación de sus actividades [22].

En consecuencia, la Superservicios sostiene que, considerando la normativa nacional, en el país se presenta una clasificación bipartita sobre los sistemas de disposición final: los autorizados (incluyendo rellenos sanitarios, planta de tratamiento y celda de contingencia), y los no autorizados (incluyendo la celda transitoria y botadero a cielo abierto). Es importante considerar que a pesar de los avances en materia ambiental y de regulación de los desechos sólidos urbanos, todavía existen aspectos de mejora que se deben analizar con el objetivo de asegurar la calidad del medio ambiente y la preservación de la salud de los colombianos [22].

3.2. Metodologías para la planeación sustentable de residuos sólidos urbanos

Considerando la importancia que tienen los sistemas de GRSU, en el presente acápite se desarrollan las principales metodologías y planes de trabajo que se han desarrollado a nivel internacional para realizar un proceso de planeación sustentable de los residuos sólidos. Sobre este apartado se debe considerar que la mayor parte de las metodologías sobre planeación sustentable de residuos sólidos se enfocan en el metabolismo circular de los residuos mediante el cual se integran formas compatibles de producción y consumo que consideran los flujos de materia y energía en el sistema. Lo anterior, permite el aprovechamiento de los residuos a través de la reducción en el consumo, la reutilización y el reciclaje [23].

Adicional a lo anterior, se debe considerar que las metodologías integrales de planeación sustentable de los residuos sólidos también contempla los procesos de restauración ambiental, el diseño de nuevas rutas administrativas y normativas para manejo de residuos, la reingeniería de políticas públicas, la incorporación de los procesos de innovación tecnológica, el desarrollo de la investigación, el fomento de ciclos educativos y de capacitación, la formación de circuitos de mercados, conformación de clúster, la participación de las empresas privadas, la gestión y fomento financiero y la estructuración de los procesos de seguimiento y evaluación [23].

En otras palabras, las metodologías actuales sobre planeación sustentable de residuos sólidos urbanos ya no contemplan solo la generación, recolección y tratamiento final de los residuos, sino que incluye otras etapas y conceptos con la finalidad de reducir los impactos negativos que tienen los RSU en la conservación de los ecosistemas. Por ello, este tipo de planes deben abarcar un proceso analítico que involucre los siguientes aspectos:

- Aspectos de salud: Aquí se debe considerar que el tratamiento de los residuos sólidos son un elemento transcendental para preservar la salud de la población que se encuentra expuesta de manera directa e indirecta a los riesgos del tratamiento de los desechos.
- Aspectos de costo: Se refiere a la necesidad de establecer los costos en todas las etapas del manejo de los residuos sólidos de una forma integral en donde se puedan incluir todas las posibles erogaciones de capital que son necesarias para llevar a cabo el proceso de

planificación y planeación de los RSU tales como los sueldos del personal, los gastos de operación de vehículos y equipos mecanismos, gastos de capital y otros.

- Articulación de los procesos de planificación con los planes de desarrollo: Es indispensable articular los procesos de planificación con las líneas de acción de los planes de desarrollo nacionales, departamental y municipales para la actuación mancomunada de las entidades privadas y públicas, fortaleciendo las líneas de acción estratégicas que conlleven a un mejor manejo y gestión de los residuos urbanos.
- Establecimiento de las rutas de evaluación y seguimiento: Uno de los aspectos primordiales en todo proyecto es la articulación y diseño de los mecanismos necesarios para hacer los procesos de seguimiento y evaluación que permitan evaluar los alcances, limitaciones y obstáculos que presenta la planificación sustentable de los residuos sólidos, y a partir de ello promover acciones de mejora e intervención en los aspectos más débiles [23, 24].

Adicional a lo anterior, se debe considerar que las metodologías para la planeación sustentable de los residuos sólidos también requieren de un estudio del contexto específico donde se lleva a cabo el proyecto. Así, estas metodologías deben analizar las particularidades del entorno en que se ejecutan, las necesidades de intervención, los agentes involucrados, el cronograma y presupuesto, y la realización de una matriz de riesgo que permita mitigar la ocurrencia de eventos que puedan afectar la puesta en marcha una vez se implemente la metodología trazada [24].

En el mismo orden de ideas, Cárdenas y otros [24] sostienen que las metodologías sustentables de gestión de residuos urbanos deben considerar tres dimensiones fundamentales a saber: (a) la dimensión económica, en la cual se debe establecer un modelo económico y financiero que garantice la sostenibilidad del modelo y que contemple todas las erogaciones de dinero que requiere la puesta en marcha de la metodología en mención. En esta fase, es indispensable que los organizadores realicen estudios de factibilidad económica y técnica para determinar el tamaño del proyecto y la cantidad de recursos y beneficios que puede ofrecer; (b) la dimensión ambiental, que se constituye en un eje central y que debe procurar un manejo adecuado de los residuos, separación en la fuente, reciclajes de materiales, reciclaje de materia orgánica, con el fin de mitigar los impactos negativos en el proceso de tratamiento y disposición final de los residuos. Aquí se debe determinar una matriz de riesgo ambiental donde se establezcan todas las medidas que se deben

adoptar al momento de ejecutar la metodología, así como los planes de mitigación frente a las posibles eventualidades, y (c) la dimensión social dentro de la cual se deben realizar las alianzas público-privadas para fortalecer la participación ciudadana, la democracia, la libertad, la solidaridad y el trabajo en pro del bienestar de la comunidad que sea afectada por la ejecución del proyecto.

Al considerar lo expuesto previamente, se establece con claridad que las metodologías sustentables de residuos sólidos tienen como objetivo establecer unas rutas de acción que se fundamenten en pilares económicos, ambientales, sociales y culturales para que su proceso de gestión de los residuos posibilite un manejo adecuado de los mismos y así mitigar los impactos negativos al medio ambiente.

3.3. Conceptualización del proceso de combustión

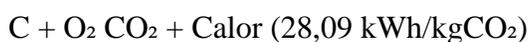
La combustión es la reacción de oxidación de las sustancias combustibles. Como en la mayor parte de sus aplicaciones técnicas, lo que se exige en estos procesos es la obtención del máximo calor posible, que exigen cantidades más o menos importante de aire en exceso. Los productos de un proceso de combustión son los siguientes gases; CO_2 , H_2O , N_2 , O_2 , y en menor proporción CO , H_2 y SO_2 . [25].

La combustión se distingue de otros procesos de oxidación lenta, por ser un proceso de oxidación rápida y con presencia de llama; a su vez, también se diferencia de otros procesos de oxidación muy rápida (detonaciones, deflagraciones y explosiones) por obtenerse el mantenimiento de una llama estable. Para que la combustión tenga lugar han de coexistir tres factores: combustible, comburente y energía de activación. Estos factores forman el denominado triángulo de combustión como se observa en al Fig.1, en el cual si falta alguno de los vértices la combustión no puede llevarse a cabo [26].

El comburente universal es el oxígeno, por lo que en la práctica se utiliza el aire como comburente, ya que está compuesto, prácticamente, por 21% Oxígeno (O_2) y 79% Nitrógeno (N_2); únicamente en casos especiales se utilizan atmósferas enriquecidas en oxígeno e incluso oxígeno puro (por

ejemplo, en soldadura). La energía de activación es el elemento desencadenante de la reacción de combustión; en los quemadores habitualmente suele obtenerse mediante una chispa eléctrica entre dos electrodos, en las calderas individuales de gas se obtiene por llama piloto, tren de chispas [26].

La mayoría de los combustibles, al margen de que sean sólidos, líquidos o gaseosos, están compuestos, básicamente, por Carbono (C) e Hidrógeno (H); además de estos componentes principales tienen otros como Azufre (S), Humedad (H₂O), Cenizas. En primer lugar, se analiza la combustión desde el punto de vista de sus componentes fundamentales (C, H); posteriormente se comentará la influencia de los restantes elementos [26]. Las reacciones de combustión son:



Combustión completa: Conduce a la oxidación total de todos los elementos que constituyen el combustible. En el caso de hidrocarburos: Carbono CO₂, Hidrogeno H₂O, Azufre SO₂, Nitrógeno N₂, Oxígeno Participará como oxidante [26].

Combustión Incompleta: Los componentes del combustible no se oxidan totalmente por lo que aparecen los denominados inquemados, los más importantes son CO y H₂; otros posibles inquemados son carbono, restos de combustible [26].

Combustión Estequiométrica: Es la Combustión Completa realizada con la cantidad estricta de oxígeno; es decir, el aire empleado en la combustión es el mínimo necesario para contener la cantidad de oxígeno correspondiente a la oxidación completa de todos los componentes del combustible [26]. La expresión de esta combustión es:

$C_xH_y + n \text{ Aire (O}_2 + N_2) \rightarrow x CO_2 + (y/2) H_2O + 0,79 nN_2 + \text{Calor (Q)}$ En este caso $0,21 \cdot n = x + (y/4)$, siendo el calor generado es el correspondiente a la combustión completa [26].

3.3.1 Relación de procesos de combustión tecnificados y residuos sólidos.

El manejo de los residuos sólidos en los centros urbanos, se limita a los procesos de recolección, transporte y disposición. En este sentido, las diferentes dificultades asociadas por el inadecuado

manejo de los residuos tienen consecuencias importantes hacia el medio natural como a la salud de las personas. Dentro de las implicaciones que se pueden desatar de un manejo no eficiente de los residuos están [27] :

- Disminución de la calidad de vida de las comunidades.
- Deterioro del paisaje natural.
- Contaminación de recursos naturales.
- Combustión al interior de la masa de residuos.
- Generación de vectores.
- Conformaciones de incendios y procesos de combustión al interior de la masa de residuos.

En ese particular, los procesos de combustión como la incineración utilizan la descomposición térmica mediante el proceso de oxidación alta temperatura en promedio (800-1100 °C), a través de este proceso se destruye la fracción orgánica del residuo y en efecto se reduce el volumen. En referencia al tema de combustión interna, los incendios generan reacción de oxidación, que se define como aquella que ocurre cuando se combina cualquier sustancia con el oxígeno del aire. Las reacciones químicas pueden estar asociadas con la generación de distintos tipos de energías como la luz, electricidad y el calor [28]

La combustión es una reacción química de oxidación, relativamente rápida, que consiste en la interacción de una materia combustible con el oxígeno, con desprendimiento de calor, que se desarrolla en fase gaseosa o heterogénea. Sin embargo, los grados de combustión pueden llegar a variar ampliamente hablando de su velocidad e integridad de la reacción o incineración ya que depende de la afinidad que presente el elemento combustible con el oxígeno además de las condiciones como tiempo, temperatura y turbulencia [28].

Cuando la reacción desprende calor, se denomina exotérmicas, sin embargo, hay reacciones que para su ocurrencia requieren determinada cantidad de calor, a las que se denomina endotérmicas. En ese sentido, el fuego es la manifestación energética de la reacción química llamada combustión y su principal característica es la gran cantidad de calor que genera. El proceso de combustión interna en una masa de residuos altera el suelo como sistema, convirtiéndolo en un espacio más

vulnerable y susceptible de alterarse perdiendo su equilibrio natural. La calidad de suelo está dada por aquel conjunto de condiciones de equilibrio, que garantizan que los ciclos naturales biogeoquímicos pueden darse sin restricciones, no existiendo riesgos para los seres humanos, los animales, las plantas y el ambiente.

La incorporación al suelo de sustancias tóxicas, como una cantidad de residuos sólidos puede alterar el equilibrio natural del suelo, afectando su calidad y poniendo en riesgo al ser humano y a los ecosistemas. Por la vía de la infiltración las sustancias tóxicas pueden alcanzar el agua subterránea, extendiendo la contaminación en grandes áreas. En ese particular, se reconoce que los procesos de combustión se han empelado como uno del tratamiento más ampliamente utilizados para reducir el volumen de residuos de forma significativa.

En el proceso de incineración la materia orgánica es oxidada con el oxígeno del aire, generando emisiones gaseosas que contienen mayoritariamente dióxido de carbono, vapor de agua, nitrógeno y oxígeno [28]. Dependiendo de la composición de los residuos y de las condiciones de operación, las emisiones gaseosas pueden contener además cantidades menores de monóxido de carbono, ácidos clorhídrico, yodhídrico y bromhídrico, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles, PCBs, dioxinas y furanos, y metales, entre otros. En el proceso se generan residuos sólidos (cenizas y escorias constituidas por el material no combustible) [28].

Las principales reacciones de combustión se reconocen al quemar, es decir al lograr una oxidación rápida de los elementos para producir calor, con el carbono, hidrógeno y azufre se obtienen 3 reacciones fundamentales, con las cuales definimos también una combustión completa porque los productos en las reacciones no se quemarán más.

Para que se lleve a cabo, se requiere la presencia simultánea de material combustible (en este caso material orgánico), un comburente como el oxígeno del aire y ciertas condiciones de temperatura, Para explicar el proceso de la combustión es necesario referirse al triangulo de fuego, donde cada uno de sus lados representa a un elemento necesario para que se produzca la combustión [29] (Ver fig. 1)

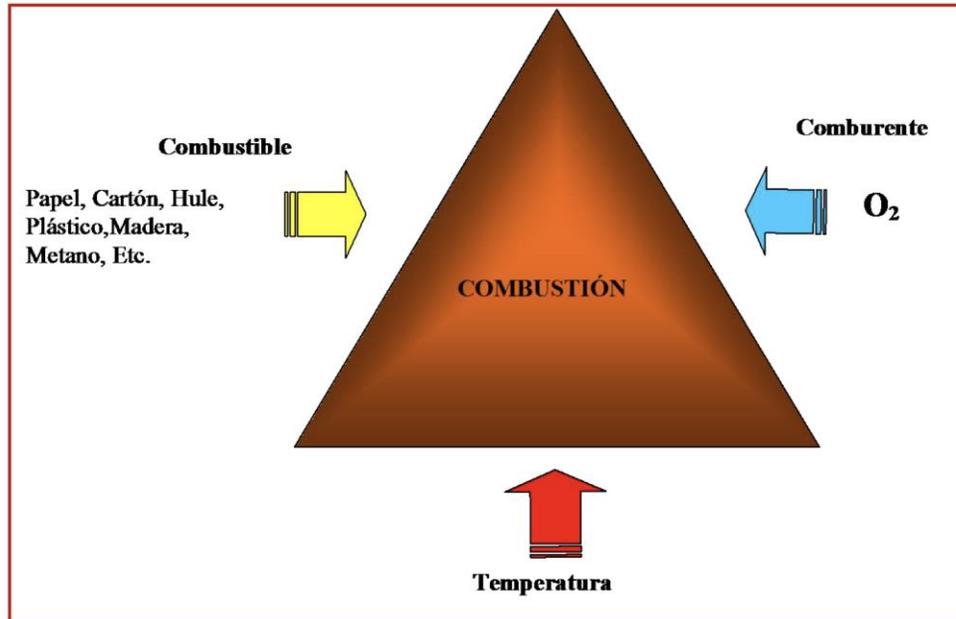


Fig. 1. Triángulo de la combustión en masa de residuos. [29]

Lo anterior aplica para combustibles sólidos y líquidos, sin embargo, los gases no requieren calentarse para su combustión, por lo que representan un mayor riesgo, ya que su combustión es muy rápida. Según la velocidad de propagación de la combustión, fenómeno conocido como velocidad de la reacción, se puede definir la siguiente clasificación (ver fig. 2).

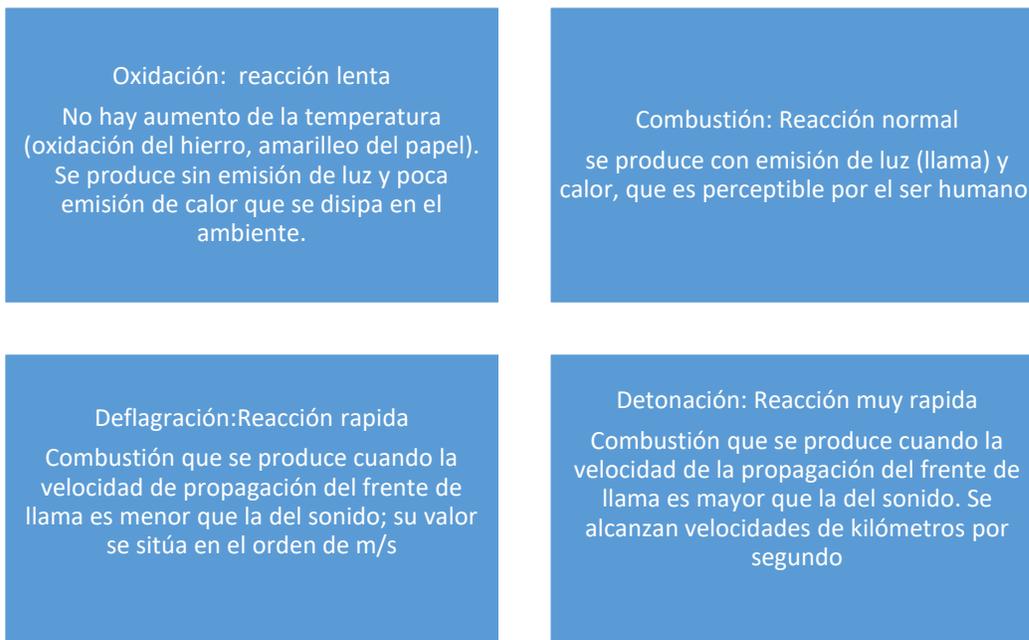


Fig. 2. Clasificación de las reacciones según su velocidad. [29]

Para que un proceso de combustión se inicie, necesitamos que el combustible desprenda vapores y esto se consigue mediante el calor. Para que la mezcla de vapores combustibles y oxígeno comience a arder, se requiere de una fuente de ignición que puede ser: un fuego, una chispa, un cigarrillo encendido, etc., es decir, alguna fuente que pueda producir calor, y este se propaga en tres formas: i) Conducción: a través de los cuerpos; ii) Radiación emisión de rayos infrarrojos y; iii) Convección, donde el aire caliente se eleva por ser más ligero [29].

La forma más importante de propagación es la convección y es por este motivo por el que los fuegos se propagan más rápidamente hacia arriba. La propagación en sentido horizontal, entre otros factores, se debe a la radiación y la conducción del calor. En sentido hacia abajo el fuego se propaga muy lentamente e incluso en muchos casos se extingue. Sin embargo, el proceso de combustión tiene que ser controlado para reducir las emisiones, pues en el desarrollo del proceso se hace la reducción del volumen al dejar un material inerte como escorias y cenizas cercano al 10% de la inicial, conviene mencionar que la combustión a cielo abierto genera humos, cenizas y olores indeseables, los cuales requieren aplicar una serie de controles y medidas en razón de prevenir cualquier daño. [29].

La combustión, se identifica como una reacción química de oxidación, relativamente rápida, que consiste en la unión de una materia combustible con el oxígeno, con desprendimiento de calor, que se desarrolla en fase gaseosa o heterogénea [29]. Sin embargo, los grados de combustión pueden llegar a variar ampliamente hablando de su velocidad e integridad de la reacción o incineración ya que depende de la afinidad que presente el elemento combustible con el oxígeno además de las condiciones como tiempo, temperatura y turbulencia.

En las reacciones de combustión es necesario el comburente, usualmente el oxígeno del aire. En el aire se encuentran más elementos como argón, dióxido de carbono y nitrógeno que al ser son inertes para este caso no se consideran en las respectivas ecuaciones. El proceso de combustión se puede desarrollar de manera completa e incompleta, en ese particular, la combustión en el Morro de Moravia no genera un proceso de combustión total dado que se cuenta con una inadecuada oxidación y se producen sustancias denominadas “inquemados”, que son contaminantes adicionales del proceso [29]

El comburente es normalmente el oxígeno del aire, en virtud de lo mencionado anteriormente para el caso del Morro Moravia, como lo ha sugerido el Sistema Español de Inventario de Emisiones la importancia de este elemento se centra fundamentalmente en la violencia con que se produzca la combustión [30]. Así, por ejemplo, en una atmósfera pura de oxígeno se consigue hacer arder el hierro. Por el contrario, si la concentración de oxígeno es muy baja, el fuego no aumentará o incluso se extinguirá. En condiciones normales, la concentración de oxígeno en el aire es de un 21% pero cerca de depósitos de oxígeno o en almacenes donde existan botellas o botellones de oxígeno, en caso de fuga, esta concentración puede aumentar y favorecer el inicio del fuego. Las bolsas y los envases de plástico y de cualquier tipo que almacenan oxígeno (aun cuando estén confinados), promueven e incrementan los incendios en los vertederos de basura, por eso es tan difícil su control y extinción [30].

De la misma manera, cuando se experimenta un proceso de combustión interna se necesita de una sustancia que sea capaz de presenciar este fenómeno, a este se le denomina el combustible y sus características depende de: i) Punto de inflamación (Flash Point) se considera como la temperatura a la cual una sustancia comienza a desprender vapores o gases en cantidad suficiente para mantener la combustión. Se expresa en grados centígrados. Cuanto más bajo sea el punto de inflamación más fácilmente desprenderá vapores un combustible. No obstante, se debe reconocer que existen algunas sustancias químicas que desprenden oxígeno bajo ciertas condiciones como el Nitrato Sódico (NaNO_3), y el Clorato Potásico (KClO_3), que se conocen como agentes oxidantes cuya presencia puede provocar la combustión en ausencia de comburente.

Otra de las propiedades se reconoce como: ii) la temperatura de ignición. Es la temperatura a la cual una sustancia empieza a arder espontáneamente. Se le denomina también temperatura de auto inflamación o auto ignición; iii) Punto de auto inflamación. Es aquella temperatura mínima a la cual un combustible emite vapores, que en presencia de aire u otro comburente, comienzan a arder sin necesidad de aporte de una fuente de ignición y finalmente se identifica como propiedad; iv) los límites de inflamabilidad, donde la combustión sólo es posible cuando la concentración de los gases está comprendida entre los valores específicos para cada combustible. A la mínima concentración necesaria para mantener la combustión se la denomina Límite Inferior de

Inflamabilidad (L.I.I.) La concentración por encima de la cual la combustión no es posible, recibe el nombre de Limite Superior de Inflamabilidad (L.S.I.).

Ahora bien, como en todo proceso de combustión se generan una reacción química, donde las sustancias reaccionantes en una combustión dan lugar a otras totalmente distintas, entre todas ellas, las más relevantes son: el humo y los gases tóxicos. (ver tabla 1).

Tabla 1. Sustancias reaccionantes

Humo	Gases Tóxicos
Formado por diminutas partículas sólidas y vapor condensado, Estas partículas pueden ser de color, dimensiones o cantidad tales, que dificultan la visibilidad, impidiendo la identificación de las salidas o su señalización.	<p>Se desprenden de un proceso de combustión, son muy diversos dependiendo del material combustible, siendo los más comunes el monóxido de carbono y el anhídrido carbónico.</p> <ul style="list-style-type: none"> • El monóxido de carbono envenena por asfixia al combinarse con la hemoglobina de la sangre, impidiendo el transporte del oxígeno que el cuerpo necesita. • el bióxido de carbono o anhídrido carbónico estimula el ritmo de la respiración. Esta circunstancia, combinada con la disminución de oxígeno en el aire, puede provocar la asfixia.

Nota: Afectaciones por inhalación por humo y gases tóxicos.

Esos contaminantes establecen una magnitud donde la carga emitida corresponde a la cantidad en eso de dicho contaminante que es liberada por unidad de tiempo, para las emisiones atmosféricas las cargas se calculan como el producto de la concentración del contaminante en la corriente de liberación por el caudal. Conviene mencionar, que las emisiones atmosféricas producidas por un proceso de combustión se generan por la gestión inadecuada de residuos [30].

Los incendios y las quemadas no controladas (por ejemplo, la quema de residuos a cielo abierto) son otra fuente importante de liberación de contaminantes, cuya principal vía de liberación son las emisiones atmosféricas [30]. Para cualquier tipo de combustión se debe tener en cuenta que en algunos casos se pueden generar contaminantes más tóxicos que los presentes originalmente en los residuos. La velocidad con que ocurran estos procesos dependerá de las propiedades físicas del

residuo y de las condiciones del lugar, en efecto para el Morro Moravia se debería reconocer previamente la cantidad de compuestos orgánicos que tiene el residuo, y a partir de ello identificar si este tiene altas presiones de vapor para que se tenga en cuenta los procesos de volatilización, siendo las altas temperaturas y el viento factores que incrementan este mecanismo. Esto en la mayoría de los casos no es posible.

Así pues, la volatilización es también un mecanismo mediante el cual un contaminante puede migrar de un medio a otro. La dispersión de sólidos por efecto del viento también es un mecanismo de liberación de contaminantes. Pequeños tamaños de partícula y bajas densidades del material incrementan la posibilidad de ocurrencia. Al analizar la liberación de contaminantes en el medio, se deben tener en cuenta en forma adicional que los contaminantes pueden ser inestables en las condiciones ambientales a las que son expuestos, reaccionando por ejemplo con el oxígeno o con el agua y generando otros compuestos que pueden ser en algunos casos más tóxicos, más solubles en agua o liberarse como gases [31].

Concretamente, cuando un contaminante es liberado al medio existe la posibilidad de que ocurran varios procesos de transporte, transformación y/o acumulación y en consecuencia cuando se reúnen los elementos necesarios, se puede dar un proceso de combustión. La comprensión de los procesos involucrados, incluido las transformaciones que los contaminantes sufren en dichos procesos, permite además de evaluar el grado de exposición del receptor, conocer el impacto que tendrá dicha liberación sobre los ecosistemas, las poblaciones residentes en lugares aledañas constituyen un elemento clave para diseñar los programas posteriores a las medidas de control ambiental [31].

Para determinar el comportamiento de un contaminante una vez que es liberado al medio es necesario conocer las propiedades fisicoquímicas y su comportamiento ambiental, así como las características del medio físico donde se ubica la fuente y el receptor. Algunos de los procesos que se desarrollan en el medio, una vez que es liberado el contaminante, pueden atenuar el impacto o retardar la transferencia de contaminantes. Las características básicas de un contaminante para evaluar su comportamiento ambiental son aquellas que reflejan el grado de movilidad que pueda tener en los distintos medios (agua, aire, suelo), su persistencia, la biodegradabilidad, el potencial de intervenir en reacciones químicas y de bioacumularse y biomagnificarse en la cadena trófica. El

clima, la geología, la edafología, la hidrología y la composición biológica del medio, son factores que podrán acelerar, retardar o atenuar la movilidad de los contaminantes en el medio ambiente.

La movilidad del contaminante y su acumulación en los distintos medios dependerán de las características de los contaminantes y de la naturaleza de los compartimientos ambientales. Las propiedades físicas que resultan claves para la movilidad del contaminante son la volatilidad y solubilidad en agua. Los contaminantes orgánicos persistentes suelen transportarse a largas distancias, lo que se conoce como "efecto saltamontes", denominación que deriva de la capacidad de una sustancia de poder ser transportada por vía acuosa, aire o especies migratorias a áreas remotas con relación a donde es utilizada o emitida.

La persistencia es la capacidad de permanecer en el medio ambiente largos períodos de tiempo sin sufrir degradación química o biológica. Se debe tener en cuenta que el parámetro con el que se cuantifica la persistencia es aplicado sólo a compuestos orgánicos que usualmente son los compuestos susceptibles de degradarse química o biológicamente. Los metales son netamente persistentes ya que, si bien pueden sufrir reacción de transformación química, el átomo de metal siempre permanece como tal [31].

En efecto, los incendios en los vertederos de basura representan un riesgo permanente para la población que vive en lugares aledaños, y al personal o individuos responsables de su operación, por lo que deben contar con la preparación y los implementos necesarios para controlarlos en el menor tiempo posible, este tipo de siniestros son habituales en tiraderos a cielo abierto por la amplia exposición de basura sin cobertura alguna y aunque también pueden presentarse en rellenos sanitarios, cuando son bien operados, es remoto que se presenten [32]

De la misma manera, estudios recientes identifican que, en los vertederos de residuos sólidos, existen grandes cantidades de materiales que pueden promover la aparición y el desarrollo de incendios, en muchas ocasiones difíciles de controlar:

- Materiales con alto poder calorífico: papel, cartón, plásticos de distintas características, hule, madera, fibras en general y textiles.

- Materiales volátiles: disolventes, lodos aceitosos, pinturas, recipientes conteniendo estos compuestos y combustibles en general.
- Materiales susceptibles de explotar: recipientes con restos de aerosoles y de distintos tipos de gases.
- Materiales de origen industrial de alta combustibilidad: recortes de plásticos y fibras, residuales conteniendo materiales susceptibles de entrar en combustión, restos de celulosa, lotes de materiales caducos o fuera de especificaciones que son altamente volátiles.

Además, la descomposición de la fracción orgánica presente en la basura en condiciones anaerobias; produce biogás con un alto contenido de metano, gas combustible que favorece la aparición de incendios. Como resultado, los escenarios antes descritos, con la identificación de componentes que favorecen la aparición y en consecuencia un proceso de combustión [32].

Así pues, un incendio puede ser controlado rápidamente, eliminando el agente que lo provocó y evitando que se propague la combustión por la presencia del oxígeno del aire; ya que de otro modo la llama evolucionará, generará gases y vapores combustibles, y en pocos minutos se convertirá en un evento que requerirá de mayores recursos para su control, así como la aplicación de prácticas especializadas y la participación de personal debidamente capacitado [32].

La aparición de incendios en los vertederos de basura, se deben a situaciones multifactoriales; sin embargo, basta una fuente de ignición con el calor suficiente para encender el material inflamable y mantener la combustión, como pueden ser cenizas calientes, chispas, combustión espontánea, reacción química e incluso la provocación dolosa. Esta situación se potencializa en las temporadas de sequía, debido a condiciones climáticas caracterizadas por temperaturas muy elevadas, mínima humedad y vientos de regular presencia [32].

3.4 Procesos de combustión no tecnificada en sitios de disposición final:

Los sitios de disposición final como estrategia antrópica utilizada para la eliminación de residuos sólidos generan diferentes problemáticas, el cual requiere un enfoque especial y de estudio a los

procesos de combustión o quema no controlada que se presentan con frecuencia en dichos lugares. Es difícil determinar con precisión las causas de incendios o procesos de combustión en rellenos sanitarios y botaderos a cielo abierto, ya que hay numerosos factores diferentes que contribuyen a su formación. La combustión o incendio no controlado en un vertedero contempla factores que influyen en la incidencia y duración de estos eventos, se sabe que el 20% de los incendios se producen debido a los residuos con alto poder calorífico y que aproximadamente el 5% de los procesos de combustión se forman de manera espontánea [33].

La combustión se distingue de otros procesos de oxidación lenta, por ser un proceso de oxidación rápida y con presencia de llama; a su vez, también se diferencia de otros procesos de oxidación muy rápida (detonaciones, deflagraciones y explosiones) por obtenerse el mantenimiento de una llama estable. Para que la combustión tenga lugar han de coexistir tres factores: combustible, comburente y energía de activación. Estos factores forman el denominado triángulo de combustión, en el cual si falta alguno de los vértices la combustión no puede llevarse a cabo [26].

Los procesos de combustión interna no controlados en un sitio de disposición final de residuos sólido, pueden generarse por diversas actividades ya sean de manera natural como se expresa anteriormente y de forma antropogénica dado a la quema de materiales dentro del lugar. Los rellenos sanitarios y botaderos a cielo abierto constantemente presentan dentro de su dinámica procesos de combustión, la cual debe ser controlada con el propósito de evitar su propagación hacia otros lugares, atenuando problemáticas ambientales y de salud pública con referencia a estos eventos.

Los procesos de combustión se pueden presentar dentro de un sitio de disposición final de manera superficial o subterránea, por lo general, ocurren cuando no se presenta una buena operación del lugar.

Los monitoreo y seguimiento a los procesos de combustión en sitios de disposición final son sumamente importantes para prevenir incendios en estos lugares y también para verificar que el incendio se haya extinguido. Se presenta la relación entre las condiciones del sitio de disposición

final con la Temperatura y el Monóxido los cuales son indicadores relevantes para identificar un proceso de combustión.

Tabla 2. Rangos indicadores de incendio según concentración de CO en PPM. [34]

CONCENTRACIONES DE CO (PPM)	CONDICIONES DEL SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL
0-25	Sin indicación de incendio
25-100	Área posible incendio en el sitio de disposición final.
100-500	Posible presencia de materiales ardiendo lentamente en las inmediaciones
500-1000	Posibilidad de reacción exotérmica o incendio
>1000	Incendio en el área.

Nota: Indicadores de incendios según concentración de CO en sitio de disposición final.

Tabla 3. Rangos indicadores de incendio según la temperatura en °C. [34]

TEMPERATURA	CONDICIONES DEL SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL
< 55°C	Temperatura normal del relleno
55°C - 60°C	Actividad biológica elevada
60°C – 70°C	Actividad biológica anormalmente elevada
>70°C	Posibilidad de incendio en el relleno sanitario

Nota: Indicadores de incendios según concentración de Temperatura en sitio de disposición final.

3.4.1 Procesos de incendios

Los incendios en los vertederos de basura, representan un riesgo permanente que enfrenta el personal responsable de su operación, los ciudadanos o habitantes de lugares aledaños y en general toda la ciudadanía, para el caso del morro de Moravia, corresponde a las instituciones del

Municipio de Medellín, la ciudadanía en general y los investigadores que propende por implementar medidas eficaces para intervenir y en su mejor dimensión ejecutar acciones que eviten eventos como estos. Para ello se requiere contar con la preparación y los implementos necesarios para controlarlos en el menor tiempo posible.

Este tipo de siniestros son habituales en tiraderos a cielo abierto por la amplia exposición de basura sin cobertura alguna y aunque también pueden presentarse en rellenos sanitarios, cuando son bien operados, es remoto que se presenten.

Los incendios en los vertederos pueden causar daños graves a su infraestructura, además de poner en riesgo la salud y la integridad física del personal que ahí labora, tanto por el propio evento como por la radiación resultante y por las emisiones generadas de monóxido de carbono que pueden ser muy agresivas cuando no es controlado en poco tiempo.

En el cerro de Moravia, se han reconocido diferentes escenarios que pueden obrar en favor de la aparición de incendios, de acuerdo con Sánchez [11]. cuando en un lugar se generan las condiciones explícitas, se requiere poner especial atención para controlar y eliminar cualquier conato de incendio que pudiera derivar de un siniestro de graves consecuencias, cuando no se atienden convenientemente.

Adicionalmente, La International Solid Waste Association (ISWA) [29] , clasifica a los incendios en los vertederos de la siguiente manera:

- Nivel 1: Incendios pequeños de residuos que pueden dominarse con recursos propios del sitio dentro de las 24 horas iniciales y extinguirse por completo en 48 horas
- Nivel 2: Aquellos que en términos generales involucran cantidades menores a 200 m³ de material, pudiendo tener una duración de hasta una semana.
- Nivel 3: Incendios que pueden llegar a tener una duración de hasta dos semanas, interviniendo cantidades de materiales que varían entre 200 y 500 m³.
- Nivel 4: Incendios grandes o que se asientan profundamente en los vertederos, cuyo control requiere de más de dos semanas, pudiendo combustionar cantidades de materiales que habitualmente rebasan los 5000 m³.

La aparición de incendios en los vertederos de basura, se deben a situaciones multifactoriales; sin embargo, basta una fuente de ignición con el calor suficiente para encender el material inflamable y mantener la combustión, como pueden ser cenizas calientes, chispas, combustión espontánea, reacción química e incluso la provocación dolosa [29]. Esta situación se potencializa en las temporadas de sequía, debido a condiciones climáticas caracterizadas por temperaturas muy elevadas, mínima humedad y vientos de regular presencia.

Basado en lo dicho con anterioridad, los procesos de combustión dentro de un sitio de disposición final se clasifican de la siguiente manera:

Incendios o procesos de combustión superficiales

Se originan en las secciones activas del vertedero, donde los residuos se depositan diariamente [35]. Son comúnmente de baja temperatura, lo cual genera emisiones de humo denso y productos de combustión incompleta.

Los siguientes factores pueden ser considerados como posibles fuentes de ignición o causas desencadenantes de un fuego de superficie:

- Incendios provocados.
- Vertido de residuos calientes o materiales que arden sin detectar, por ejemplo, fusión
- La quema “efecto de cristal” en el caso del vidrio, ocurre en laderas orientadas de la escoria, ceniza. hacia el sol.
- La ignición espontánea por procesos de descomposición bioquímica.
- Incendios accidentales asociadas con control de biogás o sistemas de ventilación.
- Incendios deliberados ocasionados por el operador del relleno sanitario para reducir el volumen de desechos o residuos verdes

Incendios o procesos de combustión interna

Los procesos de combustión interna en sitios de disposición final se generan por debajo de la superficie del vertedero e implican que son elemento de mucha edad [36]. A menudo estos eventos profundos o arraigados son muy complejos en términos de detección, control y extinción.

Factores que confirman que existe combustión al interior de los residuos:

- Humo u olor que emana del sistema de extracción de gas o vertedero.
- Los niveles elevados de CO superiores a 1.000 partes por millón (ppm).
- Aumento de la temperatura del gas en el sistema de extracción (por encima de 140 ° F) [37].

Los sitios de disposición final de manera constante evidencian problemáticas de combustión de la masa de residuos, los cuales deben ser controlados con el objetivo de evitar afectaciones a la comunidad y al mismo medio ambiente. Basado en lo anterior, a nivel mundial existen diferentes metodologías y medidas de control para estos eventos ocurridos. Según Patrick Foss-smith experto en el control de incendios en rellenos sanitarios, argumenta que alrededor de 8300 incendios por año en los Estados Unidos y 300 en el Reino Unido son generados en los sitios de disposición final y son controlados con diferentes procesos técnicos [38].

3.4.2 Afectaciones ambientales y a la salud en los procesos combustión no controladas en sitios de disposición final.

A pesar de que las actividades en combustión han ido disminuyendo con el paso del tiempo, este proceso es todavía uno de los más importante en ingeniería porque la mayor parte de la producción mundial de energía se hace por combustión de petróleo, carbón y gas natural. En ese orden de ideas, se debe considerar que la importancia de este proceso se explica no solamente por los procesos de combustión controlada de los recursos primarios usados en la producción de trabajo y calor, sino también en los procesos de combustión incontrolada [39].

Se debe reconocer que el proceso de combustión es fácil de realizar porque tiene la capacidad de generar mucha entropía y, por ende, su viabilidad es muy alta debido a la capacidad de generar altos niveles de energía desde la transformación de los enlaces químicos a energía térmica de las partículas producidas. A pesar de la importancia que tienen los procesos de combustión en las prácticas cotidianas, se debe reconocer que este procedimiento es de difícil comprensión debido a cuatro motivos:

- a) Es un proceso estudiado multidisciplinariamente (termoquímico-fluido dinámico) fuertemente acoplado,
- b) Los procesos de transporte de especies y calor (fenómenos de no equilibrio) son dominantes,
- c) La fuerte exotermicidad da lugar a altas temperaturas, enormes gradientes (llama), e importantes fuerzas de flotabilidad por dilatación diferencial,
- d) Los enormes gradientes espaciales y los cortos tiempos de residencia en ellos provocan estados de no equilibrio local (quimioluminiscencia, ionización) [39].

En el mismo orden de ideas, se debe considerar que el vasto uso de los procesos de combustión en actividades diarias ha generado la necesidad de analizar los impactos que tiene este procedimiento al utilizar la combustión como un mecanismo para el control de los materiales de desecho (incineración) debido a los efectos adversos en materia medioambiental que se pueden generar. Los procesos de combustión de los desechos sólidos urbano son una práctica generalizada en algunos países de América Latina, Europa, Asia y Estados Unidos, sin embargo, este procedimiento representa potenciales daño al medio ambiente y a la salud de los individuos por la producción de emisiones altamente tóxicas al aire y la liberación de nano partículas tóxicas [39].

Considerando los efectos nocivos de los procesos de combustión en la incineración de desechos sólidos urbanos, muchas industrias dedicadas a esta actividad han empezado a desarrollar propuestas que permitan reducir las emisiones de dioxinas gracias al avance en cuanto al diseño, operación y monitoreo de las plantas de incineración. No obstante, se debe considerar que no todas las plantas tienen estas particularidades y por ello, este procedimiento se ha considerado como uno

de los procesos más preocupantes porque desde el año 2000 la cantidad de nano partículas de los incineradores ha tenido un crecimiento sustancial [40].

La principal preocupación en las emisiones de estos gases que se generan en el proceso de combustión de los desechos sólidos produce partículas con un tamaño menor al micrómetro de diámetro altamente contaminante y que además representan un riesgo alto para la salud humana. Aunado a lo anterior, se debe considerar que los elementos resultantes de la combustión a alta temperatura (característico de la incineración de los desechos urbanos) son más preocupantes debido a que este proceso genera nano partículas más tóxicas que incluyen los pigmentos o estabilizadores en diversos tipos de plástico, así como compuestos que tienen presencia de cloro o bromo usados en retardantes de flama [40].

Así mismo, el proceso de combustión e incineración de los desechos también genera preocupación, especialmente porque existen residuos que contienen más de 1% de sustancia organocloradas y si las condiciones de incineración no son adecuadas, existe la posibilidad de que se formen dioxinas y otros compuestos orgánicos persistentes y bioacumulables, tales como el hexaclorobenceno y hexaclorohexano que tienen un alto impacto para la salud humana y los elementos naturales. Adicional a lo anterior, se debe reconocer que los procesos de combustión en la incineración de los desechos sólidos urbanos también concentran algunos metales pesados como el caso del plomo y mercurio conociéndose los efectos a la salud, principalmente al sistema nervioso. Efectivamente, algunos estudios han encontrado que los trabajadores de incineradores tienen un aumento de contraer cáncer pulmonar en 3.5 veces, 1.5 veces por cáncer de esófago, de 2.5 veces de incremento de mortalidad por cáncer gástrico y un incremento en la tasa de mortalidad por enfermedad isquémica del corazón [40].

En virtud de lo anterior, un adecuado proceso de gestión de los residuos sólidos urbanos se constituye como una necesidad actual para optimizar los procesos de gestión debido a que el volumen de desechos que se produce actualmente es alto y los mecanismos actuales de su manejo presentan una serie de falencias que se deben analizar cuidadosamente para mitigar los impactos negativos tanto en el medio ambiente como la salud humana [41].

En ese contexto, en el morro de Moravia tiene que presentarse estos factores para que se produzca el proceso de combustión, si el triángulo está incompleto el fuego no ocurrirá, Ahora bien, cuando una sustancia se calienta sin llegar a la combustión, se generan gases y vapores, los cuales al combinarse con el oxígeno del aire y en presencia de una fuente de ignición, arden. Es decir, se reconoce una reacción endotérmica, ya que hemos necesitado de un cierto aporte de calor para que se lleve a cabo. Sin embargo, una vez que los vapores y gases se queman, hay desprendimiento de calor, convirtiéndose en una reacción exotérmica. Si la cantidad de calor no da para que haya más desprendimiento de gases y vapores, la reacción termina y el fuego se extinguirá. Pero si la cantidad de calor generado se mantiene, el material combustible seguirá consumiéndose y desprendiendo vapores que se combinarán con el oxígeno, se inflamarán y el fuego aumentará [41].

3.5 Medidas de control en procesos de combustión en sitios de disposición final de residuos sólidos.

Los incendios en sitios de disposición final son un problema continuo y complejo, ya que representan una amenaza al medio ambiente y a la salud humana. Usualmente los procesos de quema o combustión no tecnificada, son causados deliberadamente o por espontaneidad en la masa de residuos. El peligro y nivel de toxicidad de los contaminantes emitidos depende de la duración o la exposición a ellos y el tipo de material que está ardiendo. Por lo tanto, es necesario estudiar estos incendios y su potencial efecto sobre la salud humana [42].

La extinción de incendios profundos y/o internos, generalmente está más allá de la capacidad del sitio de disposición final más común, y tratar de desenterrarlos con un proceso inadecuado puede empeorar la situación al admitir aire y exponer sustancias peligrosas previamente enterradas o encerradas. En el caso de un incendio profundo, el área debe ser revisada diariamente por el operador del sitio de disposición en busca de calor, humo, grietas, hundimiento y monóxido de carbono [43].

Las medidas de extinción de incendios deben ponerse en marcha antes de que se produzca un avance significativo del incendio. Es necesario aislar el área para evitar que un incendio profundo se propague aún más. Se deben excavar zanjas profundas más allá del área en llamas y rellenarlas

inmediatamente con arcilla para crear una barrera alrededor del fuego. Puede ser posible extinguir incendios profundos bombeando un gas inerte (por ejemplo, nitrógeno). Para los seguimientos de los métodos de eliminación de procesos de incendios deben ser con monitoreos constantes, en particular, el control del CO y de la temperatura es invaluable para poder declarar un incendio completamente extinguido [43].

La guía bibliográfica de la Internacional Solid Waste Association (ISWA, por sus siglas en inglés) con sede en Copenhague y la Environmental protection Agency (EPA, por sus siglas en inglés) con sede en U.S.A, proponen dentro sus guías metodologías estrategias que se pueden emplear para la solución de problemas de combustión interna en un sitio de disposición de RSU. A demás teniendo en cuenta estudios realizados a nivel mundial Según lo establecido por la ISWA, se han implementado los siguientes métodos de extinción para para solución a las problemáticas de combustión interna en sitios de disposición final; **Supresión de Oxígeno, aislamiento de la zona de combustión, excavación y reacondicionamiento, aplicación de agua y Infiltración de un gas en la zona de combustión** [42].

4 METODOLIGÍA

Este trabajo de investigación se enmarca en el proyecto “*ACCIONES PARA LA HABILITACIÓN AMBIENTAL DEL MORRO DE MORAVIA*”, cofinanciado por la Secretaría de Medio Ambiente del municipio de Medellín y la Universidad de Antioquia. El Morro de Moravia se seleccionó como el sitio para el desarrollo de esta investigación, debido al trabajo constante que ha realizado el GIEM (Grupo Interdisciplinario de estudios moleculares) de la Universidad de Antioquia en avance de este proceso de habilitación ambiental. El diseño metodológico de la presente investigación se divide en dos partes. La primera incluye el enfoque, alcances y métodos con los respectivos instrumentos y técnicas que fueron empleadas para el desarrollo de la investigación. En la segunda parte se menciona la metodología implementada para la ejecución de cada objetivo planteado en el plan de trabajo.

4.4 Enfoque

La presente investigación se enmarcó bajo un enfoque mixto, ya que contiene elementos tanto cuantitativos como cualitativos que fueron planteados desde una perspectiva teórico práctica, el enfoque cuantitativo se aplicó al realizar y definir los métodos para la medición de gases, temperatura, se analizaron las variables de estudio implícitas en los objetivos uno, tres y cuatro, con el fin de mitigar los impactos ambientales de los procesos de combustión interna en el Morro Moravia en la ciudad de Medellín.

El enfoque cualitativo se seleccionó con el fin de dar cumplimiento al objetivo número dos que estableció la realización de una búsqueda bibliográfica de las posibles medidas de control para procesos de combustión interna, adicional a la búsqueda de conceptos, propiedades, aplicaciones del mismo. En ese orden de ideas, Sampieri [44] establece que la investigación cualitativa se analizan situaciones naturales, pretendiendo dar sentido o encontrar los fenómenos en los términos del significado que los individuos o profesionales otorgan. La investigación cualitativa ocupa el estudio, uso y recolección de una variedad de materiales empíricos estudio de caso, textos e investigaciones [44].

Paralelamente la búsqueda de bibliografía aportó para construir un compilado teórico importante y así contribuir de acuerdo con los resultados, la identificación de la medida de control más eficaz para alcanzar.

4.5 Tipo de Investigación

La presente investigación se encaminó hacia un tipo descriptivo, debido a que permite mostrar con precisión las variables del fenómeno a que se estudió, con el desarrollo de cada uno de los objetivos planteados y a partir de la aplicación de instrumentos y métodos de cuantificación se recolectaron datos e información pertinente y suficiente para implementar una medida de control ambiental para el Morro Moravia, analizar la situación actual del morro permitió plasmar las observaciones realizadas, de la misma manera, el tipo de investigación descriptivo permitió mostrar los posibles eventos asociados a la situación del morro, las investigaciones y estimaciones que se han realizado previamente, así como el desarrollo de propuestas y estrategias planteadas por otras investigaciones que aportan al presente trabajo.

4.6 Método

Se implementó el método deductivo, puesto que la investigación se planteó con el reconocimiento de un problema establecido, y a partir de ello se estableció la idoneidad de la identificación de la medida de control ambiental, debido a que es necesario partir del problema general al particular, el método deductivo en ingeniería permite trabajar sobre realidades de hecho y su característica fundamental es la de presentar una interpretación correcta [44].

4.7 Área de estudio

4.1.1. Localización Área de estudio

El estudio se desarrolló en la zona nororiental de la ciudad de Medellín, en el sector conocido como morro de Basuras de Moravia (Ver fig. 3 y 4) correspondiente a la comuna 4 del barrio Moravia. El lugar se encuentra ubicado a los 6° 13' de latitud Norte y a los 75° 34 de longitud Oeste [11].

Se generaron asentamientos humanos directamente sobre su superficie, alrededor de 17.000 personas habitaban este lugar en un área de 7,6 has, distanciado a 40 m de la riera del rio Medellín y Posee un suelo de composición heterogénea producto de la disposición de residuos provenientes de la ciudad [12] . Desde el año 1984 se han desarrollado diferentes intervenciones que han modificado de manera parcial o permanente las condiciones, resaltando los proyectos encaminados en la habilitación del lugar [45].

Estas acciones se han adelantado atendiendo la baja calidad de vida de los habitantes y la obvia amenaza representada por el Morro de basuras que motivó esfuerzos municipales, nacionales e internacionales, en los que se determinó el requerimiento de varias medidas de restauración del barrio [4], unas de las medidas de control ejecutadas exigían el control de la contaminación y el establecimiento de programas de orden social para el beneficio de las más de 7500 familias habitantes del antiguo botadero, reconociendo que en estudios previos se identificó la presencia de gases tóxicos (cianuros, sulfuros y metano) y altos contenidos de metales pesados (determinación en lixiviados) en diferentes puntos de muestreo en el Morro de basuras.



Fig. 3. Ubicación del barrio Moravia en Medellín [12].



Fig. 4. Ubicación Morro de Moravia en el barrio[12].

4.2. Metodología por objetivo específico

4.2.1 Metodología Objetivo 1

Para la caracterización del proceso de combustión se llevó a cabo un monitoreo y el respectivo registro de resultados obtenidos.

Con lo anterior, se planteó el desarrollo de tres fases metodológicas, relacionadas directamente en la definición y delimitación del área de influencia de la investigación, las cuales son descritas a continuación:

Etapa pre-campo:

En esta etapa se colectó la información de diversas fuentes como: identificación y análisis de trabajos de investigación, publicaciones y documentos relacionados con la matriz de residuos y la cartografía existente del Morro de Moravia. A partir de ello, los datos recopilados configuraron el punto de partida para establecer cuáles han sido los antecedentes técnicos y el estado actual por cada componente del área de interés. Paralelamente, en esta etapa también se identificaron que tipo de información y criterios técnicos y de evaluación incidieron en la trascendencia de los impactos que fueron identificados.

Etapa de campo

Para la etapa de campo, se incluyeron todas las actividades encaminadas a la validación de la información recolectada en las etapas previas. Se efectuaron recorridos con el objetivo de observar en las áreas de ampliación puntos asociados a los procesos de combustión como residuos expuestos, grietas e inestabilidad, que presenten facilidad para la infiltración de Oxígeno “O₂” “al interior de la masa de residuos. Las actividades anteriormente mencionadas, se llevaron a cabo en su totalidad, se evidenciaron los puntos de acceso y demás áreas que conforman la zona suroccidental del Morro de Moravia, para puntualizar las diferentes anomalías presentadas.

En virtud de lo anterior, se realizó un reconocimiento de área a nivel interdisciplinario de acuerdo con la información suministrada por habitantes de la zona y componentes evaluados. En cada área, se procedió a registrar dimensiones del área, hallazgos superficiales en la matriz de residuos (aparición de grietas, hundimientos, desmoronamiento de sustrato y estructuras en concreto, salida de humo y gases del interior de la masa de residuos, presencia de llamas y residuos expuestos), registro fotográfico y ubicación geoespacial de las áreas, así mismo se llevaron a cabo actividades como el control del campo, su respectivo reconocimiento y registro fotográfico para ejecutar el levantamiento de información primaria y estipular la validación de criterios (Ver Fig. 5).

Finalmente, conviene mencionar que cada uno de los criterios en esta etapa fueron verificados y calculados cuando se programaron las visitas a la zona, ajustando de esta manera algunas modificaciones que se establecieron para delimitar el área y en consecuencia su correlación con la propagación de los posibles impactos.



Fig. 5. Recorridos e inspecciones Morro Moravia

Etapa post campo

En la última fase, y con la información topográfica, el trabajo de campo y las condiciones ambientales de la zona de estudio, se procedió a interpretar los resultados, la evaluación de criterios y se consideraron las variables y parámetros asociados a los procesos de conflagración y/o combustión en sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos. Con la información procesada, se seleccionaron 4 (cuatro) áreas problema ubicadas en la zona sur del Morro de Moravia, las cuales fueron evaluadas con base en los criterios:

- aparición de grietas,
- hundimientos
- desmoronamiento de sustrato y estructuras en concreto
- salida de humo y gases del interior de la masa de residuos
- presencia de llamas
- residuos expuestos

Las mediciones de las áreas se obtuvieron por medio de “GPS” recorriendo el perímetro de cada una de las zonas identificadas. Dichas áreas se llevaron a un sistema de información geográfica (ArcGis) para realizar los polígonos respectivos sobre cada área, en el cual se determinó su ubicación geoespacial en la zona de influencia del Morro de Moravia, como lo muestra la tabla 4 y la Fig. 6.

Tabla 4. Dimensiones áreas.

Número de área	Dimensión del área m ²
Área No 1	630
Área No 2	1677
Área No 3	1178
Área No 4	2500

Nota: Se enumeran cada una de las áreas basadas en los enfoques de dimensión reconocidos.

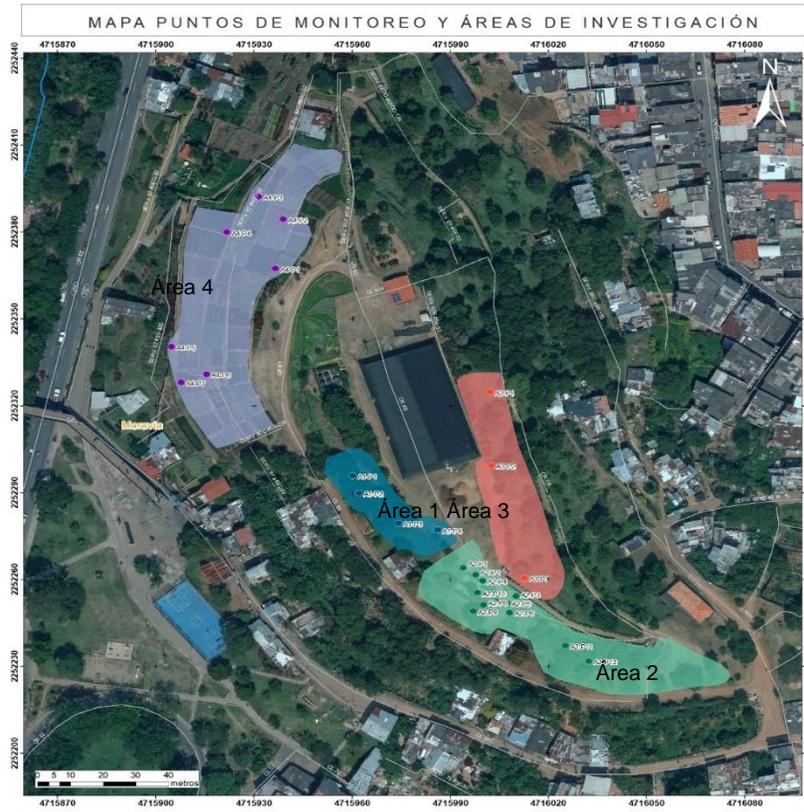


Fig. 6. Áreas de investigación

4.2.2. Metodología Objetivo 2

El desarrollo de este objetivo se realizó en 3 etapas, las cuales se describen a continuación:

- a) **Etapa 1. Selección términos de búsquedas;** se realizó la selección de los términos de búsquedas de la información, esta se efectuó utilizando los términos y palabras claves asociados a los procesos de combustión y/o incendios internos en sitios de disposición final de residuos sólidos. En la tabla 2 se observa los términos seleccionados para la búsqueda de la información.

Tabla 5. Criterios de búsqueda bibliográfica

Palabras claves en español	Palabras claves en inglés
Incendios en rellenos sanitarios	Landfill fires
Combustión interna en rellenos sanitarios	Internal combustion in landfills
Métodos de Control de combustión interna en rellenos sanitarios	Internal combustion control methods in landfills

Nota. Los criterios establecidos previamente fueron los principales conceptos de búsqueda, pero se incluyeron otros términos para obtener mayor bibliografía.

- b) **Etapa 2. Búsqueda de la información;** Una vez seleccionados los términos de búsqueda, en segunda instancia, se realizó la consulta de la información. Para ello, se utilizaron bases de datos bibliográficas, donde se buscaron elementos de interés como artículos académicos, investigaciones de posgrados relacionadas y antecedentes exitosos a nivel mundial, documentos y estudios. Lo anterior se realizó, con el fin de identificar medidas de control ambiental en procesos de combustión interna no controlada en rellenos sanitarios u botaderos a cielo abierto, además de información sobre los rasgos asociados a un proceso de combustión, diagnóstico de un procesos de combustión, mediciones y monitoreo de parámetros fisicoquímicos de los proceso de combustión, métodos de cálculos y dimensionamiento de las medidas de control ambiental, materiales y elementos utilizados para los procesos de control, beneficios y valoración ambiental, efectividad de las metodologías e información relacionada con los costos operacionales de cada una de las medidas identificadas.
- c) **Etapa 3. Filtro de la información;** Realizada la etapa 1 y etapa 2, se ejecutó una filtración de información de los elementos de interés como artículos académicos, investigaciones de posgrados relacionadas y antecedentes exitosos a nivel mundial sobre control de combustión interna en masa de residuos, lo que permitió tener un amplio conocimiento para poder analizar y comprender estos eventos en sitios de disposición final, coadyuvando a la identificación de las estrategias de control existentes para el proceso de combustión interna, ajustándolas a las condiciones del Morro de Moravia. De igual manera, las estrategias identificadas serán valoradas en costo beneficio para analizar su alcance.

Para esta etapa, se obtuvieron como resultado la identificación de las estrategias de control existentes para el proceso de combustión interna, ajustándolas a las condiciones del Morro de Moravia. De igual manera, las estrategias identificadas fueron valoradas en costo beneficio para analizar su alcance.

4.2.3. Metodología objetivo 3

El alcance de esta matriz se enfocó en evaluar los impactos ambientales de cada una de las medidas de control ambiental identificadas y seleccionar cuantitativa y cualitativamente una (1) medida de manejo ambiental para el control de los procesos de combustión interna en la masa de residuos del Morro de Moravia- Medellín, teniendo como objetivo, mitigar, mejorar y corregir los efectos ocasionados por la emisión de estos gases ,mejorando las condiciones ambientales y aumentando la calidad de vida y salud de las personas que habitan el sector.

Las metodologías de valoración cualitativa son ampliamente utilizadas y se fundamentan en el uso de atributos o cualidades con los cuales se pueden calificar los impactos de cada una de las alternativas de un proyecto, asignando valores prefijados según esa cualidad sea alta, media o baja. Los valores obtenidos para cada impacto pueden volver a reflejarse en una matriz de cruce entre acciones y factores, denominada matriz de importancia [46]

Las matrices, consisten en tablas de doble entrada útiles para la identificación de impactos a través de la interacción de los factores ambientales con las acciones del proyecto. Presentan la información en forma de matriz determinando así relaciones causa- efecto entre acciones e impactos [46].

Se implementó la metodología de valoración de impactos propuesta por Víctor Conesa Fernández, en su libro *Guía Metodológica para la Evaluación de Impacto Ambiental (2010)*, con algunas modificaciones propias de acuerdo a la necesidad de la evaluación. El enfoque de la metodología fue mixto entre datos cualitativos y cuantitativos, para definir las afectaciones ambientales y sociales de las medidas a valorar.

Se evaluaron las variables ambientales que pueden tener modificaciones y ocasionar efectos negativos al recurso natural, permitiendo realizar acciones medioambientales integradoras que contribuyeron a la concepción de una eficiente medida de control y mitigación ambiental para los procesos de combustión presentes en el Morro de Moravia.

Se caracterizaron los factores abióticos, bióticos y socioeconómicos y su incidencia en cada una de las medidas a evaluar.

Se evaluaron los impactos ambientales que ocasionaría el desarrollo o implementación de cada una de las medidas evaluadas. Con el fin de determinar la más indicada para mitigar los efectos de la implementación.

Según el Decreto 2820(2010), un impacto ambiental es cualquier alteración en el sistema ambiental biótico, abiótico y socioeconómico, que sea adverso o beneficioso, total o parcial, que pueda ser atribuido al desarrollo de un proyecto, obra o actividad [47].

Teniendo en cuenta el área de influencia o estudio, se identificaron los componentes, aspectos y factores (medios abiótico, biótico y socioeconómico), que han sufrido o podría sufrir alteración durante el desarrollo de las actividades del proyecto como se observa en la tabla 6.

Tabla 6. Variables para la determinación del impacto

VARIABLES A EVALUAR PARA DETERMINAR EL IMPACTO				
MEDIO	COMPONENTE	ASPECTO	FACTOR	IMPACTO
ABIÓTICO	Suelos	Generación de erosión	Calidad del suelo	Cambio en las propiedades físico - químicas
				Generación de sedimentos
		Generación de vertimientos domésticos e industriales	Contaminación del suelo	Perdida de nutrientes para las plantas
		Generación de residuos	Uso del suelo	Cambio de uso del suelo
	Atmósfera	Generación de gases y material particulado	Calidad del aire	Deterioro o cambio en la calidad del aire, polvo
		Generación de olores	emisión de gases a la atmosfera	Perjuicios a la salud y disminución de la calidad de vida
	Agua	Consumo de agua	Calidad del agua superficial	Alteración de la calidad del agua
			Disponibilidad del agua superficial	Disminución del recurso hídrico
		Alteración de coloraciones y generación turbidez sobre las fuentes de agua	Pérdida de las cualidades organolépticas del agua	Disminución de la calidad física del agua.

VARIABLES A EVALUAR PARA DETERMINAR EL IMPACTO					
MEDIO	COMPONENTE	ASPECTO	FACTOR	IMPACTO	
	Paisaje	Creación de geoformas diferentes a las naturales	Generación de impacto visual	Modificación paisajística	
			Estructura del Paisaje	Modificación de las condiciones visuales y paisajísticas	
BIÓTICO	Ecosistemas Terrestres (flora y fauna)	Alteración del ecosistema terrestre	Poblaciones de flora	Alteración de la calidad del hábitat de las especies presentes	
			Cobertura vegetal	Remoción de la capa vegetal	
			Hábitat	Modificación del hábitat generando cambio en la composición y estructura de las comunidades de aves, insectos y roedores del sitio	
			Servicios base de la fauna	Pérdida de biodiversidad	
Socioeconómico y Cultural	Demografía/Población	Generación de empleo	Flujos migratorios	Cambio sobre el componente demográfico	
		Generación de expectativas	Incremento de los ingresos económicos	Cambio en las actividades económicas	
		Interrupción de actividades recreativas en el sitio	Disminución de espacios de esparcimiento	Alternativas para mejoramiento de las condiciones de vida	
	Procesos Económicos	Generación de ingresos	Condiciones de salud de la población	Deterioro de la calidad de vida	
			Incremento del valor del suelo	Mejoramiento de la salud en la población	
		Aumento de la economía (capacidad adquisitiva)	Actividades productivas	Cambio económico por modificación en el uso del suelo	
	Dimensión Espacial		Infraestructura de transporte, conectividad y estructuras civiles	Cambio en los ingresos de la población	
			Generación de espacios para la comunidad	Cambio en la dinámica económica local	
	Político organizativo		Relaciones entre actores sociales e institucionales	Organizaciones sociales y acciones colectivas	Cambios en el acceso y la movilidad
					Mayor presencia de población en el disfrute de los espacios
				Apoyo de ONG y entes descentralizados para motivar investigaciones, estudios en la zona	

A partir de esta caracterización ambiental, se identificaron y calificaron impactos ambientales positivos y negativos; los impactos ambientales positivos, representan una mejora en las cualidades intrínsecas de los componentes del medio físico, contribuyendo a aumentar su complejidad orgánica funcional y su estabilidad regional. Los impactos ambientales negativos, suponen un empeoramiento de las condiciones naturales del medio físico, favoreciendo su desestabilización y conduciéndolo hacia una mayor simplicidad funcional concretada en una disminución de la riqueza biológica y de las relaciones ecológicas de autorregulación. Para calificar la matriz de impactos se tomaron como base los siguientes parámetros a los que se les asignó un valor numérico para determinar el grado de afectación:

Tabla 7. Valoración de impactos

PARAMETROS	VALORACION CUALITATIVA	VALORACION CUANTITATIVA
NATURALEZA	Positivo	.+
	Negativo	.-
INTENSIDAD	Leve	1,2,3
	Moderado	4,5,6
	Fuerte	7,8,9,10
EXTENSION	Puntual	1,2
	Parcial	3,4,5
	Extensa	6,7,8,
	Total, o critica	9,1
SINERGISMO	Sin sinergias aparentes	1
	Con sinergias poco importantes	2,3,4
	Con sinergias importantes	5,6,7
	Sinergias catastróficas	8,9,10
REVERSIBILIDAD	Reversibilidad sin dificultad	1,2
	Reversibilidad con dificultad	3,4
	Reversible con medidas	5,6,7
	Irreversibles	8,9,10
PERSISTENCIA	Fugaz	1,2,3
	Temporal	4,5,6
	Permanente	7,8,9,10
OCURRENCIA O EFECTO	Directo	1,2,3
	Indirecto	4,5,6
	Acumulativo	7,8,9,10
PERIODICIDAD	Irregular o discontinuo	1,2,3
	Periódico	4,5,6
	Continuo	7,8,9,10
RECUPERABILIDAD	De manera inmediata	1,2
	A mediano plazo	3,4
	Mitigable	5,6,7
	Irrecuperable	8,9,10

Nota: Criterios valoración de impactos

Una vez identificados los impactos ambientales y determinados sus parámetros, con la implementación de la Matriz de valoración de impactos y la clasificación de impactos como se muestra en la tabla 8, se procede a la caracterización y valoración de los mismos de acuerdo con las observaciones realizadas en el sitio. Los resultados de este proceso pueden ser cualitativos o cuantitativos.

Luego que los impactos son caracterizados y valorados con el procedimiento anteriormente descrito, con los datos de la matriz de impactos se procede a su evaluación y clasificación.

La evaluación de los impactos ambientales se realizó a partir del cálculo del Impacto total (It) según la ecuación siguiente:

$$I_t = 3IN + 2EX + PE + RV + SI + EF + PR + RB \quad (1)$$

Donde;

N: Naturaleza I: Intensidad E: Extensión o importancia. S: Sinergismo
 R: Reversibilidad. EF: Ocurrencia o efecto PE: Persistencia P: Periodicidad

Para definir la medida de control ambiental que presentó la menor cantidad de impactos negativos y la mayor cantidad de impactos positivos al ambiente y a la comunidad, se realizó una tabla de calificación de impactos donde se determinaron cuáles son los más irrelevantes en la afectación que pueden generar al ambiente, cuáles son los que presentaron impactos moderados y controlables en el tiempo para el ambiente, así como para la comunidad aledaña y cuales impactos son severos y por tanto no son reversibles para mejorar las condiciones en el ambiente.

Tabla 8. Clasificación de impactos

TABLA DE CLASIFICACIÓN DE IMPACTOS		
IMPACTO TOTAL CALCULADO	CATEGORÍA DE CLASIFICACIÓN (-) / (+)	REQUERIMIENTOS DE LA CLASIFICACIÓN
$I_t \leq 25$	Irrelevante, compatible con el ambiente	Leve, local, directo, primario, reversible, sin sinergias, se recupera a corto plazo.
$25 < I_t \leq 50$	Impacto moderado	Leve, primario, reversible con dificultad sin sinergias aparentes, se recupera a mediano plazo.
$50 < I_t \leq 75$	impactos severos	Moderada intensidad, regional, reversible con dificultad y medidas correctoras, con algunas sinergias poco importantes.
$I_t > 75$	Impacto crítico	Fuerte, global o regional, acumulativo, irreversible, a largo plazo se mantiene, con sinergias importantes o catastróficas

Nota: Clasificación de impactos, categoría y requerimientos de la clasificación.

Una metodología no está exenta de sufrir transformaciones y la fórmula que se presenta no es absoluta. De acuerdo a las medidas de evaluación se determinó un rango como se observa en la tabla 8 para realizar la calificación de las variables que consideraron pueden ser evaluadas y determinar la elección de la medida.

Después de la elaboración de la matriz impacto ambiental, se realizó un análisis de precio unitario, el cual consistió en hacer un estudio de mercado de cada uno de los ítems y parámetros requeridos por cada medida de control ambiental en sus procesos de implementación (incluye mano de obra no calificada, mano de obra calificada, insumos, herramienta entre otros). Lo anterior, se ejecutó

con el fin de determinar el costo beneficio de la medida en términos económicos y relacionarlo con el resultado obtenido en la matriz de impacto ambiental. Una vez, relacionado tanto la valoración de impactos ambientales y la valoración económica, se seleccionó la medida de manejo ambiental para su construcción. Es sumamente importante mencionar, que para la adecuada implementación de la medida de control fue fundamental conocer los beneficios ambientales, sociales y económicos.

En resumen, con las medidas de control ambiental identificadas, se procedió a realizar una valoración económica ambiental de cada uno de los impactos relevantes para dar inicio a un análisis detallado de estos.

1. En primera instancia, se procedió con la selección y análisis de los impactos relevantes que pueden ser internalizados, es decir, los que pueden tener medidas de manejo, los que se pueden evitar o corregir.
2. La siguiente actividad se asoció con una revisión de los impactos significativos que pueden ser internalizados mediante las medidas de manejo o que son totalmente controlables para que estos sean incorporados como medida de manejo en la matriz de impacto ambiental.
3. Se determinaron los criterios para la selección de impactos ambientales significativos.
4. Se realizó la calificación del medio abiótico, biofísico y socioeconómico de los cambios en los servicios ecosistémicos, esta calificación se encuentra en el Anexo 1. (Calificación de la matriz de impactos ambientales).
5. Se realizó la calificación de cada una de las medidas de control ambiental por medio de la valoración de los aspectos e impactos de acuerdo al medio que se afecta.
6. El valor de importancia del impacto ambiental de cada aspecto ambiental se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$I = \pm(3IN + 2EX + MO + PE + PV + SI + AC + EF + PR + MC)$$

7. Para tener un valor evaluativo del impacto, se promedió la suma de todos impactos por componente y se determinó la cantidad de impactos irrelevantes, moderados y severos. Anexo 2.
8. Los resultados obtenidos producto de la medición en campo de los parámetros ambientales se utilizaron como insumos para la elaboración de la matriz, se incluyeron factores de evaluación

(signo, extensión, intensidad, momento, persistencia, reversibilidad, recuperabilidad, acumulación, sinergia, efecto y periodicidad) que utiliza la matriz de Conesa para la evaluación del impacto ambiental.

9. Por último, se realizó la valoración cuantitativa y económica de los impactos de acuerdo al medio y componente al que pertenecen y se graficaron las cuatro medidas ambientales en estudio con cada uno de los valores obtenidos.

4.2.4. Metodología objetivo 4

La metodología para la implementación de la medida de control ambiental sobre la cual versa el presente objetivo, se basó en los lineamientos planteados por la Agencia de Ambiental (EPA por sus siglas en inglés) y por la Asociación Internacional de Residuos Sólidos (ISWA por sus siglas en inglés) para el control de procesos de combustión en sitios de disposición, los cuales se enfocaron en las Medición de variables asociadas a los incendios (O_2 , CO , CH_4 , H_2S y Temperatura), vigilancia y observaciones constantes en campo de rasgos asociados a hundimientos, grietas sobre la masa de residuos, exposición de residuos y medidas de control a través de estabilización de laderas.

Para la implementación de la medida, se seleccionó el área donde se presentaron mayor número de rasgos asociados al proceso de combustión como: residuos expuestos, salida de gases, hundimientos y grietas.

La Fig. 7, relaciona en su área resaltada, el lugar donde se realizó la implementación de la medida de mitigación del proceso de combustión activo en el Morro de Moravia.

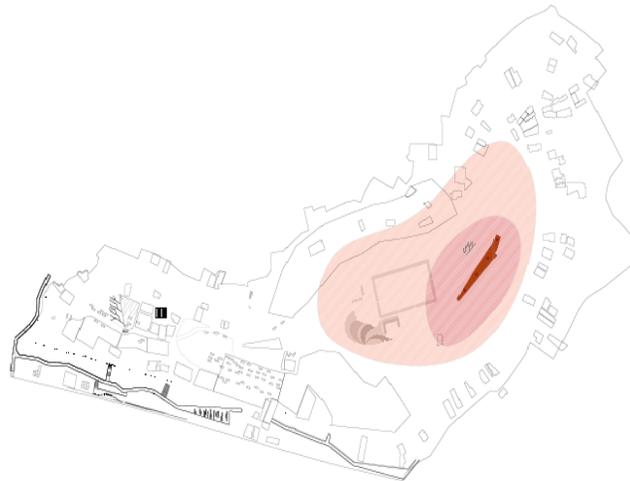


Fig. 7. Área de influencia proceso de combustión

En la fig. 7 se visualiza de manera clara la zona de influencia del proceso de combustión, la diferencia de tonos, es decir donde se resalta un rojo más pronunciado es el lugar donde se consideró que los procesos de combustión son más activos y por lo tanto es la zona donde se desarrollaron las actividades de implementación de la medida de control del proceso de combustión.

La implementación de la medida de manejo tiene diferentes procesos. A continuación, se presentan dichos procesos:

4.2.4.1 Mediciones de Pendientes y Áreas:

Pendientes: En esta actividad se realizaron mediciones en campo en la zona de influencia del proceso de combustión, dicho proceso se llevó a cabo con el propósito de conocer el desnivel del terreno para corregir los grados de inclinación y poder disponer el material de cobertura para la mitigación de la combustión en el Morro de Moravia. Con base en lo anterior, las mediciones de

pendientes tienen la importancia para evitar la pérdida de cobertura por erosión y la ubicación de la infraestructura de bioingeniería para la estabilización del área.

En este proceso se tomaron 8 secciones, las cuales fueron seleccionadas en la parte baja, media y alta de la ladera para calcular el porcentaje de inclinación o desnivel del área donde tiene influencia el proceso de combustión.

Para lo anterior, se utilizaron 2 barras metálica de aluminio de 1,50 metros cada una y un nivel de burbuja para la precisión a la hora de la toma de los datos. Las dos barras metálicas representan los parámetros de la distancia vertical (altura) y la distancia horizontal de cada sección calculada, con unidades de medida en metros. Dicho proceso fue realizado para hallar el promedio del área donde tiene influencia el proceso de combustión. La Fig. 8 relaciona claramente como fue el procedimiento realizado para el levantamiento de los datos.

Para la obtención de los datos de pendientes en cada una de las secciones, se utilizó este método de cálculo representado por la siguiente ecuación 2.

$$Pendiente (\%) = \frac{\Delta y}{\Delta x} \times 100 \quad (2)$$

Donde;

ΔX : Distancia Horizontal

ΔY : Distancia Vertical (Altura)



Fig. 8 Medición de pendientes

Posterior al cálculo del promedio de la pendiente en porcentaje de desnivel en el área de influencia del proceso de combustión, se realizó el cálculo para expresar en grados, la inclinación promedio del terreno en la zona de combustión. Lo anterior, fue realizado con el propósito conocer el ángulo de inclinación y así tomar correctivos para disminuir y evitar la pérdida de cobertura.

Para realizar la conversión de la pendiente en porcentaje a grados sexagesimales se utilizó la ecuación 3:

$$\text{Pendiente (grados)} = \text{Tan}^{-1} \frac{\text{Pendiente (\%)}}{100} \quad (3)$$

Donde:

Tan^{-1} = Arco tangente o Inversa de la tangente.

Pendiente (%) = pendiente calculada en %

Áreas: Las mediciones de las áreas se realizaron por medio de GPS, recorriendo el perímetro de cada una de las zonas identificadas, con el propósito de crear polígonos para posteriormente calcular la dimensión de las áreas.

Los datos de campo se llevaron a un sistema de información (ArcGis) para realizar los polígonos respectivos sobre cada área, ubicando puntos de interés y cálculo del área por zona trabajada. En la fig. 6 se relacionaron las áreas de las cuatro zonas identificadas y que están asociadas al proceso de combustión.

Una vez registrados los datos del proceso 1, estos fueron organizados y utilizados para el cálculo de las pendientes y áreas problema que se utilizarán para el diseño de la medida de manejo para el proceso de combustión interna en el Morro de Moravia.

4.2.4.2 Evaluación material de cobertura

Para este proceso, se diseñó un experimento para evaluar el material de cobertura, en el cual se evaluaron diferentes parámetros como pérdida del material cobertura al disponerlo, propiedades físicas (agrietamiento y desmoronamiento) y la plasticidad del material, para este último no se realizó el cálculo debido a que el proveedor entregó el dato al momento de la adquisición del material, el cual fue reportado con un índice de plasticidad de 26%. Para este proceso, se tomó un área de 72 m², la cual se dividió en 2 parcelas de 36 m² cada una y con pendiente del 65%, allí se implementaron dos tipos de cobertura; la primera fue una mezcla de cribado (30%) + lodo arcilloso (70%) y la segunda mezcla fue cribado (30%) + inerte arcilloso (70%), los cuales fueron dispuestos en diferentes parcelas. Es sumamente importante especificar que el lodo arcilloso a diferencia del inerte arcilloso posee una mayor plasticidad y mucho más fino.



Fig. 9. Implementación cobertura parcela 1 y 2

La disposición de las diferentes mezclas de cobertura, se realizó con un espesor de 30 cm, el cual contempla la resolución 0330 de 2017 (Reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico- RAS) argumentando que la capa un espesor mínimo que garantice velocidades de infiltración tan bajas que el tiempo transcurrido para que una gota de fluido atraviese la capa impermeable sea mayor a 20 años. Para lograrse, debe tenerse una masa homogénea con un contenido de humedad de 2% a 3% por encima de la humedad óptima y con un alto nivel de energía de compactación [48].

Los siguientes son los requisitos mínimos establecidos por RAS para un material de cobertura:

- Porcentaje de finos $\geq 20\%$
- Índice de plasticidad $\geq 20\%$
- Tamaño máximo de partícula en el rango de 25mm a 50mm

Si la capa de suelo no logra la permeabilidad requerida, se pueden utilizar aditivos como bentonita y caolinita. No se recomienda utilizar aditivos con altos índices de plasticidad ($I_p > 30\%$), por la dificultad que presentan en el trabajo en campo.

Para la evaluación del material de cobertura, se utilizó un método para calcular la pérdida de este, en el ensayo realizado para seleccionar la cobertura que cumpla con los parámetros ya mencionados, con el método de reconocimiento creado por la FAO en 1976 [49]. Este método tiene 2 tipos de mediciones, una es localizada y la otra es transversal, pero para el caso del Morro de

Moravia se utilizó la medición transversal como método cuantitativo para conocer la pérdida de cobertura por factores ambientales.

Este método consiste en empotrar en el suelo varillas medidoras de manera que en su parte superior se puedan "leer" los cambios en el nivel de la superficie del suelo de cada sección que desee medir. La fig. 10 muestra como es la instalación en campo de los componentes del experimento

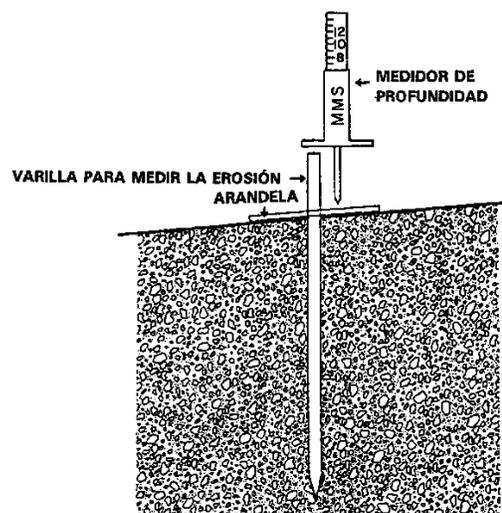


Fig. 10. Varillas para medir el cambio del nivel de la superficie. [12]

Dicha evaluación se realiza para observar comportamiento de cada material de cobertura y su retención en pendientes del 65 % de desnivel.

Para el caso del Morro de Moravia se instalaron en cada una de las parcelas 9 varillas marcadas cada cm hasta llegar a 40 cm. La varilla se enterró 35 cm, quedando por fuera 5 cm, donde cada mes se realizó una medición en cada punto instalado y se observará la pérdida de cobertura de manera cuantitativa.

Para la obtención de datos, se realizaron 5 mediciones en campo tomando medidas con un flexómetro en cada una de la varilla instalada en cada parcela, cuyo propósito consistió en observar cual material de cobertura tenía menor pérdida de suelo y cual tenía un factor de retención alto.



Fig. 11. Instalación puntos de medición parcela1



Fig. 12. Instalación puntos de medición parcela2

Las Fig. 11 y 12 muestra el proceso de instalación y monitoreo realizado a los 2 tipos de materiales de cobertura utilizados para la evaluación de la eficiencia de cada, teniendo como mejor material para la retención en el sustrato de Morro la Cobertura compuesta por Cribado (30 %) + lodo arcilloso (70%).

Las obtenciones de las áreas en el proceso 1, son importantes para la proyección del volumen de material de cobertura que se utilizó para la implementación de la medida de control ambiental, esta fue calculada por medio de la siguiente ecuación:

$$V = A * EC \quad (4)$$

Donde:

V= Volumen de Material de cobertura a utilizar (m³)

A= Área de la zona problema (m²)

EC= Espesor de la cobertura al momento de la aplicación (m)

Nota: El espesor de la cobertura es una constante, dado que se utilizó el valor de 30 cm sugerido en la resolución 0330 de 2017 (Reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico- RAS) para el proceso de tapado de residuos en rellenos sanitarios. La norma recomienda disponer cobertura con una capa de 30 cm para impedir que haya filtración de agua, aire y queden residuos expuestos.

4.2.4.3 Diseño e Implementación de infraestructura de bioingeniería para la medida de manejo ambiental

La combustión es un proceso químico donde intervienen tres vértices (Comburente, combustible y Temperatura) formando el triángulo de la combustión. Para el Morro de Moravia el proceso combustión ha generado vacíos al interior de la masa de residuos, lo cual ha ocasionado movimiento de masas e inestabilidad en el perímetro de la conflagración.

Diseño de esquema

En este proceso se realizó el diseño del esquema que se implementó en campo sobre la medida de manejo para el proceso de combustión. Para su elaboración, se utilizaron herramientas computacionales como AutoCAD y ArcGis para construir el diseño y proyectar las dimensiones del esquema. El diseño proyectado fue ajustado a las indicaciones expuestas por la norma NRS 10 en su título G sobre construcción de estructuras en madera del grupo ES6, el cual hace referencia a la clasificación mecánica de la madera utilizada para la construcción de muros de contención [50]. Con lo anterior el tipo de madera seleccionado para la construcción de los trinchos fue el PINO PATULA (*Pinus Patula*) especie que se encuentra clasificada en el grupo de ES6 maderas aptas para construcción de muros de contención y comercialmente muy utilizada para este tipo de estructuras. Adicionalmente, para darle protección a la madera se solicitó al proveedor madera inmunizada, con el fin de garantizar permanencia en el tiempo y prevenir ataques de hongos, plagas y pudrición. La inmunización cumplió con los requisitos de la norma NTC-2083 (Madera preservada clasificada y requisitos) [51].

Implementación estructura en madera inmunizada

La bioingeniería, se utilizó en ámbitos de obra civil, especialmente en la consolidación de taludes, riberas y control de la erosión, se convirtió en la estrategia que se implementó para la estabilización del área del proceso de combustión en el Morro de Moravia. Para la construcción del esquema planteado, se inició con levantamiento topográfico de la zona suroccidental del Morro de Moravia, con ella se buscó ubicar en terreno las estructuras en madera inmunizada tipo trincho con el propósito de estabilizar área de estudio.

El diseño, consistió en realizar e implementar estructuras de bioingeniería con el fin dar estabilidad a las pendientes, impedir el lavado del material de cobertura por acción de la energía potencial del agua de escorrentía y sobre todo impedir la entrada de oxígeno al sistema. También es de suma importancia resaltar, que este diseño contribuyó en la evaluación del material de cobertura y su comportamiento en pendientes moderadas, tomando como elementos de criterio la pérdida de material por lavado, salificación y plasticidad.

Para la construcción de la estructura de contención, se siguió la metodología planteada por la norma colombiana NSR 10 (REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE) en su título G sobre estructuras en madera [50]. El procedimiento se llevó a cabo instalando 96 tablas de madera inmunizada con 3 m de longitud, 20 cm de altura y con un espesor de 4 cm, las cuales fueron instaladas con tornillería galvanizada, estas fueron empotradas en postes de 10 cm de diámetro, para conformar los 6 m de longitud unieron dos tablas. Los postes que tienen la función de anclar el trincho, tienen una longitud de 2,20 m, los cuales se instalaron a 1 m de profundidad, cimentados en un mortero de concreto para fijar su anclaje y resistencia de carga, los otros 1,20 m restantes fueron unidos a las tablas mencionadas anteriormente para la conformación de la estructura. La instalación de los postes fue a distancias de 1 m de longitud entre estos, en total se instalaron 56 postes.

Con lo anterior, se conformaron 6 estructuras en madera inmunizada con una longitud de 8 metros lineales para un total de 48 metro lineales construidos, los cuales abarcaron un área de 114 m².

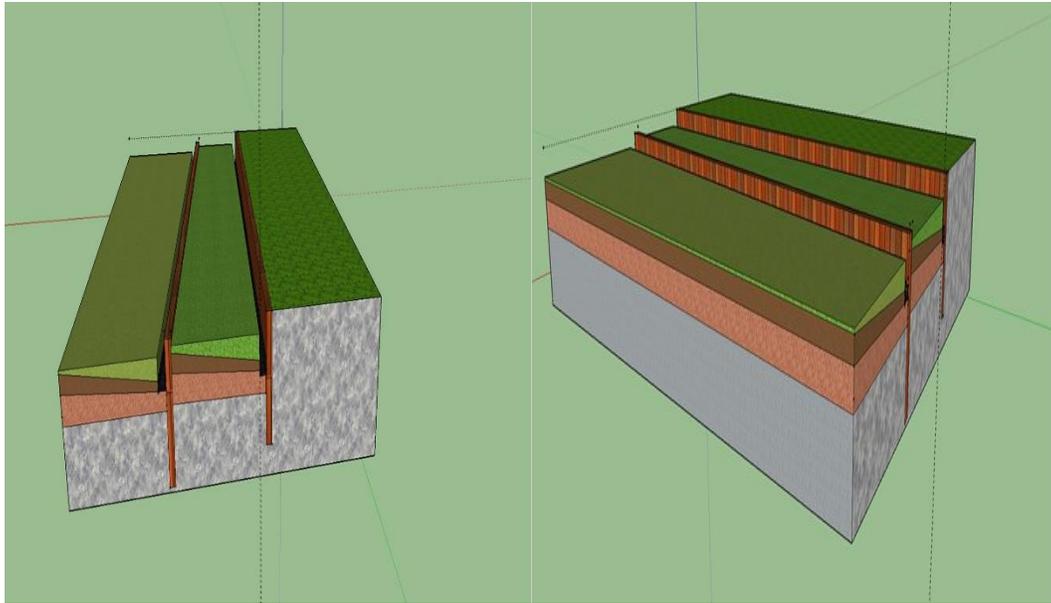


Fig. 13. Esquema en 3D trinchos



Fig. 14. Adecuación e instalación de los trinchos

Disposición del material de cobertura

Después de realizar al estudio realizado en la evaluación del material de cobertura (cribado + lodo arcilloso), se procedió a realizar la instalación del mismo en campo, cuyo papel principal es el de contener o limitar la dispersión de los contaminantes, generalmente, mediante la reducción de las rutas de transporte de los contaminantes y la circulación de oxígeno, el confinamiento de los residuos expuestos o la neutralización de los mismos.

La implementación del Material de Cobertura de la medida de manejo, se dio de la siguiente manera:

Actividad No 1: Se realizó la implementación en in situ del material de cobertura, con el objetivo de atenuar la combustión interna en el Morro de Moravia. Para la aplicación del método optado se tuvo presente la metodología de implementación y el proceso de seguimiento basado en el RAS y las guías de EPA e ISWA (por sus siglas en ingles).

Dicho proceso se realizó cubriendo de manera manual con el material de cobertura el área identificada y los puntos que presentaron anomalías como residuos expuestos, grietas en la masa de residuos, hundimiento y espacios generados por la quema de residuos. La implementación del material cobertura, tuvo la finalidad de aislar los residuos del entorno impidiendo la infiltración de oxígeno al interior de la masa de residuos, así como la infiltración de las aguas de escorrentía.



Fig. 15. Disposición material de cobertura

Actividad No 2: En esta etapa se realiza la compactación del material de cobertura, con el propósito de adherir el material a la masa de residuos y sellar las grietas y residuos expuestos presentes en el área de influencia. El proceso de compactación se realizó de manera manual con pisones artesanales de madera.

En la imagen 8, se evidencia el proceso de compactación del material de cobertura en aproximadamente un área de 114 m², donde se dispusieron 40 m³ de material, el promedio de compactación según Collazo, está en 700 kg/m³ de basura colocada y cubierta de manera manual. Este proceso se realizó agregando el material de cobertura en capas de 10 cm, las cuales fueron humedecidas para facilitar la compactación, este último proceso se realizó para cada capa hasta llegar a los 30 cm de espesor del material sobre la masa de residuos [21] . El método utilizado es llamado supresión oxígeno, el cual se encargó de limitar el flujo de oxígeno en la zona del fuego y en la masa de residuos.



Fig. 16 Compactación manual

Monitoreo de la Medida de Manejo

Para el monitoreo de la medida de manejo y los parámetros asociados al proceso de combustión se realizó a través de puntos de instalados donde se tomaron los datos de las variables Metano (CH_4), Monóxido de Carbono (CO), Oxígeno (O_2), Sulfuro de Hidrogeno (H_2S) y la temperatura al interior de la masa de residuos. La ejecución del seguimiento a la medida está basada a la guía de operaciones en sitios de disposición final planteada por la ISWA (*Intenational solid waste association*).

Para el desarrollo de este seguimiento se implementaron las siguientes fases:

Fase 1. Implementación de puntos de monitoreos: Se realizaron 19 perforaciones con una profundidad de 2 m, dicha perforación se ejecutó de manera manual, es decir, se introdujo una Varilla rustica de hierro con un diámetro de $\frac{3}{8}$ de pulgada, conteniendo en su interior una manguera de $\frac{1}{4}$ de pulgada PVC, cuya función del tubo es conducir la manguera de monitoreo al interior de la masa de residuos y mantener las perforaciones abiertas, con el objetivo de realizar las mediciones de gases y temperaturas en cada punto instalado. Los puntos totales de monitoreos fueron 26 los cuales fueron georreferenciados como se muestra en la tabla 9 y fig. 17 y 18, de los cuales 19 instalados nuevos y 7 ya existentes ubicados estos en el área 4.



Fig. 17. Perforaciones en masa de residuos



Fig. 18. Instalación maguera de medición

Tabla 9. Puntos de monitoreos

Número de área	Dimensión del área (m ²)	Número de puntos
Área No 1	630	4
Área No 2	1677	12
Área No 3	1178	3
Área No 4	2500	7

Nota: Puntos de monitoreo implementados por área.

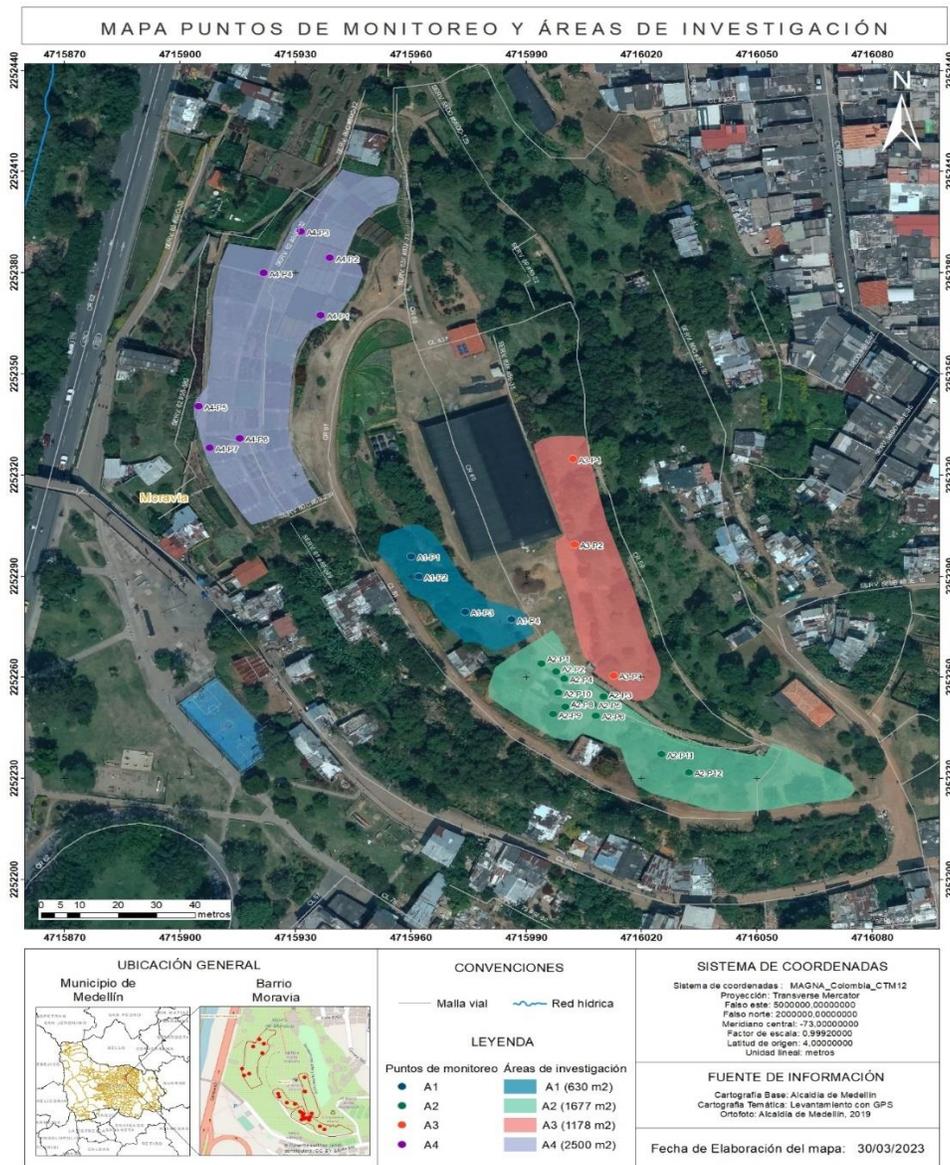


Fig. 19. Mapa puntos de monitoreo

Fase 2. Mediciones en campo: Las mediciones en campo, corresponden al seguimiento y evaluación de la medida de manejo, estos monitoreos se implementaron para determinar la eficacia de la medida implementada para el proceso de combustión interna en el Morro de Moravia. Las variables medidas para dicho seguimiento fueron; Metano (CH₄), Monóxido de Carbono (CO), Oxígeno (O₂), Sulfuro de Hidrogeno (H₂S) y la temperatura al interior de la masa de residuos.

Monitoreos gases

Se realizaron 19 mediciones de gases (Metano (CH₄), Monóxido de Carbono (CO), Oxígeno (O₂) y Sulfuro de Hidrogeno (H₂S), en los 26 puntos instalados para observar el comportamiento interno del proceso de combustión en la masa de residuos del morro de Moravia, posterior a la implementación de la medida de manejo ambiental para el control de la conflagración. Este proceso se realizó con la instalación de un detector de gases portátil en cada una de los sitios de monitoreo, se introdujo la sonda del equipo en el punto de monitoreo y se espera hasta que el equipo realice la lectura, seguidamente se copia la lectura en la tabla de seguimiento y posteriormente es ingresado a la base datos. Este procedimiento, se realizó en los 26 puntos instalados para el monitoreo del proceso de combustión en el Morro de Moravia. El proceso se realiza para evaluar la medida de control ambiental implementada para el proceso de combustión en el Morro de Moravia.

La lectura de los datos arrojados por el detector de gases, se da en % para las variables (Metano (CH₄) gas combustible y Oxígeno (O₂), para el caso de los gases tóxicos como el Monóxido de Carbono (CO) y Sulfuro de Hidrogeno (H₂S) las lecturas fueron arrojadas en partes por millón (ppm), la cual mide el volumen que ocupa las partículas en la mezcla de gases al interior masa de residuos. Posterior a la lectura se verificó si las condiciones del Morro de Moravia y su proceso de combustión tuvo cambios teniendo en cuenta lo reportado en literatura para incendios no tecnificados en sitios de disposición final.



Fig. 20. Mediciones de gases en campo

Monitoreo de temperatura

Las mediciones se llevaron a cabo de acuerdo a la guía planteada por la Agencia de Protección Ambiental – EPA por sus siglas en inglés, para sitios de disposición final de residuos y la ISWA. Se realizaron recorridos periódicos en las cuales se ejecutaron mediciones en cada una de las áreas identificadas, se implementaron 19 muestreos al interior de la masa de residuos *in situ*, por medio de una termocupla y/o sonda térmica, la cual se introdujo a una profundidad de 2 metros en cada uno de los puntos de monitoreo hasta obtener el reporte o lectura del equipo. Posteriormente, se procedió a la conformación de la base de datos de los registros obtenidos para su análisis con respecto a valores de referencia de la literatura.



Fig. 21. Mediciones de temperatura en °C

5 RESULTADOS

5.1 Resultado objetivo 1. Caracterización Proceso de Combustión

5.1.1 Delimitación área de estudio

Para la delimitación del área de estudio, se desarrollaron inspecciones físicas del Morro de Moravia, el cual se configuró por medio de recorridos en campo. Como resultado del proceso de inspección se obtuvo la identificación de 4 áreas con rasgos asociados a un proceso de combustión como lo señalan los lineamientos planteados por la Agencia de Ambiental (EPA por sus siglas en inglés) y por la Asociación Internacional de Residuos Sólidos (ISWA por sus siglas en inglés) [42]. Este sentido, en las Fig. 22 y 23 se logra identificar las evidencias de los rasgos asociados a un evento de combustión como;

1- Emisión de gases con fuertes olores y en ocasiones la presencia de llamas.



Fig. 22. Emanación de gases



Fig. 23. Incendios en masa de residuos

2- Aparición de grietas, que involucran además la caída y desmoronamiento de estructuras en concreto.



Fig. 24. Desmoronamiento de estructuras

3- Presencia de Hollín



Fig. 25. Presencia hollín

Partiendo de la información anterior, se logra evidenciar mediante el registro fotográfico las anomalías presentadas en el Morro de Moravia en las áreas identificadas. De acuerdo con la inspección realizada, se procedió a medir las dimensiones de las 4 áreas seleccionadas. En la tabla 10 se muestra el resultado de las mediciones de las áreas identificadas con sus dimensiones en m².

Tabla 10. Dimensiones áreas.

Número de área	Dimensión del área m ²
Área No 1	630
Área No 2	1677
Área No 3	1178
Área No 4	2500

Nota: Se enumeran cada una de las áreas basadas en los enfoques de dimensión reconocidos.

Se recalca que, en las áreas identificadas, los rasgos asociados a los procesos de combustión visualmente se observaron en el área No 2, donde se encontraron presencia de llamas, salida de gases y desmoronamiento de estructuras en concreto. Para el caso del área No 4 la cual tiene una dimensión de 2500 m², guarda una particularidad, dado que es un área que se encuentra cubierta de concreto por intervenciones anteriores realizadas por el AMVA (Área Metropolitana del Valle

de Aburra) [52]. En la Fig. 26 se resume la delimitación de las áreas identidades y la ubicación de estas en el plano del Morro de Moravia.

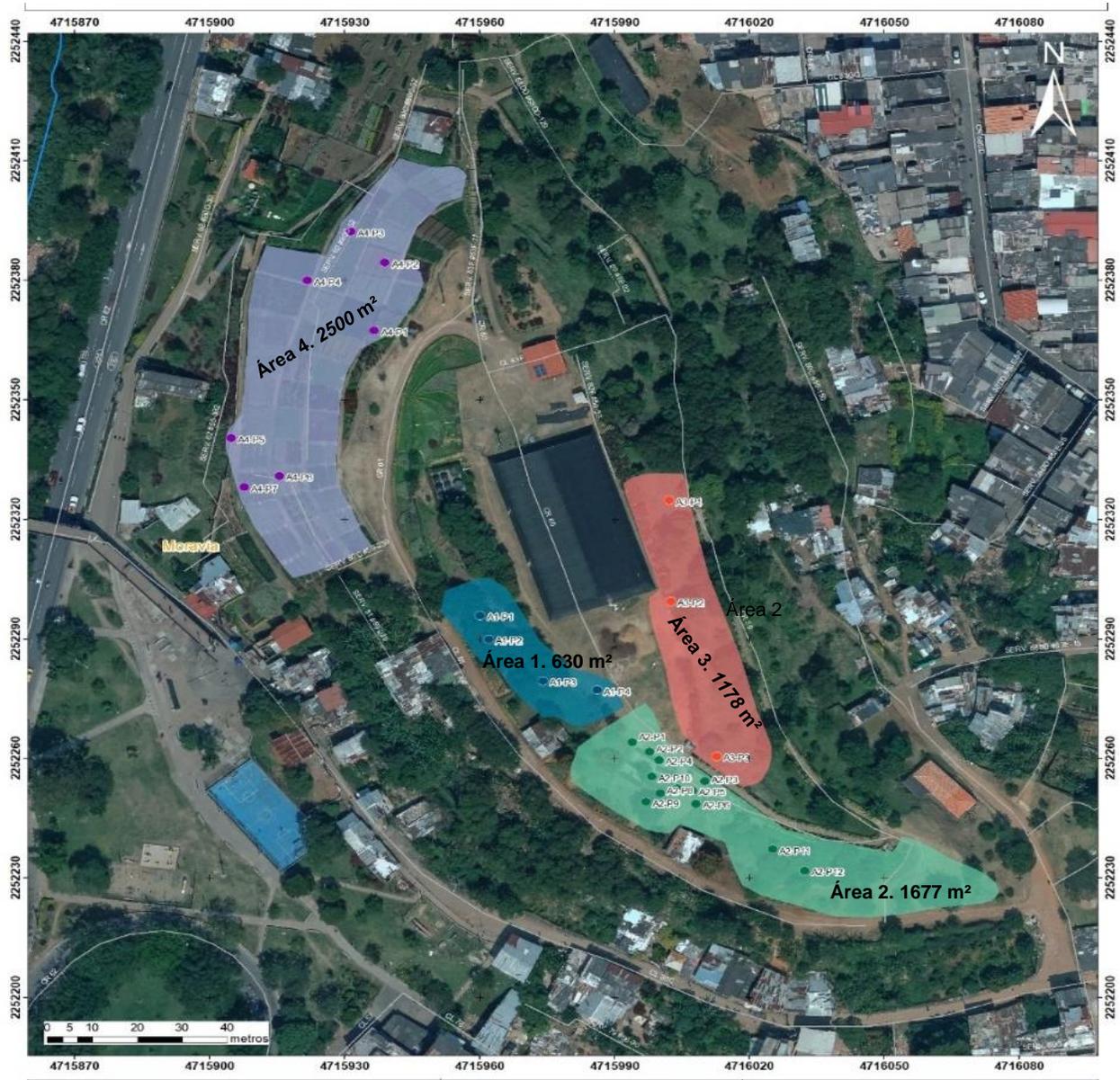


Fig. 26. Delimitación Áreas de investigación

5.1.2 Análisis estadístico y monitoreos en in situ de gases

Para la realización de monitoreo y mediciones in situ, se utilizó la metodología planteada por la EPA [37] por sus siglas en inglés (Control Techniques for Particulate Emissions from Stationary Sources) y en la guía para sitios de disposición final de residuos sólidos del 2005 ISWA [53] por sus siglas en inglés (International Solid Waste Association).

Con el fin de determinar las causas del proceso de combustión al interior de la masa de residuos en el Morro de Moravia, realizaron diferentes monitoreos distribuidos de manera aleatoria en las áreas delimitadas, estos fueron realizados en los puntos identificados con respecto a las inspecciones de campo ejecutadas. Para determinar la correlación de las variables que se presentan dentro de un proceso de quema de residuos no tecnificados, se siguió la guía propuesta por la EPA [37] y la guía para sitios de disposición final de residuos sólidos del 2005 ISWA [53], las cuales recomiendan mediciones de las variables **CH₄(%)**, **O₂ (%)**, **CO (ppm)** Y **H₂S (ppm)**. Para establecer las interacción y correlaciones de las variables mencionadas se realizó un análisis estadístico, utilizando los valores obtenidos dentro del seguimiento ejecutado a cada una de las que conforman los incendios en sitios de disposición final de residuos.

Análisis estadístico Morro Moravia

Tabla 11. Resumen estadístico parámetros Morro de Moravia

	<i>CH₄(%)</i>	<i>O₂ (%)</i>	<i>CO (ppm)</i>	<i>H₂S (ppm)</i>
Recuento	44	44	44	44
Promedio	4.2	13.1	38.3	0.64
Mediana	0	14.6	0	0
Moda	0	20.9	0	0
Desviación Estándar	8.4	7.2	70.0	1.7
Coficiente de Variación	201.7%	55.4%	182.9%	264.3%
Mínimo	0	0.3	0	0

	<i>CH4(%)</i>	<i>O2 (%)</i>	<i>CO (ppm)</i>	<i>H2S (ppm)</i>
Máximo	28.0	28.9	300.0	8.0
Rango	28.0	28.6	300.0	8.0
Cuartil Inferior	0	9.95	0	0
Cuartil Superior	2.0	19.15	61.5	0.5
Rango Intercuartílico	2.0	9.2	61.5	0.5

Tabla 12. Correlaciones entre variables

	CH4(%)	O2 (%)	CO (ppm)	H2S (ppm)
CH4(%)		-0.71	0.40	0.585
		(44)	(44)	(44)
		0.0000	0.0075	0.0000
O2 (%)	-0.7074		0.0221	-0.3544
	(44)		(44)	(44)
	0.0000		0.8870	0.0183
CO (ppm)	0.3980	0.0221		0.4200
	(44)	(44)		(44)
	0.0075	0.8870		0.0045
H2S (ppm)	0.5850	-0.3544	0.4200	
	(44)	(44)	(44)	
	0.0000	0.0183	0.0045	

Con respecto a la tabla 12, donde se muestran las interacciones o correlaciones entre variables, se logra evidenciar que las variables relacionadas entre sí, son el CH4(%) y O2 (%) representan una relación lineal y es claro, debido que ambas variables se encuentran directamente relacionadas con el triángulo de la combustión una ejerciendo la función de comburente o la otra de combustible.

En consecuencia, las relaciones estadísticamente significativas son:

CH₄(%) y O₂ (%)

CH₄(%) y CO (ppm)

CH₄(%) y H₂S (ppm)

O₂ (%) y H₂S (ppm)

CO (ppm) y H₂S (ppm)

A continuación, se presentan los respectivos modelos

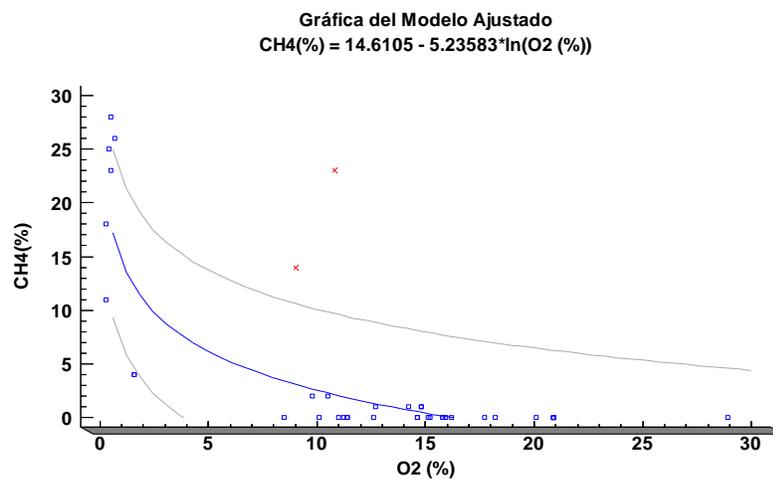


Fig. 27 Modelo Ajustado

La Fig. 27 del modelo ajustado nos indica que es un modelo logarítmico, dado que es la que se ajusta mucho mejor a la nube de puntos de los datos que tenemos, es decir, existe una correlación entre el Oxígeno y el Metano en el proceso de combustión que presenta el Morro de Moravia.

Modelos de Calibración - CH₄(%) versus O₂ (%)

Y (medida): CH₄(%)

X (actual): O₂ (%)

Tabla 13. Modelo Log-X:Y = a + b*ln(X)

	<i>Estimado de</i>	<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Intercepto	14.6105	1.06826	13.677	0.0000
Pendiente	-5.23583	0.426282	-12.2825	0.0000

Tabla 14. Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
<i>Modelo</i>	2046.01	1	2046.01	150.86	0.0000
<i>Residuo</i>	542.49	40	13.5622		
<i>Falta de Ajuste</i>	505.49	25	20.2196	8.20	0.0001
<i>Error Puro</i>	37.0	15	2.46667		
<i>Total (Corr.)</i>	2588.5	41			

Coefficiente de correlación = -0.889057

R-Cuadrada = 79.0423 por ciento

Con base en los coeficientes de correlación de cada uno de los modelos, el que presenta una relación directa y fuerte es el modelo logarítmico dado que su coeficiente de correlación se acerca a 1.

El modelo de calibración entre CH₄ (Metano) vs O₂ (Oxígeno) arrojado en el cálculo estadístico, muestra un R cuadrado = 79.0423, lo que indica que existe una correlación entre las variables, es decir, que las variables Metano y Oxígeno tienen una incidencia positiva en el proceso de combustión que presenta el Morro de Moravia.

[Modelos de Calibración - CO \(ppm\) versus CH₄\(%\)](#)

Y (medida): CO (ppm)

X (actual): CH₄(%)

Tabla 15. Modelo X-cuadrada: $Y = b \cdot X^2$

	<i>Estimado de</i>	<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Pendiente	0.17298	0.029193	5.92539	0.0000

Tabla 16. Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	38480.4	1	38480.4	35.11	0.0000
Residuo	36167.6	33	1095.99		
Falta de Ajuste	30072.3	9	3341.37	13.16	0.0000
Error Puro	6095.24	24	253.968		
Total	74648.0	34			

Coefficiente de correlación = 0.717978

R-Cuadrada = 51.5492 por ciento

Modelos de Calibración - H₂S (ppm) versus CH₄(%)

Y (medida): H₂S (ppm)

X (actual): CH₄(%)

Tabla 17. Modelo X-cuadrada: $Y = b \cdot X^2$

	<i>Estimado de</i>	<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Pendiente	0.00555533	0.000885663	6.27251	0.0000

Tabla 18. Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	67.2945	1	67.2945	39.34	0.0000
Residuo	66.7055	39	1.7104		
Falta de Ajuste	64.5389	10	6.45389	86.38	0.0000
Error Puro	2.16667	29	0.0747126		
Total	134.0	40			

Coefficiente de correlación = 0.708659

R-Cuadrada = 50.2198 por ciento

Modelos de Calibración - H2S (ppm) versus O2 (%)

Y (medida): H2S (ppm)

X (actual): O2 (%)

Tabla 19. Modelo Raíz cuadrada-Y: $Y = (b \cdot X)^2$

	<i>Estimado de</i>	<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Pendiente	0.0188544	0.00371353	5.07722	0.0000

Tabla 20. Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	3.38254	1	3.38254	25.78	0.0000
Residuo	5.11746	39	0.131217		
Falta de Ajuste	2.66267	26	0.10241	0.54	0.9106
Error Puro	2.45479	13	0.18883		
Total	8.5	40			

Coefficiente de correlación = 0.630829

R-Cuadrada = 39.7946 por ciento

Modelos de Calibración - H2S (ppm) versus CO (ppm)

Y (medida): H2S (ppm)

X (actual): CO (ppm)

Tabla 21. Modelo X-cuadrada: $Y = b \cdot X^2$

	<i>Estimado de</i>	<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Mínimos Cuadrados</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Pendiente	0.0000127096	0.00000431444	2.94582	0.0053

Tabla 22. Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	2.00885	1	2.00885	8.68	0.0053
Residuo	9.49115	41	0.231491		
Falta de Ajuste	8.31258	13	0.639429	15.19	0.0000
Error Puro	1.17857	28	0.0420918		
Total	11.5	42			

Coefficiente de correlación = 0.417951

R-Cuadrada = 17.4683 por ciento

Con respecto a los modelos de calibración entre CO (Monóxido de Carbono) vs CH₄ (Metano), H₂S (Sulfuro de Hidrógeno) vs CH₄ (Metano), H₂S (Sulfuro de Hidrógeno) vs O₂ (Oxígeno), (Sulfuro de Hidrógeno) vs CO (Monóxido de Carbono), obtenidos en el cálculo estadístico, muestran un R cuadrado menor al 70%, lo que indica que las variables relacionadas no tienen una significancia positiva, es decir que no actúan de manera directa en el proceso de combustión que presenta el Morro de Moravia.

Con respecto a los R- Cuadrados de cada uno de las interacciones y/o modelos de calibración se logra determinar que las variables que tienen influencia directa y una significancia en el proceso de combustión son el CH₄ (Metano) y O₂ (Oxígeno).

Caracterización Inicial Morro Moravia

En la Fig. 28 se presentan los resultados obtenidos en los monitoreos iniciales de caracterización en las áreas identificadas con anomalías con respecto a la salida de gases y demás rasgos asociados a los procesos de combustión. Los valores obtenidos para las variables CH₄ y O₂ como se muestra en la gráfica se determina para el área 2 un mayor ingreso de Oxígeno al interior de la masa de residuos, indicándonos una permeabilidad alta e ingreso interior de masa de residuos. Para el caso del Metano, las cuatro áreas monitoreadas reportan en las mediciones presencia del metano y comparando con los valores de referencia de la ISWA (International Solid Waste Association) en su guía de operaciones para rellenos sanitarios [54] que valores por debajo del 40% representan un indicador categórico que las condiciones anaerobias están cambiando de frías a muy calientes, debido a que el Metano se está quemando al interior de la masa.

Es sumamente importante resaltar que, el Morro de Moravia por ser un suelo de origen antrópico presenta una heterogeneidad en su estructura y lo hace escenario propicio para ingreso de aire al

interior de la masa, generando un ambiente para incendios al interior de la masa de residuos según las condiciones del sitio de disposición final.

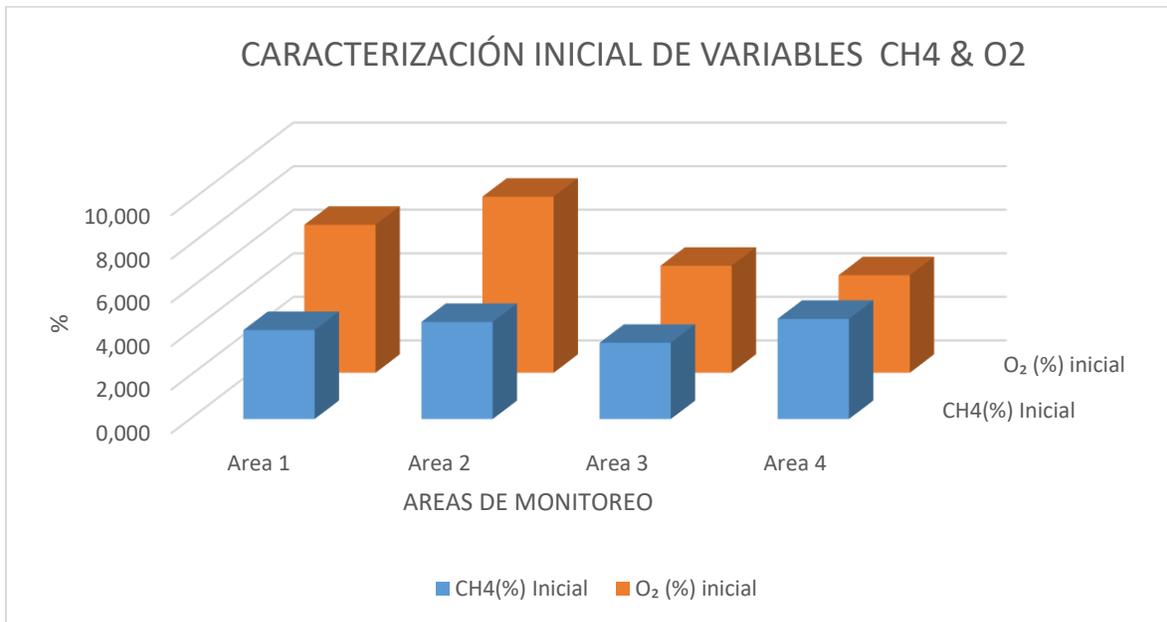


Fig. 28. Caracterización inicial CH4 & O2

La Fig. 29 muestra los resultados de la caracterización inicial de las áreas identificadas. Los valores obtenidos para la variable CO (Monóxido de Carbono) muestra presencia significativa de Monóxido de Carbono dentro de las emisiones del Morro de Moravia, lo que indica un proceso de combustión interna. Las concentraciones más altas de Monóxido de Carbono se presentaron en las áreas 1 y 2, siendo el área 2 la más representativa con un valor de 130 ppm en promedio.

En relación a los valores de referencia presentados por la ISWA (International Solid Waste Association) en su guía de operaciones para rellenos sanitarios [54] en la que indica valores en el intervalo entre 100 – 500 ppm representan posible presencia de materiales ardiendo lentamente y comparando con los valores obtenidos en los monitoreos realizados para cada área se logra evidenciar que el área No 2 presenta materiales ardiendo lentamente al interior de la masa de residuos dado que se encuentra en el intervalo anteriormente mencionado. Con lo anterior, se puede confirmar que al interior de la masa de residuos se presenta un proceso de combustión al interior de esta, el cual debe ser controlado implementando alguna medida de manejo.

Con respecto a la Sulfuro de hidrogeno H₂S, sus concentraciones fueron constantes y por debajo de 1 ppm, la indica según la ISWA que hay ingreso de Oxígeno al sistema y que el proceso anaerobio al interior de la masa está cambiando.

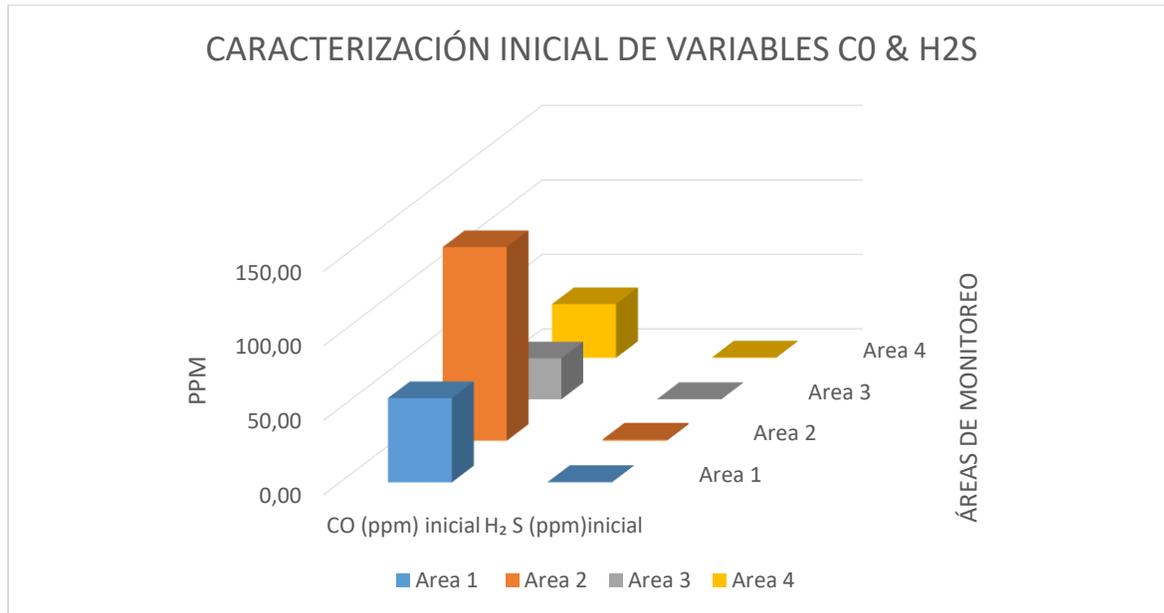


Fig. 29 Caracterización inicial CO & H₂S

La NOISH por sus siglas en inglés, es el Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional de los EE. UU, esta entidad plantea dentro de sus normas para el tema de salud y exposiciones a gases de carácter tóxico como el Monóxido de Carbono límites de concentraciones en los cuales un ser humano puede sufrir dificultades en su salud, dichos parámetros oscilan entre 80 – 100 ppm en una hora y si superior a estos valores podría correr riesgo de muerte, para el caso de los valores permisibles no pueden superar las 50 ppm en horas [55]. Con lo anterior y, comparando con los resultados obtenidos con el Monóxido de Carbono CO se puede evidenciar que dichos monitoreos superan los límites permisibles según la NOISH dado que el valor en promedio para el área No 2 es 130 ppm lo que implica un riesgo y afectaciones para los seres humanos que se encuentran habitando el Morro de Moravia en dicha zona. Por consiguiente, se hace necesario implementar una acción de control para el proceso de combustión interna de la masa de residuos.

5.1.3 Mediciones y monitoreos in situ de temperaturas

Este proceso fue realizado de acuerdo a la guía planteada por la agencia de protección ambiental-EPA por sus siglas en inglés para sitios de disposición final [56] y la ISWA (International Solid Waste Association) en su guía de operaciones para rellenos sanitarios [54]. Para la toma de los datos se realizaron recorridos en cada una de las áreas identificadas, en total se tomaron 6 muestreos, los cuales se ejecutaron al interior de la masa de residuos con la termocupla y/o sonda térmica.

Una vez obtenidos los datos se procedió a su procesamiento de manera cronológica y se obtuvo como resultado la creación de mapas de temperatura, este proceso se realizó con interpolación de datos en los sitios de monitoreo, utilizando como herramienta sistemas de información geográfica ARCGIS.

En las figuras 11 y 12 se muestran los resultados obtenidos en los monitoreos realizados de la variable Temperatura, se evidencia claramente que, el área No 2 presenta los mayores valores con datos superiores a 60 °C, con respecto a las áreas 1, 3 y 4 los datos de temperatura son menores a 45 °C. Tomando como referencia los valores de la ISWA en su guía de operaciones de rellenos sanitarios en la relación de las condiciones del sitio de disposición final y la temperatura (ver tabla 3) [54] y comparándolos con los mapas de calor de las figuras 11 y 12, las cuales representan las temperaturas promedio de cada áreas, se puede apreciar que el comportamiento en el áreas No 2 se encuentra en un rango superior a 60 °C lo cual indica inicios de incendios y/o aumento en la actividad biológica anormalmente elevada al interior de la masa de residuos del Morro de Moravia y por consiguiente debe plantear una alternativa de control para el proceso de incendio al interior de la masa de residuos.

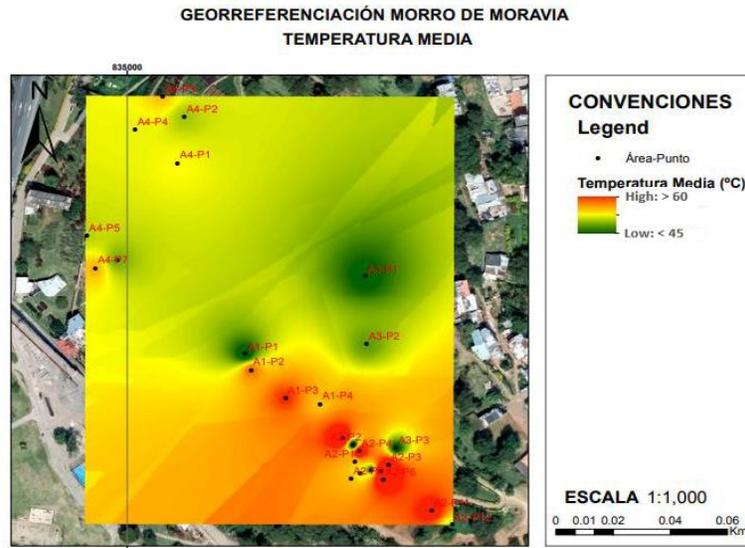


Fig. 30 Mapa de temperatura

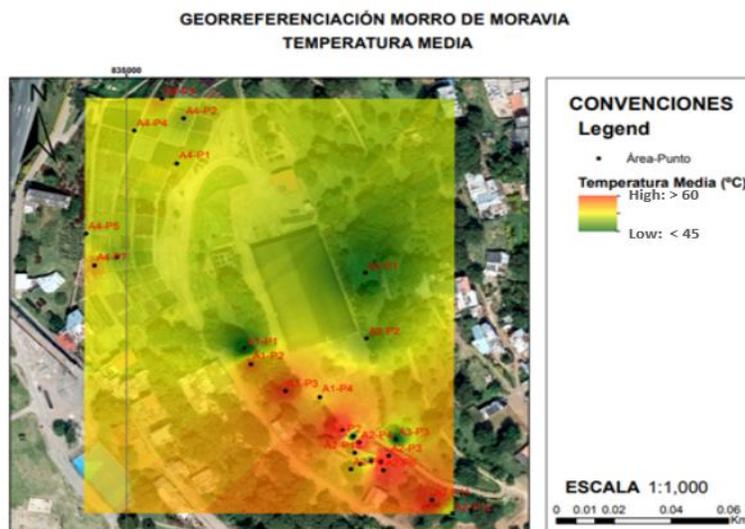


Fig. 31 Mapa de temperatura con transparencia

5.2 Resultado objetivo 2. Revisión bibliográfica diferentes medidas para control ambiental de los procesos de combustión interna en una masa de residuos.

Para el proceso de revisión bibliográfica el cual consistió en buscar documentación relacionada con medidas de manejo para el control de procesos de combustión no tecnificados en sitios de disposición final de residuos. Como resultado de dicha revisión se seleccionaron 8 documentos que mencionan dentro de su desarrollo las medidas de control ambiental para los procesos de incendios

no tecnificados en un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y son relacionados en la tabla 23.

Tabla 23. Revisión bibliográfica de medidas de control ambiental

DISEÑO DE UNA MEDIDA DE CONTROL AMBIENTAL PARA EL PROCESO DE COMBUSTIÓN INTERNA EN LA MASA DE RESIDUOS DEL MORRO DE MORAVIA, MEDELLÍN.			
Referencia	Título	Tipo de documento	Observaciones
[57]	An exploratory analysis of existing research on internal combustion engines operating with biogas	Review Article	Las metodologías y aplicaciones sobre el uso de la tecnología del biogás aparecen en el mundo en gran parte de las investigaciones científicas sobre el tema de la eficiencia, la combustión y el control de emisiones, estas se han venido desarrollando para implementar acciones como las ejecutadas por estos equipos que trabajan por combustión para lograr una mejora considerable en su desempeño y reconocer la importancia de continuar profundizando en la investigación sobre el uso de tecnología alternativa para el manejo de residuos.
[58]	Combustion of municipal solid wastes in an experimental fluidized bed system		La incineración vía combustión en lecho fluidizado es una tecnología limpia que se emplea en el tratamiento de residuos sólidos y sus principales

DISEÑO DE UNA MEDIDA DE CONTROL AMBIENTAL PARA EL PROCESO DE COMBUSTIÓN INTERNA EN LA MASA DE RESIDUOS DEL MORRO DE MORAVIA, MEDELLÍN.

Referencia	Titulo	Tipo de documento	Observaciones
[59]	Guía para el control de incendios en vertederos de residuos sólidos	Informe del Centro Nacional de prevención de desastres y la facultad de Minas de la Universidad Autónoma de México UNAM. Autor (Jorge Sánchez Gómez)-2021	<p>virtudes son la reducción del volumen de residuos, así como la recuperación potencial de energía. En este contexto, la investigación evalúa la eficiencia de combustión y la emisión de gases de un prototipo experimental de lecho fluidizado para el tratamiento térmico de residuos generados en Villahermosa, Tabasco.</p> <p>Establecer medidas de control ambiental para el proceso de combustión constituyen acciones de urgente aplicación y respaldo permanente por parte de todas las instituciones, atendiendo a que los incendios en los vertederos de basura acarrear graves daños al ambiente, pérdidas materiales, deterioro del equipamiento, impacto en el erario municipal, y limitaciones económicas. Además de afectar severamente a los asentamientos que se ubican cerca, así como a sus propias instalaciones e infraestructura y en las personas que realizan alguna actividad en su interior (pepenadores, empleados, visitantes, etc.).</p>

DISEÑO DE UNA MEDIDA DE CONTROL AMBIENTAL PARA EL PROCESO DE COMBUSTIÓN INTERNA EN LA MASA DE RESIDUOS DEL MORRO DE MORAVIA, MEDELLÍN.

Referencia	Título	Tipo de documento	Observaciones
[60]	Como Atender incendios en los Rellenos Sanitarios	Informe Methane to Markets- 2018	De acuerdo con el tipo de incendio ya se superficial o subterráneo, en el informe adjunto la empresa expone las características, causas, como identificarlo, y cuáles son las principales medidas para prevenir este tipo de incendios, donde se recomienda eliminar infiltraciones de oxígeno y monitorear constantemente las cubiertas de las zonas
[61]	Guía para la gestión integral de residuos peligrosos	Informe Red de centros del Convenio de Basilea para América Latina y el Caribe. M.Sc. Ing. Javier Martínez- 2015	En él se insta a que se apliquen las medidas de control para evitar los incendios, pues se reconoce que los incendios y quemas no controladas (como quemas de residuos a cielo abiertos) son la principal vía de liberación de contaminantes atmosféricos, y su carga dependerá del tipo de residuos, tecnología de combustión, tratamiento de emisiones y condiciones del evento.
[62]	Landfill operational guidelines	A report from iswa's working group on landfill 2019	Este documento manifiesta una guía para tener presente en los procesos de operación en sitios de disposición final, en su capítulo 9 habla sobre los incendios en sitios de disposición y las medidas de control para su proceso de extinción.

DISEÑO DE UNA MEDIDA DE CONTROL AMBIENTAL PARA EL PROCESO DE COMBUSTIÓN INTERNA EN LA MASA DE RESIDUOS DEL MORRO DE MORAVIA, MEDELLÍN.

Referencia	Título	Tipo de documento	Observaciones
[53]	Guía de operaciones	Incendios en rellenos sanitarios	Esta Guía habla sobre los parámetros a tener en cuenta para caracterizar un proceso de combustión y el monitoreo de las variables. Adicionalmente menciona sobre las medidas posibles para el control del proceso de combustión al interior de una masa de residuos.
[56]	Guidance for Evaluating landfill Gas emissions From closed or Abandoned facilities	Control de incendios en sitios de disposición final	La guía de la EPA habla sobre los controles y procesos que se deben implementar para el control de procesos de combustión en rellenos sanitarios, elementos de monitoreo y medidas.

En cuanto de las posibles medidas de control, se identificó que el proceso de combustión debe ser controlada para reducir las emisiones a la atmósfera, por lo que se ha estudiado la correlación entre la temperatura, el tiempo de residencia y el grado de emisión [63]. En virtud de lo anterior sugirió un nivel de oxígeno de 1 a 2 % en volumen como mínimo, involucrando un incremento de 5 a 10 % de exceso de aire al sistema, para alcanzar la oxidación óptima del combustible y evitar la formación de monóxido de carbono (CO) [58].

De la misma manera, se identificó la tendencia en la gestión de residuos sólidos, adoptada en los países desarrollados y que recomienda la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), es la reducción en la fuente; en segundo lugar, el reciclaje, luego viene la combustión y, por último, la disposición final en rellenos sanitarios. Para los países en desarrollo, se presentan los mismos procesos en igual orden jerárquico, solo que en lugar de la combustión (por sus altos costos, impracticable en estos países), se propone su tratamiento dado que contienen un gran porcentaje de material orgánico.

Con respecto a lo mencionado anteriormente, se obtuvo como resultado de la revisión bibliográfica la identificación de 4 medidas de control para incendios en sitios de disposición final de residuos. En la tabla 24 se muestra las medidas encontradas y su nombre relacionado.

Tabla 24. Medidas de control ambiental identificadas

Nombre de la medida identificada	
Medida de control No 1	Supresión de Oxígeno (O ₂),
Medida de control No 2	Aislamiento de la combustión,
Medida de control No 3	Infiltración de un gas en la zona de combustión
Medida de control No 4	Excavación y reacondicionamiento.

Partiendo de lo mencionado anteriormente, se realizó la descripción de cada uno de las medidas que posiblemente podrían implementarse en el Morro de Moravia como estrategia de control ambiental para el proceso de combustión en la masa de residuos.

Medida No 1. Supresión de Oxígeno (O₂).

Los incendios pueden generarse por la presencia de aire dentro del sitio de disposición final, por tanto, una buena operación elimina esta posibilidad. Este método se basa en limitar la cantidad de O₂ que se filtra por grietas y fisuras a la zona caliente de la combustión, por medio de sellado con material de baja permeabilidad [53].

Dentro de esta estrategia se realizaría un sellamiento en la masa de residuos con material arcilloso, que actuaría como impermeabilizante impidiendo el paso de agua y aire al suelo, la cual disminuye las probabilidades de combustión y de esta forma reduce el escape de gases que se genera en la parte interna de los residuos. Los procesos con bentonita o arcillas activadas, consisten en mezclar esta con arena para formar una barrera de arcilla compactada, esta utilidad de las bentonitas como material de sellado se basa fundamentalmente en algunas de sus propiedades como son: elevada superficie específica, gran capacidad de hinchamiento, buena plasticidad y lubricidad, alta impermeabilidad, baja compresibilidad. [64]. Es necesario realizar monitoreos constantes de temperatura en el largo plazo, para determinar si el método fue eficaz o no en el momento de extinción de la combustión interna.

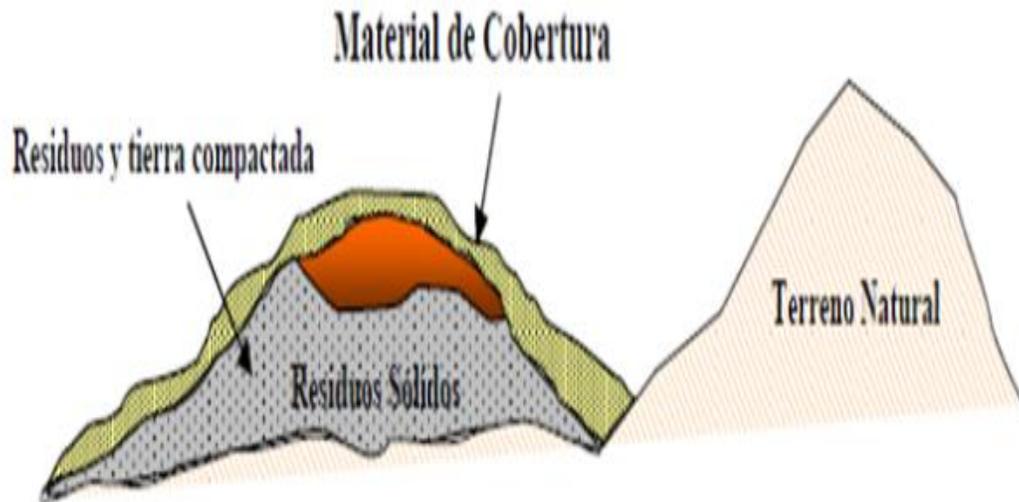


Fig. 32 Aislamiento zona de incendio de residuos con material impermeable. [86]

Medida No 2. Aislamiento de la combustión.

La separación de las zonas de conflagración dentro de una masa de residuos es importante, dado que impide que el incendio se propague en el interior de los residuos. El objetivo es realizar zanjas en las zonas donde se presenta la ignición, las cuales serán llenadas con material impermeable para el aislamiento del área de la combustión. Posteriormente, se inicia la etapa de apagado con un recubrimiento total del área con un material de cobertura impermeable que impida la entrada de agua y aire al sistema, luego se efectúa un proceso de compactación en toda el área afectada [65]. Se realizará seguimiento y monitoreo constante con mediciones de temperatura y trabajo de observación en campo.

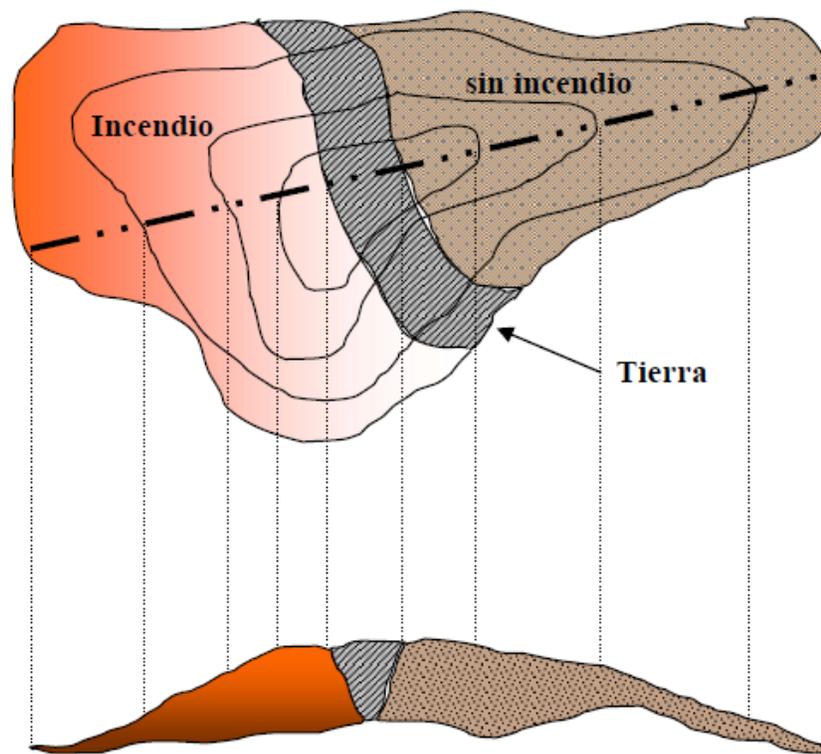


Fig. 33 Aislamiento de la zona de incendio con la que no presenta combustión. [86]

Medida No 3. Infiltración de un gas en la zona de combustión.

Es la infiltración de un gas inerte en la zona caliente. Tanto el CO₂ como el nitrógeno pueden ser utilizados, aunque el nitrógeno es ligeramente más favorable. En cualquier caso, el gas se suministra a través de una serie de tubos perforados situados alrededor de la zona caliente a unos pocos milibares por encima de la presión del relleno sanitario a temperatura ambiente [38].

El gas es inyectado en el sitio como un líquido súper enfriado y expandido a través de un evaporador separado. Un pequeño incendio podría utilizar alrededor de 40 toneladas de gas en 10 días y el gas persistir por un período de cinco días. La confirmación que el fuego se ha extinguido se basa en el seguimiento de todos los observables del sitio - temperatura, concentración de gases, olores etc [38].



Fig. 34. Inyección de gas inerte. [38]

Medida No 4. Excavación y reacondicionamiento

Para el caso de los incendios profundos, donde la aplicación de agua quizá no es una herramienta eficaz para extinguir el incendio, el método más apropiado suele ser excavar y “reacondicionar” los residuos.

El primer paso para controlar un incendio de esa manera es rellenar las zanjas paralelas cavadas previamente por el operador del relleno sanitario. A continuación, sofocar la zona de incendio con una capa de desechos o tierra de entre 2 y 3 metros y alisar (reacondicionar) la superficie del relleno sanitario. Estas medidas disminuyen la cantidad de aire que puede alimentar el incendio, reducen su velocidad y la cantidad de humo que emite el fuego y hace que la superficie del relleno sanitario sea un ámbito de trabajo más seguro [53]



Fig. 35. Excavación masa de residuos. [66]

Como resultado adicional en la tabla 25, se muestra el proceso de revisión de literatura, se encontraron las ventajas y desventajas de cada una de las medidas de monitoreos encontradas en el proceso de revisión:

Tabla 25. Ventajas y desventajas medidas de control

MEDIDA DE CONTROL AMBIENTAL	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Aislamiento de zonas de combustión.	Controla y elimina cualquier conato de incendio, de modo que se evite la formación de un siniestro de graves consecuencias	Ocasiona desplazamiento a cuerpos de agua, vertederos
		Generación de deslizamientos
		Generación de emisiones de monóxido de carbono que pueden ser muy agresivas si no se controlan en poco tiempo.
	Control rápido del incendio ya que se elimina el agente que lo provocó. Facilidad en el monitoreo de emisiones de gases.	No hay cumplimiento de disposición normativa
		Generación de afectaciones a quienes laboran o realizan actividades en el sector.
		Graves riesgos y daños ambientales por los lixiviados.
		Riesgos por las emisiones de gases de efecto invernadero.

MEDIDA DE CONTROL AMBIENTAL	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Inyección de gas inerte		Generación de emisiones de monóxido de carbono que pueden ser muy agresivas si no se controlan en poco tiempo.
Excavar y reacondicionar	Disminuyen la cantidad de aire que alimenta el incendio, reducen su velocidad y la cantidad de humo resultante de la combustión, además de que generan un ámbito de trabajo menos riesgoso.	La descomposición de la fracción orgánica presente en la basura, en condiciones anaerobias, produce biogás con un alto contenido de metano, gas combustible que favorece la aparición de incendios. Generan riesgo a la salud y la integridad física de las personas por el fuego producido y radiación resultante
Supresión de oxígeno	Aplicación de material vegetal de cobertura.	Generación positiva de impactos sociales y ambientales.
	Método fácil de aplicar por la identificación de grietas para evitar el ingreso de oxígeno.	Afectación a los asentamientos que se ubican en la vecindad, instalaciones, infraestructura y personas.
	Impide que se propague la combustión por la presencia del oxígeno en el aire.	N/A
	Aplicación rápida de una cubierta de material para impedir la entrada de oxígeno o la remoción del material en combustión.	N/A

Nota: Ventajas y desventajas de las medidas de manejo y control de la combustión

5.3. Resultado objetivo 3. Matriz de valoración de impacto ambiental y económico como medida de selección de la medida de manejo ambiental para el control de la combustión interna.

Con la matriz detallada de impactos ambientales donde se calificó cada uno de acuerdo a la afectación positiva o negativa al ambiente, se realizó la tabla 26, donde se muestra el resumen del promedio de los impactos por componente con el fin de tener valores concretos. Lo anterior, facilitó la elección de la medida ambiental más adecuada y poder realizar una gráfica que represente y muestre los impactos positivos y negativos. (Ver anexo 1. Calificación de impactos)

Tabla 26. Resumen de impactos calificados

MEDIO	COMPONENTE	Supresión de Oxígeno	Aislamiento de zonas de combustión	Inyección de gas inerte	Excavar y reacondicionar
ABIÓTICO (SUELOS, AGUA PAISAJE)	Suelos	-25	-39	51	-63
	Ecosistemas Terrestres (flora y fauna)	-35	-42	-60	-66
SOCIOECONÓMICO Y CULTURAL	Demografía/Población	45	46	42	30
	Procesos Económicos	59	51	45	32
	Dimensión Espacial	47	48	53	50
	Político organizativo	32	15	17	14

En esta tabla se realizó una identificación, valoración y priorización de los principales aspectos ambientales e impactos ambientales que se generan en cada una de las medidas evaluadas.

El impacto negativo irrelevante y moderado en el componente suelos y ecosistemas lo que da una relación directa con el medio biótico y abiótico, se presentó con la medida ambiental “supresión de oxígeno”, ya que con esta medida la afectación al suelo es baja para formación del suelo, el ciclado de nutrientes y la producción de hábitat para las especies.

Los dos principales impactos negativos al ambiente encontrados fueron en el componente biótico y abiótico, con valores -25 y -35 respectivamente.

La calificación de los impactos de las otras medidas ambientales llega a ser impactos severos ya que su valor es superior a 50, lo que implica que la recuperación ambiental es irreversible o se recupera con mucha dificultad, presentando alta afectación ambiental.

En relación al impacto positivo socioeconómico, promediando estos parámetros, en la medida de “supresión de oxígeno” los valores son mayores al promedio de las otras medidas de control, de modo que, los beneficios pueden concebirse como una mejora en la dimensión social, económico o ambiental de la población que está dentro del área de influencia del proyecto y se entiende como ganancia de bienestar ya que el indicador es positivo, como se observa en la Fig. 36.

La generación de empleo que está vinculada directamente con la generación de expectativas, es uno de los impactos sociales que genera más beneficios económicos para las comunidades que se encuentran dentro del área de influencia del proyecto, logra determinar la retribución económica que puede llegar a ejercer esta medida.

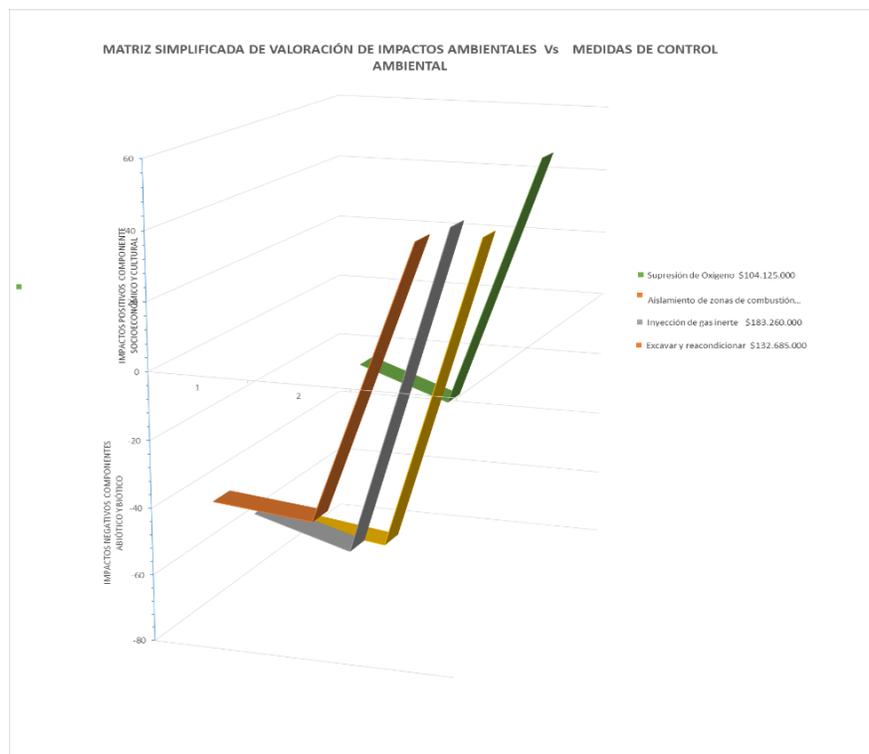


Fig. 36 Matriz simplificada de valoración de impactos ambientales vs medidas de control ambiental

Los impactos ambientales negativos pueden ser controlados en su totalidad mediante la correcta ejecución de las medidas de prevención y corrección, pero esta acción trae consigo una inversión, este monto puede reflejar el valor económico, por esta razón, si se hace un comparativo de la valoración económica de las medidas ambientales obtenemos los siguientes datos: (Ver anexo 1. Valoración completa)

Tabla 27. Valoración económica de las medidas de control

MEDIDA DE CONTROL	*VALOR ECONOMICO (UVT)	ABIÓTICO	BIÓTICO	SOCIOECONÓMICO Y CULTURAL
Supresión de Oxígeno	\$ 2.455	-25	-35	46
Aislamiento de zonas de combustión	\$ 3.465	-39	-42	40
Inyección de gas inerte	\$ 43.209	-51	-60	39
Excavar y reacondicionar	\$ 3.128	-63	-66	31

Nota: Se anexa APU con los valores originales del costo de cada medida de control en COP. (Ver anexo 2)

Los valores se convirtieron a valor UVT (Unidad de Valor Tributario) para facilitar la elaboración de la gráfica, este se calculó dividiendo el valor del APU en \$ colombianos / \$42.412 que corresponde al valor de UVT, con esto se obtiene el valor para graficar y comparar el costo de las diferentes medidas ambientales.

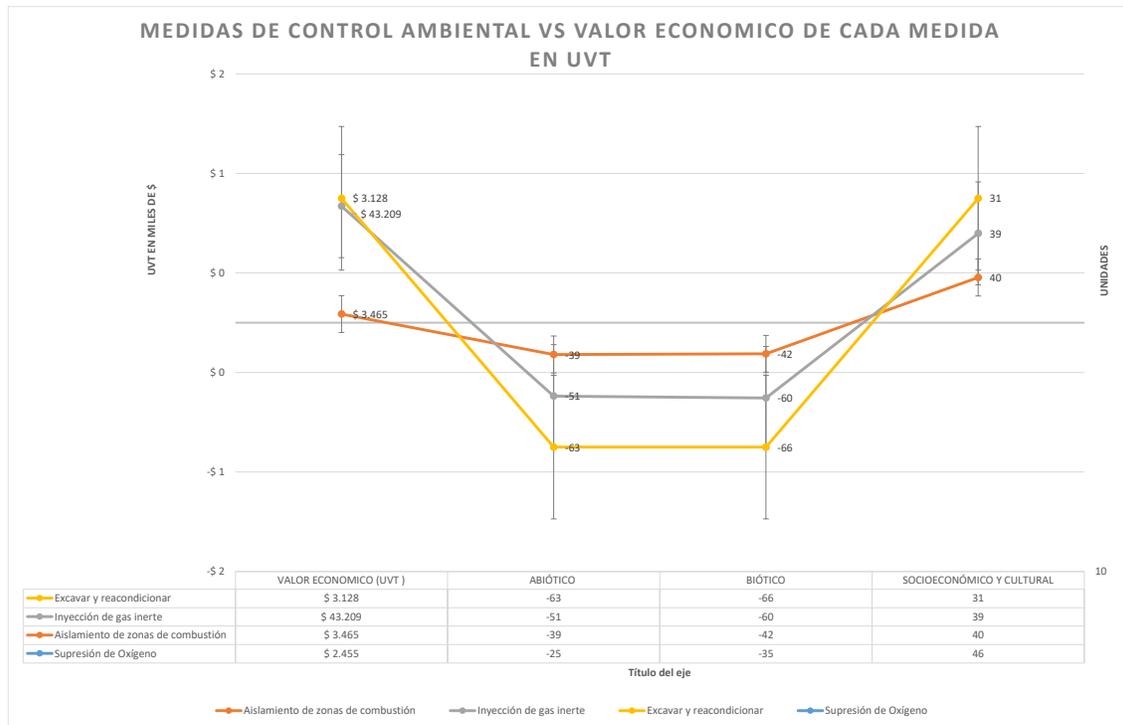


Fig. 37. Valoración económica de las medidas de control ambiental

Partiendo de la mencionado, la medida seleccionada para el control del proceso de combustión en la Masa de residuos del Morro de Moravia es “supresión de oxígeno”, dado ya que implica menor inversión y mayor beneficio económico, no se presenta afectación ambiental alta y el costo beneficio al ambiente es mayor como se observa en la gráfica. Se puede considerar una medida ambiental competente, ya que determina viabilidad ambiental, social y económica. Permite obtener un valor asequible para ejecutar la medida y como contraprestación un beneficio ambiental y social a la comunidad, son mayores los beneficios ambientales y sociales que el costo que genera.

5.4. Resultado objetivo 4. Diseño e implementación de la medida de control ambiental para el proceso de combustión interna del sitio en estudio.

Para el proceso de implementación de la medida de manejo de control ambiental cuya selección fue la supresión de oxígeno, esta se implementó en el área No 2, debido que es el área con la mayor emanación de gases y temperaturas altas según el resultado obtenido del proceso de caracterización inicial. Para dicha implementación se desarrollaron las siguientes actividades:

5.4.1 Mediciones de Pendientes y Áreas

Con la medición de las pendientes se buscó aumentar el factor de seguridad para preparar la superficie para la instalación del material de cobertura. Se realizó la reconformación topográfica de la sección donde encontramos el proceso de combustión, con el objetivo de realizar disminución en los porcentajes de pendientes de los taludes y verticales que pudieran generar inestabilidad o deformación del lugar.

En la Fig. 38 se observa una descripción general de los valores de los pendientes hallados en el Morro de Moravia.

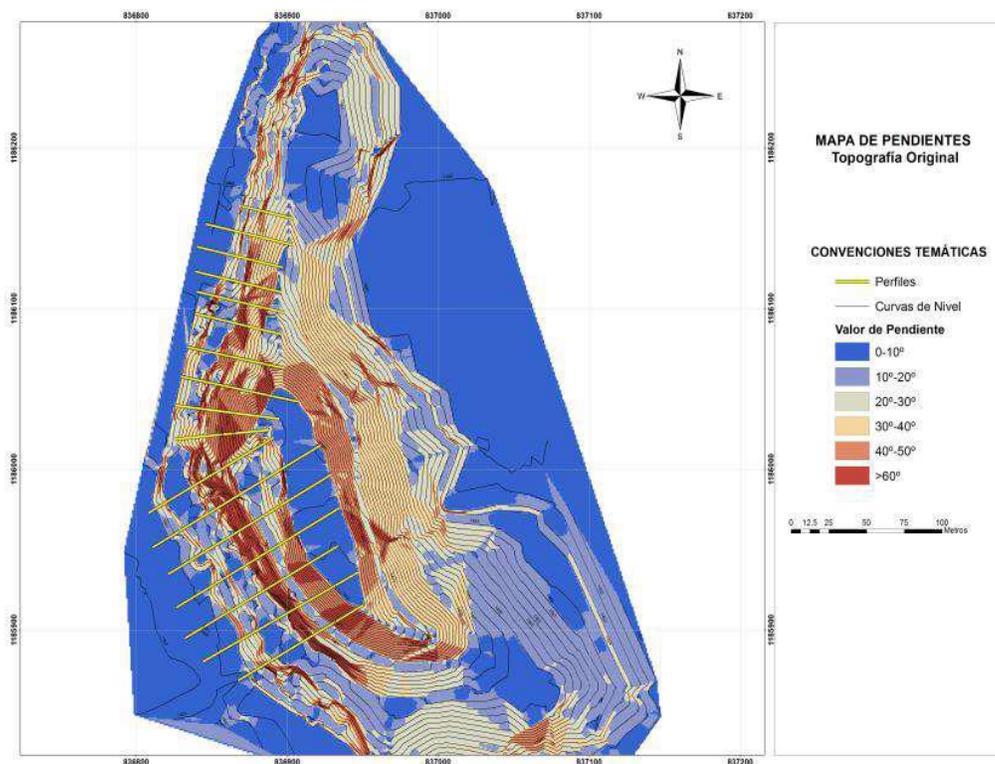


Fig. 38. Valores pendientes Morro Moravia

Con respecto al resultado obtenido en el cálculo de las pendientes del morro de Moravia, el cual es representado por la Fig. 38, se observa que el morro de Moravia presenta una topografía irregular debido a como se conformó en su momento la masa de residuos y las múltiples intervenciones

ocurridas allí. Ahora bien, las pendientes para cada una de las áreas delimitadas para el estudio presentan diferencias para las áreas 1 y 2 con respecto al área 3 y 4 donde el proceso de combustión es activo. En la tabla 28 se presentan los valores de las pendientes en grados por cada área.

Tabla 28. Valores de pendiente por área

Número de área	Valores Pendientes
Área 1	40° - 50 °
Área 2	40° - 50 ° y mayores
Área 3	30° - 40 °
Área 4	30° - 40 °

Como la medida de control fue implementada en el área No 2, la cual presenta activo el proceso de combustión, se calculó en porcentaje el perfil de dicha área con un porcentaje de pendiente del 72%. Seguidamente se presenta en el perfil calculado el corte por medio de excavación manual que se realizó con valor 12,930 m³. En la Fig. 39 se observa como fue el corte realizado al talud del área No 2 del Morro de Moravia para la implementación del material de cobertura y asegurar la estabilidad de la misma.

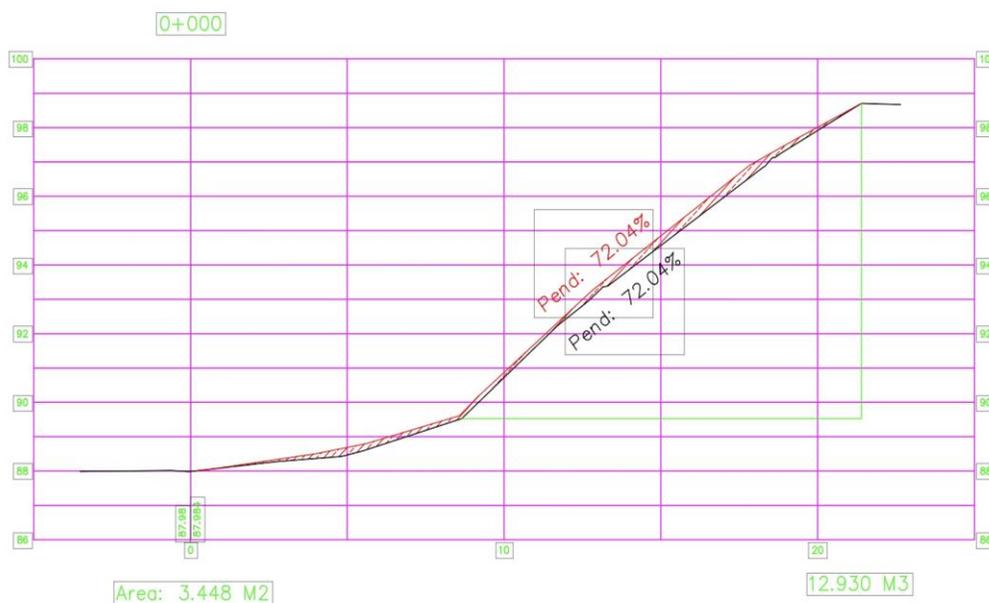


Fig. 39. Perfil de corte áreas No 2

5.4.2 Evaluación material de cobertura

Este proceso fue llevado a cabo en las parcelas previamente construidas y los puntos implementados para la valoración del material con respecto a la pérdida, basado en el método de reconocimiento de la FAO, la cual consiste en la medición aproximada de la pérdida de suelo a causa de la erosión [49]. Una ventaja de dicho método es el bajo costo de su implementación y muy práctica para su aplicación.

En la Fig. 40 se muestra los cm de pérdida de cada uno de los materiales evaluados cribado + Inerte arcilloso y cribado + lodo arcilloso.

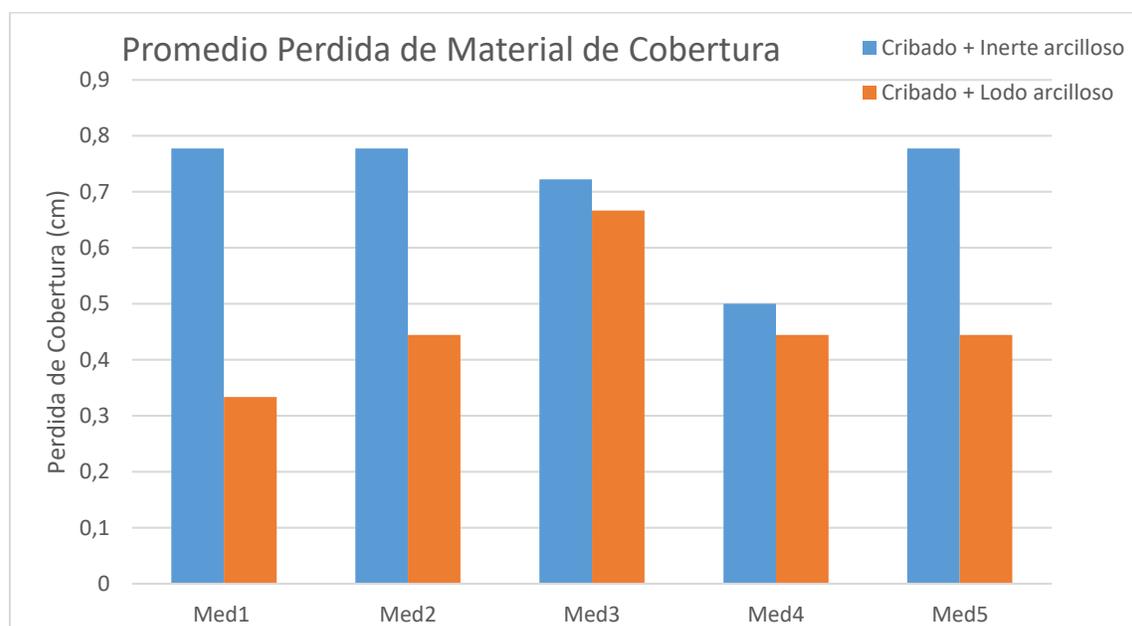


Fig. 40 Promedio perdido de material de cobertura

La evaluación del material de cobertura, arrojó como resultado que la cobertura más eficiente con respecto a la pérdida por factores ambientales y antrópicos es el cribado + lodo arcilloso, por consiguiente, es el material seleccionado para ser aplicado en el área No 2 para impedir el ingreso de material comburente al interior de la masa de residuos. En la gráfica 2 se observa que el material de cobertura cribado + lodo arcilloso perdió en el seguimiento realizado 2,29 cm, para el caso del

cribado + inerte arcilloso la pérdida fue de 4 cm lo que indica es este último material no es apto para aplicación con las condiciones del Morro de Moravia debido a que no se adhiere fácilmente a la matriz de suelo antrópica.

5.4.3 Diseño e Implementación de infraestructura en bioingeniería para la medida de manejo ambiental

Con base en las dimensiones de las áreas y las pendientes calculadas, se realiza el diseño e implementación de la infraestructura en bioingeniería para la estabilización del área No 2 donde es activo el proceso de combustión. Dicho proceso se realizó de la siguiente manera:

Diseño de esquema

Con respecto al diseño del esquema de obra de estabilización y bioingeniería, se muestra como resultados los diferentes esquemas que se implementaron para la construcción de los trinchos en madera inmunizada bajo la norma NSR 10 en su título G, el cual habla sobre las estructuras en madera clasificadas mecánicamente para la implementación de estructuras de contención. Para el caso de este estudio la madera seleccionada por facilidad de mercado y costos económicos fue el PINO PATULA (*Pinus Patula*), la cual se encuentra clasificada en el grupo de maderas ES6 de la norma NER 10 (REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE). En la Fig. 41 y 42 se muestra los esquemas planteados.

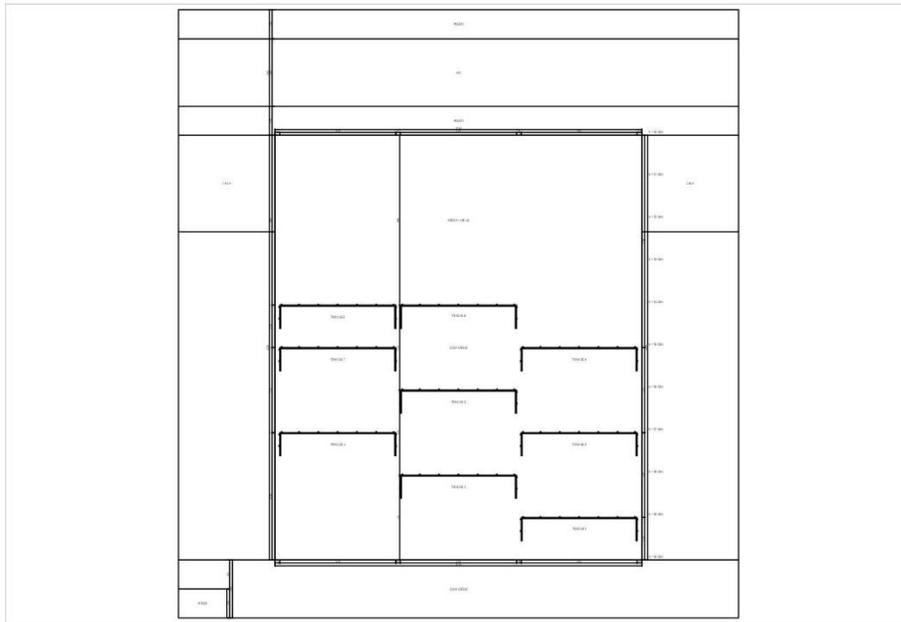


Fig. 41. Vista en planta de estructura de contención

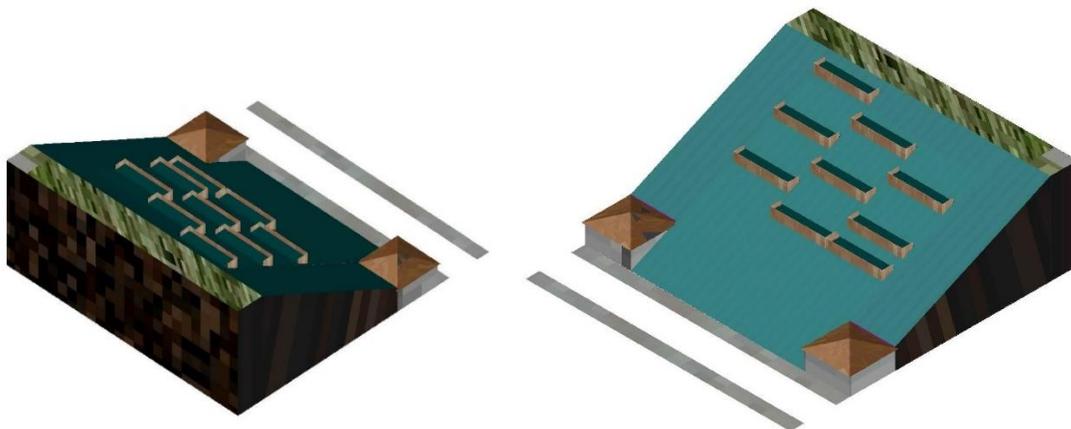


Fig. 42. Esquema de estructura en bioingeniería para contención área No 2

En la Fig. 43 se muestra el esquema en planta del trincho implementado para la estabilización del área No 2. Los materiales utilizados para esta implementación fueron madera inmunizada en PINO PATULA (*Pinus Patula*), las siguientes dimensiones; Tablas de 3 m de longitud x 20 cm de alto y 4 cm de espesor. Para el caso de los postes se implementaron postes de 2,20 de longitud por 10 cm de diámetro, este último se utilizó de dicha medida debido al peso que debe soportar una vez se adicione el material de cobertura en el área de implementación. Se elaboró concreto preparado en obra de 21 MPa, el cual es el concreto estándar para este tipo de estructura, cuya función fue ajustar el cimientto del poste y evitar su volcamiento. Para la unión de toda la estructura se utilizaron tornillos galvanizados tipo paraguas de 3/4" para anclar toda la estructura del trincho.

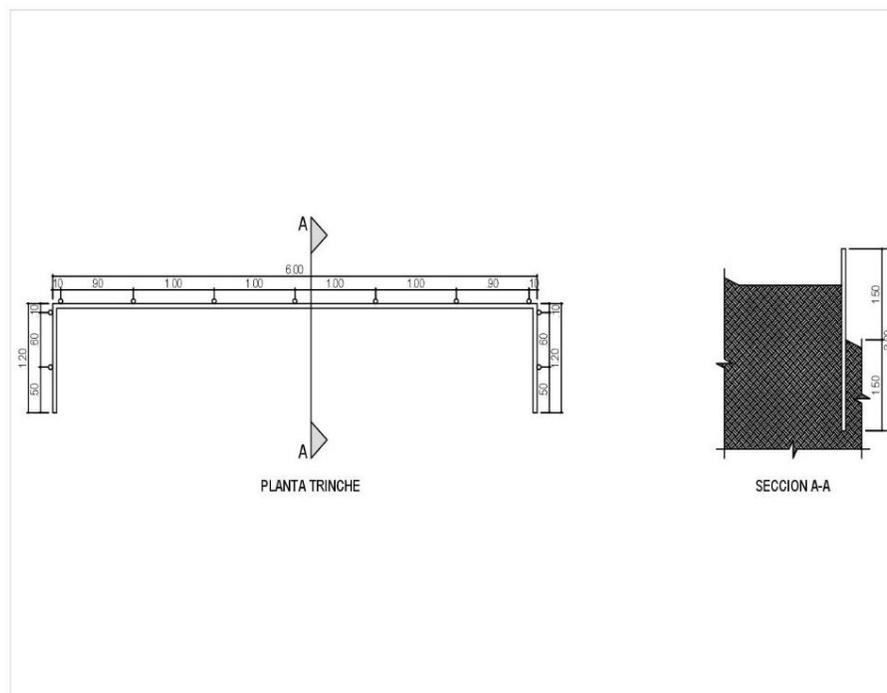


Fig. 43. Esquema planta de infraestructura de bioingeniería

En la Fig. 44 se puede observar la visión general de la intervención planificada para el Morro de Moravia. En dicha figura se puede observar las zonas de intervención y el cálculo de la pendiente en las secciones 15.00, 7.50 y 0. Por otro lado, el diseño y sus parámetros fueron enfocados en la **supresión de oxígeno**, la cual fue la medida seleccionada para el control ambiental al proceso de combustión interna de la masa de residuos del Morro de Moravia en el área No 2. Esta medida pretendió disminuir los efectos negativos que se presentan sobre el medio ambiente en la Morro de

Moravia, especialmente considerando la emisión de gases, la calidad de suelos, geología y agua, entre otras cosas. Esta medida puede ayudar a la mitigación de los efectos negativos y a la restauración de esta zona debido a que las medidas realizadas hasta el momento en esta zona requieren de medidas adicionales para transformar esta área y disminuir los factores negativos que se originaron por el vertimiento de desechos sólidos.

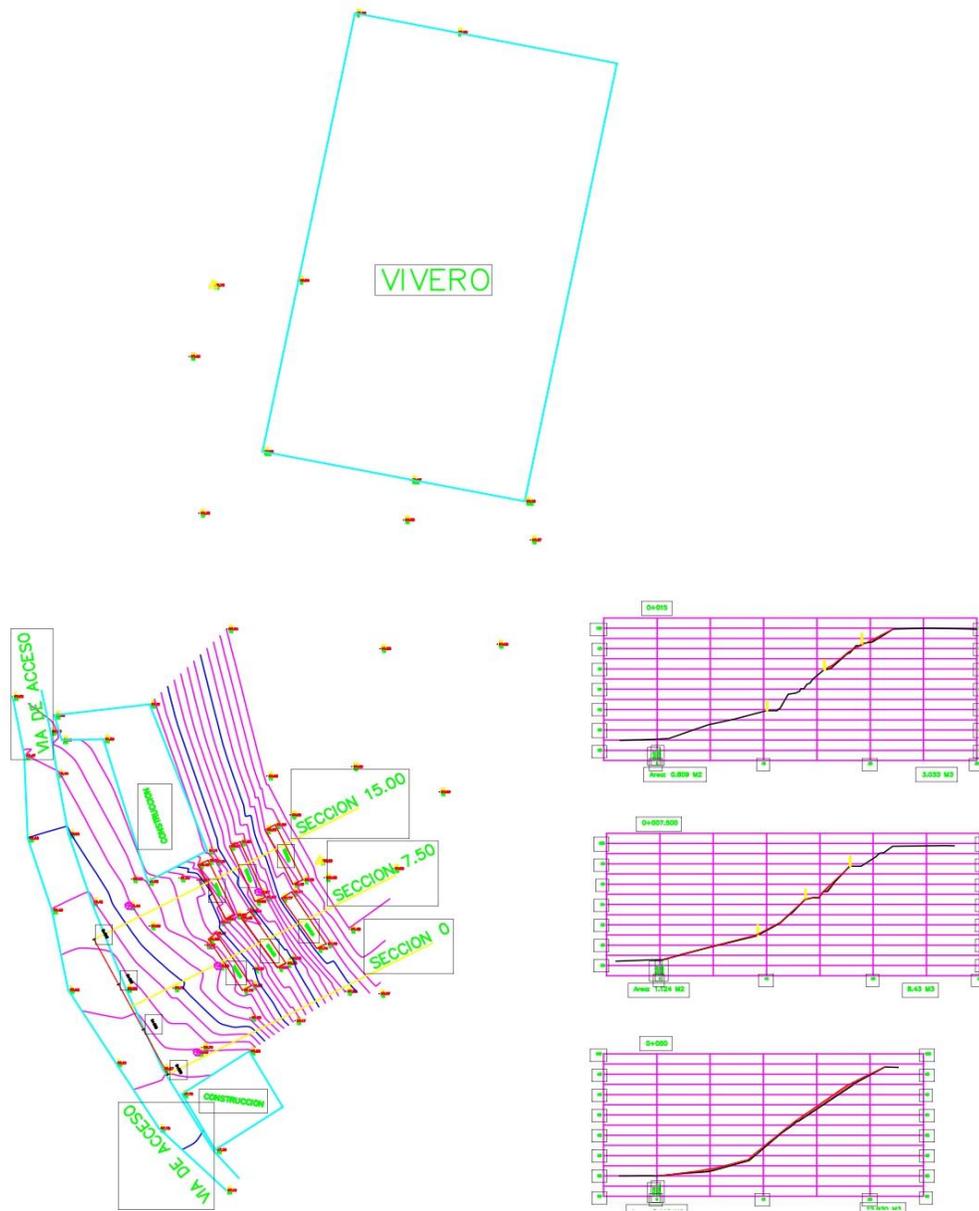


Fig. 44 Modelo de construcción medida de manejo

Disposición del material de cobertura

Una vez el material de cobertura fue seleccionado a través del método de reconocimiento de la FAO, el cual es Cribado + lodo arcillo, Se realizó el proceso de disposición del material de cobertura en el área 2 con el objetivo de cubrir grietas, residuos expuestos y vacíos presentes en la masa de residuos del Morro de Moravia. Dicha disposición se realizó de manera manual con jardineros del proyecto “Habilitación ambiental del Morro de Moravia”. Para el cálculo del material de cobertura para su disposición se utilizó la siguiente ecuación, según el RAS 2000 para los tapados de residuos sólidos en el sitio de disposición final.

$$V = A * EC \quad (4)$$

Donde:

V= Volumen de Material de cobertura a utilizar (m³)

A= Área de la zona problema (m²)

EC= Espesor de la cobertura al momento de la aplicación (m)

Cálculo del material:

$$V = 114\text{m}^2 * 0,3\text{m} = 34,2 \text{ m}^3$$

Con el material calculado, se dispuso el material y realizó un proceso de compactación según Collazos de manera con pisonés en madera con una densidad de compactación 700 kg/m³ [21]. La disposición se realizó en capas de 10 cm hasta llegar a 30 cm para facilitar el proceso de la compactación. Lo anterior se realizó según el RAS.



Fig. 45. Disposición y compactación material de cobertura

Seguimiento y monitoreo de la Medida de Manejo implementada

La implementación de la medida de manejo se realizó en el periodo de septiembre a noviembre de 2018. El seguimiento y monitoreo se realizó por 196 desde el 15 de febrero de 2019 se empieza el proceso de monitoreo en el área No2, la cual presentó los datos más elevados en los monitoreos de caracterización, seguidamente se realiza en las áreas No1, No3 y No4, con el fin observar la incidencia de la implementación de la medida en dichas áreas. El seguimiento y monitoreo termina el 30 de septiembre de 2019.

Los monitoreos realizados fueron ejecutados según las guías de la EPA [37] por sus siglas en inglés (Control Techniques for Particulate Emissions from Stationary Sources) y en la guía para sitios de disposición final de residuos sólidos del 2005 ISWA [53] por sus siglas en inglés (International Solid Waste Association).

Seguimiento inicial y final gases

En la Fig. 46 se muestra el comportamiento del CH₄ en cada área monitoreada desde la fase inicial o caracterización del proceso de combustión hasta la fase final que representan el seguimiento posterior a la implementación de la medida de manejo ambiental. Es sumamente importante precisar que la medida de manejo ambiental, fue implementada en el área No2 debido a que esta presentó dentro de la caracterización inicial e inspecciones en campo mayores rasgos asociados a procesos de incendios o combustión al interior de la masa de residuos del Morro de Moravia. De igual forma, se continuó con el seguimiento a las demás áreas con fin de descartar migración de la conflagración a las áreas No1, No3 y No4.

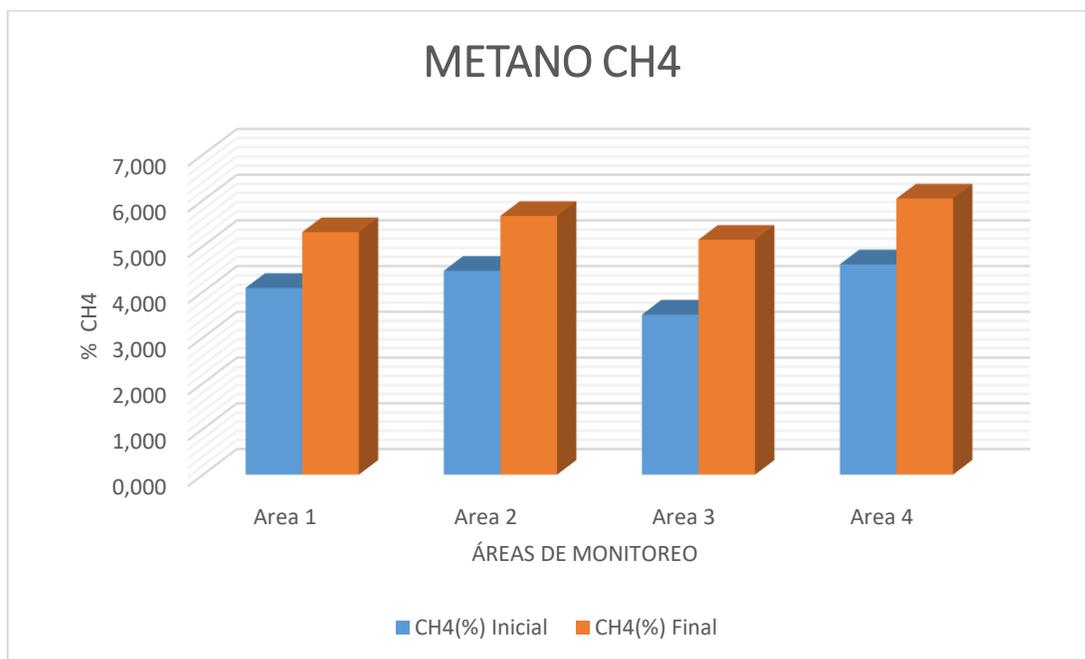


Fig. 46. Seguimiento Metano CH₄

Comparando los datos tanto del CH₄ inicial con el CH₄ final en cada una de las áreas, se evidencia que se presentó un aumento en la CH₄ final, es decir después de la implementación de la medida, se debe a que las condiciones al interior de la masa de residuos en estas áreas han cambiado a escenarios más anaerobios y que el O₂ se está excluyendo con éxito. Lo anterior concuerda con lo

expresa por la guía de operaciones de sitios de disposición final de la ISWA, donde a mayor Metano en un proceso de degradación es indicador que el Oxígeno se está disminuyendo [53].

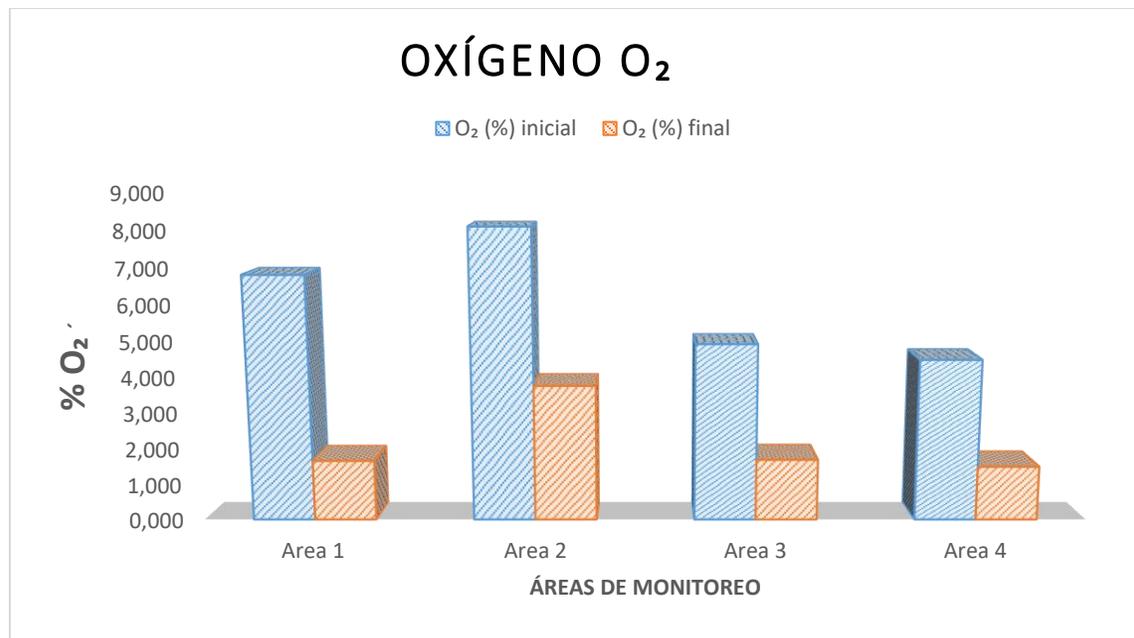


Fig. 47. Seguimiento Oxígeno O₂

Según la ISWA, la presencia de Oxígeno en concentraciones superiores al 1% indican que hay ingreso al interior de la masa de residuos y presenta condiciones propicias para ello [53]. El Morro de Moravia en las 4 áreas identificadas especialmente en el área No2 se presentan grietas, residuos expuestos y fisuras que han ocasionado que el aire ingrese al interior de botadero. Con lo anterior y observando los resultados obtenidos en el seguimiento al oxígeno desde su fase de caracterización hasta su fase final posterior a la implementación de la medida, se evidencia categóricamente una disminución sustancial del oxígeno posterior a la implementación de la medida en el áreas No2, hecho por el cual impacto positivamente a las demás áreas de monitoreo dado que su presencia del comburente disminuyó sustancialmente 3,9 % en comparación con la caracterización inicial realizada, la cual es un indicador muy positivo dado que medida implementada fue eficaz.

La premisa anterior es corroborable directamente con la concentración de Metano dado que su aumento al interior de masa de residuos ha disminuido paulatinamente el ingreso de Oxígeno en las áreas de medición, especialmente en el área No2.

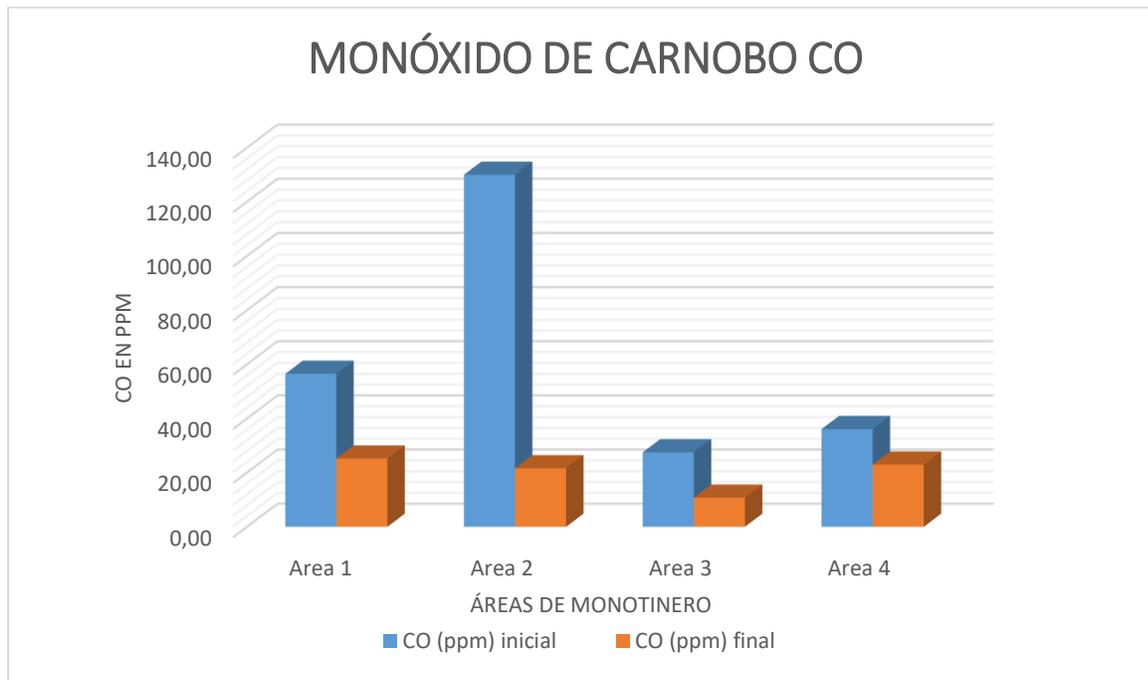


Fig. 47. Seguimiento Monóxido de Carbono CO

El Monóxido de Carbono es un gas inodoro e incoloro, este se genera por un proceso de combustión incompleta y puede causar daños a la salud humana [67]. La Fig. 48 muestra el seguimiento realizado al Monóxido de Carbono desde la fase de caracterización inicial del proceso de combustión hasta su fase final, la cual es el seguimiento posterior a la implementación de la medida de control ambiental “Supresión de Oxígeno”. Como resultado a la implementación de la medida de manejo para el proceso de combustión interna en el Morro de Moravia, se evidencia una disminución significativa en las emisiones de CO desde el interior de la masa de residuos, que para el área No1 la disminución paso de 56ppm a 25 ppm lo que representa una baja del 55% con respecto a la caracterización inicial CO, para el área No3 la disminución paso de 27ppm a 10,7, lo que representa una baja del 61% CO con respecto a la caracterización inicial, para el área No 4 la disminución paso de 36 ppm a 23 ppm lo que representa una baja del 36% en relación a la caracterización inicial de CO. Ahora bien, para el área 2 donde se implementó la medida de manejo se evidencia una baja sustancial del CO pasando de 130 ppm a 21,614 ppm, dicho valor en términos de porcentaje representa una baja del 83% de emanación de CO posterior a la implementación de la medida de manejo.

En comparación con los resultados en la Fig. 9 para el CO (ppm) final, es decir, posterior a la implementación de la Supresión de Oxígeno y los valores de referencia de la ISWA en su guía de operación de rellenos sanitarios para incendios, los cuales presentan intervalos entre 0 -25 sin indicación de incendios, 25 – 50 posible incendio en el área, 100 – 500 materiales ardiendo lentamente, 500 – 1000 ppm reacción exotérmica o incendio, > 1000 incendio en el área [53], se puede evidencia que los valores de las 4 áreas monitoreas no superan las 25 ppm de emisiones CO, lo que indica según la ISWA que dichas áreas se encuentran en el intervalo de 0 – 25 ppm de CO lo que hace referencia a la no presencia de incendios al interior de la masa de residuos principalmente en el área No2 donde los rasgos de incendios fueron más activos allí.

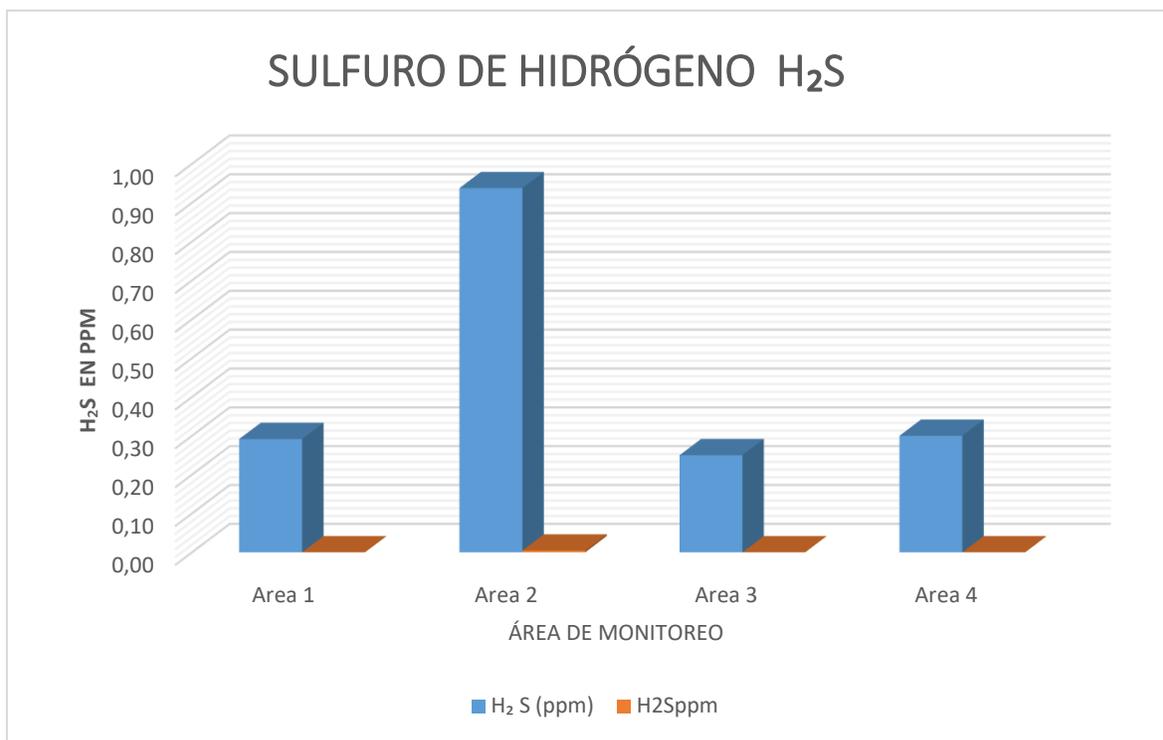


Fig. 48. Seguimiento Sulfuro de hidrógeno H₂S

El sulfuro de Hidrógeno es un gas incoloro, el cual es resultante de la degradación de la residuos y tratamiento de aguas residuales, según la NIOSH (El Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional de los Estados Unidos) en concentraciones superiores a 10 ppm representa un riesgo de tóxico para el ser humano [68]. La Fig. 49 muestra el seguimiento realizado al sulfuro de

Hidrógeno desde la fase inicial de caracterización hasta la fase final, la cual es posterior a la medida de medida de manejo Supresión de Oxígeno. Se evidencia una reducción del H₂S posterior a la implementación de la medida de manejo Supresión de Oxígeno, su tendencia en el proceso de seguimiento es a 0% el cual indica que fue positiva la medida de control para la disminución de dicho gas. En comparación con los límites de la norma planteada por NIOSH el monitoreo realizado no supera el 10 ppm contemplada y no presenta riesgo para la comunidad cercana al área No2.

Seguimiento inicial y final Temperatura

El monitoreo de la temperatura interna de los sitios de disposición final de RSU es un seguimiento útil para poder establecer los riesgos y alcances de incendios [53]. Con base a la Fig. 50 se logra evidenciar el seguimiento realizado a las áreas identificadas en la caracterización y las posteriores mediciones realizadas una vez fue instalada la medida de manejo Implementada. En los resultados obtenidos se logra evidenciar que las temperaturas en las áreas No1, No3 y No4 tanto en la caracterización inicial como en el seguimiento final posterior a la implementación de la medida de manejo guardar una similitud es decir que permaneció constante lo que nos indica que el proceso de conflagración no migro hasta dichas áreas. Lo anterior, guarda una relación estrecha con lo expresado en la guía de operaciones de rellenos sanitarios de la ISWA dado que las temperaturas monitoreadas posterior a la implementación de la medida de control no supera los 55 ° C y según la literatura temperaturas menores a este valor representan una temperatura normal del sitio de disposición final y se descarta incendios.

Para el caso del área No2, la cual guarda la particularidad que la medida de manejo fue implementada allí, se evidencia con respecto a las temperaturas de caracterización inicial y a las temperaturas de seguimiento o final que hay una disminución de 32,5 ° C, la cual nos indica que el incendio presentando fue controlado con la medida implementada. Comparando la temperatura final con los valores de referencia de la ISWA se puede apreciar que se encuentra por debajo de 55 ° C, implicando un cambio en las condiciones biológicas al interior de la masa de residuos pasando de un escenario anormal elevado a temperaturas normales de un sitio de disposición final.

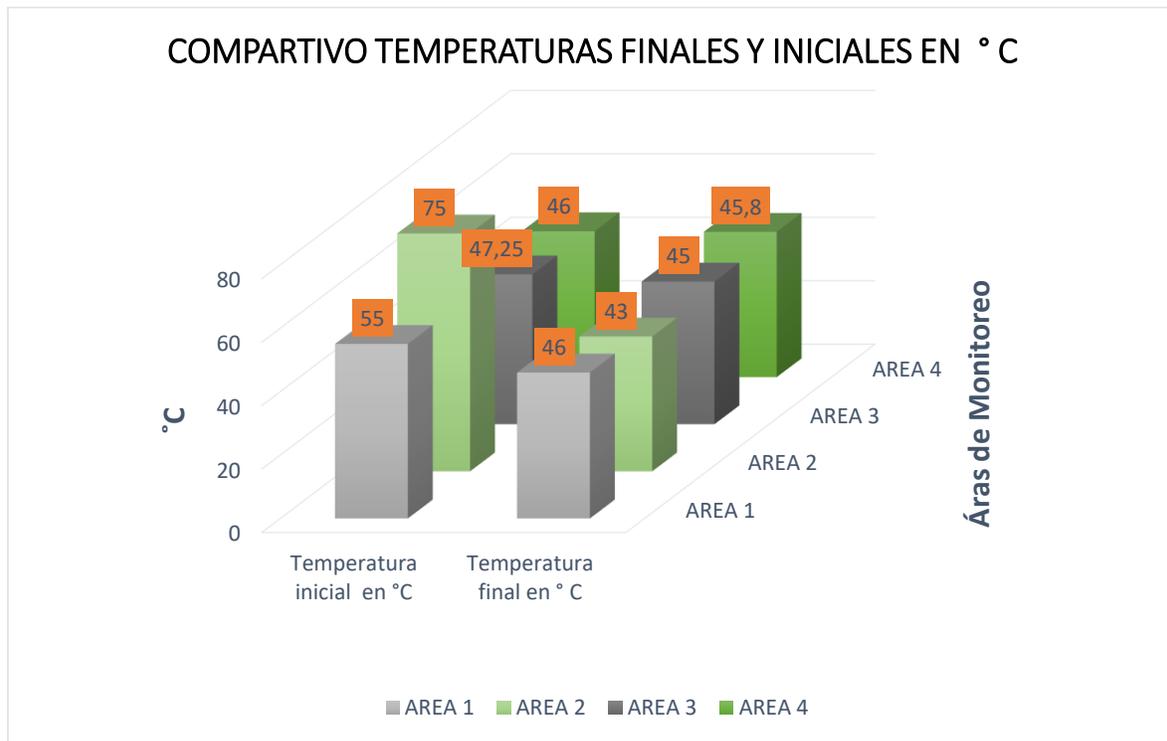


Fig. 49. Seguimiento a las temperaturas °C

6 CONCLUSIONES

- El manejo, tratamiento y disposición de los residuos sólidos municipales se ha considerado una de los mayores desafíos para las autoridades ambientales, en ese particular la situación actual del morro de Moravia le ha representado a la ciudad de Medellín el requerimiento y aplicación de una serie de medidas para mitigar el impacto ambiental del vertedero de residuos sólidos que se encontraba en determinado espacio. En consecuencia, se han ido aplicando una serie de actividades para consolidar acciones e implementar medidas de manejo ambiental eficaces.
- La inestabilidad del terreno en la zona suroccidental del Morro de Moravia, está asociada a los procesos de combustión interna, ya que estos generan apariciones de grietas, hundimientos y desmoronamiento de zonas bajo concreto; esta inestabilidad incrementa el riesgo de afectaciones a la población que circula en la zona y en mayor proporción a las viviendas aledañas. El más evidente riesgo corresponde a un posible deslizamiento del material antrópico de las laderas del sector en estudio.
- El Morro de Moravia fue declarado por el Ministerio del Interior y de Justicia como sitio de calamidad pública en 2006, lo anterior ocurrió, por sus condiciones elevadas al riesgo químico y microbiológico. En este sentido, se iniciaron unas series de intervenciones ambientales y procesos investigativos para la habilitación ambiental del lugar, hecho que ocasionó la identificación de anomalías al interior de la masa de residuos por la evidencia frecuente de salidas de gases e incendios recurrentes, los cuales fueron monitoreados y medidos con base a la Guía de operaciones de sitios de disposición final de RSU de la ISWA. Es de considerar, que los procesos de seguimiento y monitoreos iniciales en las áreas 4 identificadas en las inspecciones de campo ejecutadas, mostraron en el área No 2 concentraciones altas en Monóxido de Carbono CO de 100 ppm y Temperaturas superiores al 65 °C, lo que indica según ISWA incendios en el sitio de disposición final en dicha zona.

-
- De acuerdo con la caracterización inicial realizada, se evidencia en las áreas 4 áreas monitoreadas concentraciones de Oxígeno % y Metano% lo que estableció un escenario propicio para la conformación del triángulo de la combustión y la posterior generación de la conflagración en el área No 2, la cual arrojó valores superiores 8% en oxígeno y en 4 % en metano. Con lo anterior y según la ISWA valores inferiores al 40% de CH₄, son indicadores que el Metano se está quemando al interior de la masa de residuos y posiblemente se encuentren materiales ardientes lentamente.
 - Posteriormente en la revisión bibliográfica de las medidas de control se identificaron trabajos realizadas a nivel nacional e internacionales para contextualizar a los autores de las medidas implementadas y así sentar un precedente para contribuir a la escogencia de la medida que puede ser implementada en el morro. De igual manera, en dicha revisión se valoraron las ventajas y desventajas de cada medida con el propósito de interpretar de manera exacta al momento de realizar dicha elección al evaluar sus impactos, costos y mejora en la calidad de vida de la comunidad.
 - La revisión bibliográfica confirmó información importante para reconocer que en un futuro se espera que los métodos tradicionales de disposición de residuos que presentan un menor costo, como lo es el relleno sanitario y botaderos a cielo abierto sean remplazados por otros métodos y se apliquen medidas de control ambientales inmediatas más efectivas como separación en fuente, reciclaje y aprovechamiento de la materia orgánica.
 - Gracias a la realización de la matriz de impacto ambiental de Conesa se logró establecer que las principales variables de impacto en el Morro de Moravia se relacionan con las variables geológicas, de contaminación por gases, pérdida del material vegetal, de contaminación de fuentes hídricas y de la afectación de la salud humano constituyéndose, este último, como un problema de salubridad pública. En efecto, los resultados del presente estudio son compatibles con otras investigaciones que han determinado que el Morro de Moravia se constituye como un área que se caracteriza por la presencia de elevados niveles de gases tóxicos para la salud humana y la presencia de diversos desechos sólidos que

todavía no se han logrado degradar luego de más de 35 años de que este vertedero haya sido clausurado por la Alcaldía de Medellín.

- La valoración económica ambiental significa poder contar con un indicador de la importancia del ambiente en el bienestar social, y este indicador debe permitir compararlo con otros componentes del mismo.
- Este proceso se centra en la cuantificación de la disponibilidad social con base a la disponibilidad individual que pueden expresar los usuarios o no usuarios de los recursos naturales. Para llevar a cabo una valoración reveladora se requiere considerar algunos factores como las características del grupo de personas afectadas y el espacio temporal, para que se refleje en términos cuantitativos las preferencias individuales por los bienes ambientales o la disposición a aceptar por la pérdida de calidad ambiental.
- La ventaja principal de la medida de manejo ambiental “Supresión de oxígeno” es que su aplicación se puede realizar de forma sencilla, los datos y costos necesarios no son de difícil acceso, por lo que resultaría relativamente económica su aplicación comparada con las otras medidas de manejo ambiental. Es un proceso que implica la pérdida de las capas de suelo y por ende la alteración de los horizontes orgánicos. Los manejos de la remoción de los suelos son actividades que pueden realizarse de forma responsable, siguiendo las medidas planteadas, con el seguimiento y monitoreo pertinente, y bajo la premisa de no perder la calidad natural con la que cuenta el ecosistema. En segunda instancia, el manejo de las especies que se ven afectadas por el proyecto, puede llegar a conservarse siempre y cuando se realice con personal entrenado y capacitado para tales labores, logrando una reubicación idónea y garantizando su protección sin la necesidad de afectar sus condiciones de vida.
- Teniendo en cuenta la propuesta económica y la valoración ambiental de esta medida, se considera una propuesta efectiva para la prevención o corrección de impactos, sustentada en indicadores de los medios biótico, abiótico y socioeconómico y el valor de esta inversión propuesto representaría el costo de oportunidad de evitar el deterioro ambiental.

- La medida de control ambiental elegida pretende generar un beneficio a la comunidad que recibe los impactos directos de esta actividad, enfocándose en brindar herramientas adecuadas para valorar impactos ambientales con base en la relación que tiene cada impacto con las diferentes metodologías de valores de uso directo, esto se realizó a través de la identificación de los impactos relevantes.
- En ese orden de ideas, se encontró que a pesar de los programas de intervención ambiental que han sido desarrollados por las entidades gubernamentales y regionales, todavía se encuentran factores de riesgo para la sostenibilidad ambiental. De esa manera, el análisis del presente estudio determinó que una de las opciones para mitigar los efectos negativos de la contaminación del sector se enfoca en supresión de oxígeno, dicha metodología se ajusta a las necesidades y realidades del entorno analizado. En otras palabras, esta opción permite controlar la emisión de los gases a través del cierre de las aberturas, grietas y residuos expuesto con el fin de impedir el ingreso del comburente al interior de la masa de residuos. En consecuencia, la medida de manejo ambiental Supresión de Oxígeno contribuyó en la disminución de la emisión de gases y presencia de incendios en la zona de influencia, lo cual adquirió una especial relevancia por asentamientos humanos y mejoría de la calidad de vida de los individuos.
- El seguimiento realizado a las variables asociadas al proceso de combustión posterior a la implementación de la medida de manejo, Muestran tendencias a la disminución en las concentraciones de oxígeno y aumento en el metano en las 4 áreas, obteniendo valores entre 1% y 4% para el Oxígeno y el Metano entre 4 % y 8%. Lo que nos indica que a medida que el metano aumente paulatinamente se excluye el oxígeno y las condiciones al interior de la masa inician a disminuir temperaturas.
- Los índices bajos en las variables medidas, no es un indicador final de que el proceso de combustión en el Morro de Moravia fue controlado, por el contrario, puede que emigre a otros lugares donde encuentre las condiciones ideales y haya quema de material. Por consiguiente, es sumamente importante la continuidad de monitoreos y observaciones estrecha del proceso.

- El Monóxido de Carbono (CO) es el principal producto de un proceso de combustión incompleto, se observa que las concentraciones pasaron de 130 ppm a $5 \pm$ ppm después de la implementación de la medida de manejo, la cual muestra disminución considerable en las concentraciones del CO y actividad de la combustión en la masa de residuos del Morro de Moravia.
- Los monitoreos realizados a las temperaturas al interior en la masa de residuos del Morro de Moravia pasaron de un promedio de $75 \text{ }^\circ\text{C}$ a $40 \text{ }^\circ\text{C}$ en el área No_2 , la que evidencia una disminución en su zona caliente de $33 \pm \text{ }^\circ\text{C}$, debido a la poca actividad biológica elevada y la disminución del proceso de combustión.
- La vinculación de las entidades estatales, universidades como entes académicos y científicos, sector privado y comunidad, demuestran la factibilidad de seguir implementando proyectos para la habilitación ambiental del Morro de Moravia, apuntando a la sostenibilidad tanto del mismo como la del barrio Moravia obteniendo resultados ambientales, sociales y económicos con impactos positivos.

7 RECOMENDACIONES

- La conservación de los recursos ambientales y el diseño de medidas que mitiguen el impacto de las actividades humanas sobre los recursos naturales son esenciales en el mundo actual. De esa manera, los estudios que tengan como finalidad mejorar las condiciones medioambientales de los procesos son fundamentales para mejorar la calidad de vida de los seres humanos. Así, los estudios que analicen las condiciones ambientales del Morro de Moravia adquieren especial relevancia al considerar que esta zona está habitada 500 personas conformadas en 150 familias que requieren de medidas que ayuden a recuperar el ambiente de la zona y acelerar los procesos que ya se han iniciado en esta área.
- Construir un plan de prevención y control de incendios es muy importante para todos los sitios de disposición final. En este plan, se deben incluir aspectos fundamentales vinculados al lugar, como las características del sitio, los recursos de extinción de incendios, los niveles de alerta de incendio en el Morro de Moravia, la estructura de mando en el incidente, las responsabilidades y las medidas de respuesta al incendio, los métodos de extinción de incendios, y las estrategias para la reducción de riesgos de incendio en el Morro.
- Se recomienda tener continuar con las mediciones en los puntos instalados y ampliar las áreas de monitoreos a otras zonas, esto con el fin de mitigar y prevenir incendios, desestabilización de terreno e impactos negativos para la mejora de las condiciones de la calidad de vida de los moradores.
- De esa manera, es indispensable que se analicen medidas para la mitigación de los efectos adversos que tienen los procesos de combustión interna en el Morro de Moravia porque es necesario que se adopten medidas como las establecidas en el presente estudio, para mitigar los impactos negativos de la contaminación medioambiental y así, ofrecer mejores

condiciones de vida para los pobladores de esta zona en un futuro, con la implementación de nuevas estrategias con avance tecnológico e investigación.

- De la misma manera, se recomienda seguir con los estudios que se realizan sobre esta temática tanto a nivel público como educativo porque permiten afianzar los conocimientos adquiridos sobre este tipo de problemáticas, y aportar soluciones que permitan aunar esfuerzos institucionales para proponer intervenciones que tengan un efecto positivo tanto en la conservación de los recursos ambientales como en el mejoramiento de las condiciones de vida de los seres humanos.

8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] World Bank Group, «A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050 "What a Waste 2.0",» Washington, D.C., 2018.
- [2] Departamento Nacional de Planeación " Dirección de Desarrollo Urbano", «Programa para el Manejo Integral de Residuos en Entidades Públicas,» Bogotá D.C., Colombia, 2019.
- [3] Departamento Nacional de Planeación "Compes 3874", «Pólítica Nacional Para La Gestión de Integral de Residuos Sólidos,» Bogotá D.C., Colombia, 2016.
- [4] K. M. Noguera y J. T. Olivero , «Los Rellenos Sanitarios en Latinoamérica: Caso Colombia,» *Revista Académica Colombiana de Ciencias*, vol. XXXIV, n° 132, pp. 347-356, 2010.
- [5] Superintendencia de servicios públicos domiciliarios, «INFORME NACIONAL DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS,» BOGOTA D.C, 2020.
- [6] Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, «Guía de Planeación Estrategica Para el Manejo de Residuos sólidos de Pequeños Municipios en Colombia,» Bogotá D.C., Colombia, 2017.
- [7] L. F. Pinzon Uribe , «Influencia de los Rellenos Sanitarios en el Cambio Climático,» *Revistas Facultad de Ingeniería, Investigador Grupo TAYQUITE*, 2010.
- [8] Minambiente, «Guía Ambiental Saneamiento y Cierre de Botaderos a Cielo Abierto,» Bogotá D.C., Colombia, 2002.
- [9] J. Sánchez Gómez, «Guía para el control de incendios en vertederos de residuos sólidos,» Ciudad de México , 2021.

-
- [10] O. Pohle Morales, «Factores A Considerar Para la Prevención y Control de Incendios en Sitios de Disposición Final de Residuos sólidos Municipales,» de *XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, Cancún, México, 2002.
- [11] M. S. Sánchez Pinzón , «Contaminación por metales pesados en el botadero de basuras de moravia en medellín: Transferencia a flora y fauna y evaluación del potencial fitorremediador de especies nativas e introducidas,» Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de ciencias, Programa de posgrado, Departamento de química, Bogotá, 2010.
- [12] J. Montoya , O. Flecha , A. Gallego , J. Morató, D. Viadé y O. Cuesta, «Moravia como ejemplo de transformación de áreas urbanas degradadas: tecnologías apropiadas para la restauración integral de cuencas hidrográficas.,» *NOVA*, pp. 1-120, 2011.
- [13] H. Martinez y L. Sabogal , «Informe final del grupo de geotecnia en: Estudio piloto para la recuperación del Morro de Moravia, Fase I.,» Medellín, 2009.
- [14] Banco Mundial , «www.bancomundial.org,» 20 9 2018. [En línea]. Available: <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2018/09/20/global-waste-to-grow-by-70-percent-by-2050-unless-urgent-action-is-taken-world-bank-report>. [Último acceso: 18 7 2021].
- [15] WORLD BANK GROUP, «WHAT A WASTE 2.0. A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050.,» WASHINGTON, 2018.
- [16] P. Tello, D. Campani y D. Rosalba, Gestión Integral de residuos sólidos urbanos, Ciudad de México: Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental - AIDIS, 2018.
- [17] G. Ferro, América Latina y el Caribe hacia los objetivos de desarrollo sostenible en agua y saneamiento, Santiago de Chile: Cepal, 2017.
- [18] M. Usaquén y M. Sánchez, «Determinantes de la generación de residuos sólidos en diez municipios representativos del departamento de Cundinamarca 2007-2012,» *Revista Criterio Libre*, vol. 12, nº 20, pp. 140-161, 2014.

-
- [19] P. Sánchez, J. Cruz y P. Maldonado, «Gestión de residuos sólidos urbanos en América Latina: un análisis desde la perspectiva de la generación,» *Finanzas. Polit. Econ.* , vol. 11, nº 2, pp. 321-336, 2019.
- [20] Superservicios , «Informe Nacional de disposición de residuos sólidos,» Bogota D.C, 2019.
- [21] H. Collazos, *Diseño y Operación de Rellenos Sanitarios*, Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2008.
- [22] Superservicios, «Informe de disposición final de residuos sólidos - 2018,» Departamento Nacional de Planeación, Bogotá, 2019.
- [23] C. Calva y R. Rojas, «Diagnóstico de la gestión de residuos sólidos urbanos en el municipio de Mexicali, México: Retos para el logro de una planificación sustentable,» *Información tecnológica*, vol. 25, nº 3, pp. 59-72, 2014.
- [24] T. Cárdenas, R. Santos, A. Contreras, E. Domínguez y J. Domínguez, «Propuestas metodológica para el sistema de gestión de los residuos sólidos urbanos en Villa Clara,» *Tecnología Química*, vol. 39, nº 2, pp. 23-34, 2019.
- [25] M. Marquez, *Combustión y quemadores*, Barcelona: MARCOMBO, S.A., 1989.
- [26] R. Garcia , «Combustión y Combustible,» 2001.
- [27] J. Forero, «Evaluación del impacto ambiental de Botaderos Municipales.,» Bogotá., 2009.
- [28] G. González , «Optimización del proceso de incineración de residuos sólidos Municipales,» México D.F, 2003.
- [29] Consejo Colombiano de Seguridad, «Portal de Conferencias campus virtual,» [En línea]. Available: <https://ccs.org.co/el-fuego-y-los-incendios/>. [Último acceso: 15 09 2022].
- [30] Ministerio para la transición y el reto demográfico , «Vicipresidencia tercera Gobierno Español,» [En línea]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/default.aspx>. [Último acceso: 26 09 2022].

-
- [31] OMS , «Control de la contaminación ambiental Capítulo 55,» Alemania , 1995.
- [32] J. Jaramillo, «Guia para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios,» Medellín , 2003.
- [33] L. Milosevic´, E. Mihajlovic´, A. Dordevic´ y J. Radosavljevic´, «General PRINCIPLES AND CHARACTERISTICS OF FORMATION AND OUTBREAK OF SANITARY LANDFILL FIRES,» *Safety Engineering*, pp. 91-95, 2015.
- [34] ISWA , «Guia de Oporeaciones Rellenos Sanitarios,» Viena , 2010.
- [35] A. Adeolu y O. Adebayo, «An assessment of landfill fires and their potencial healtj effects - a case study or a municipal solid waste landfill in Lagos, Nigeria.,» *Researchgate*, vol. 2, pp. 22-26, 2012 .
- [36] FEMA, «Landfill fires their magnitude, characteristics and mitigation. United States Fire Administration, National Fire Data Center.,» VIirginia, 2010.
- [37] EPA, «Subsurface Heating Events at Solid Waste and construction and demilition debris landfill: best managemet practices,» 2011.
- [38] M. Szanto Narea , «Modelo de gestión de residuos y emergencias de rellenos sanitarios,» Chile, 2016.
- [39] I. Martínez, *Termodinamica básica y aplicada*, México: MacGraw Hill, 2008.
- [40] Greenpeace, «Incineración de residuos en la ciudad de México. El gran obstáculo para transitar hacia una ciudad sostenible,» Greenpeace , Nueva York, 2017.
- [41] CEPAL, «Guía general para la gestión de residuos sólidos domiciliarios,» Copyright © Naciones Unidas, Santiago, Chile, 2016.
- [42] International Solid Waste Association - ISWA, «LANDFILL OPERATIONAL GUIDELINES 3 EDITION,» France, 2019.
- [43] M. Bates , «Managing Landfill Site Fires in Northamptonshire,» Northampton, 2004.

-
- [44] R. Sampieri, Metodología de la Investigación, Washigton: McGRAW-HILL., 2015.
- [45] M. S. Sánchez, A. Bedoya y R. Barahona, «Estudio preliminar de la fauna en el morro de basuras de Moravia y presencia de metales pesados en artrópodos y roedores,» *Scientiarum*, vol. 15, nº 1, pp. 49-58, 2010.
- [46] A. Garmendia Salvador , A. Salvador Alcaide, C. Crespo Sánchez y L. Garmendia Salvador , Evaluación de impacto ambiental, Madrid: PEARSON-PRENTICE HALL, 2005.
- [47] MINAMBIENTE , «Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible,» 2010. [En línea]. Available: <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/decreto-2820-de-2010/>. [Último acceso: 24 01 2022].
- [48] MINVIVIENDA, «Ministerio de Vivienta, Ciudad y Territorio,» 8 JUNIO 2017. [En línea]. Available: <https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/normativa/resolucion-0330-2017.pdf>. [Último acceso: 22 09 2022].
- [49] FAO, «Capitulo 2- Métodos de reconocimiento,» 1976.
- [50] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, «REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE NSR10,» Bogotá D.C. , 2010.
- [51] Iconted, «NTC 2083: 1985, Madera. Madera preservada. Clasificación y requisitos,» Bogotá D.C, 1985.
- [52] ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRA , «Informe final contrato interadministrativo Universidad Nacional -Área metropolitana No CD 393 DE 2011,» Medellín , 2011.
- [53] ISWA, «INTERNATIONAL SOLID WASTE ASSOCIATION,» Brussels, 2010.
- [54] INTERNATIONAL SOLID WASTE ASSOCIATION, «Guia de operaciones en rellenos sanitarios,» Rotterdam, 2010.

-
- [55] NOISH, «Preventing Carbon Monoxide Poisoning from Small Gasoline-Powered Engines and Tools,» Washington, D.C., 1996.
- [56] EPA, «GUIDANCE FOR EVALUATING LANDFILL GAS EMISSIONS FROM CLOSED OR ABANDONED FACILITIES,» North Carolina, 2005.
- [57] J. Arango Gómez , F. Sierra Vargas y V. Silva Leal , «Análisis exploratorio de investigaciones de investigaciones sobre los motores de combustión interna que trabajan con biogas,» *An exploratory analysis of existing research on internal combustion engines operating with biogas*, vol. 18, n° 39, pp. 152 - 164, 2014.
- [58] G. Lopez Ocaña , R. Bautita Margulis, J. Hernández Barajas, J. Saucedo Terán y H. Rubio Arias, «COMBUSTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES EN UN SISTEMA DE LECHO FLUIDIZADO EXPERIMENTAL,» *Combustion of municipal solid wastes in an experimental fluidized bed system*, vol. 2, n° 39, pp. 89 - 100, 2008.
- [59] J. Sánchez Gómez , «GUÍA PARA EL CONTROL DE INCENDIOS EN VERTEDEROS DE RESIDUOS SÓLIDOS,» México , 2021.
- [60] EPA, «Colombia Coal Mine MethaneMarket Study,» Bogotá D.C, 2019.
- [61] J. Martínez, «Guía para la gestión integral de residuos sólidos peligrosos,» Uruguay, 2005.
- [62] ISWA, «LANDFILL OPERATIONAL GUIDELINES,» Texas, USA, 2019.
- [63] G. Villaflor , G. Morales Graciela y J. Velasco, «Variables Significativas del Proceso de Combustión del Gas Natural,» *Significant Variables in the Combustion Process of Natural Gas*, vol. 18, n° 4, pp. 57-62, 2008.
- [64] Quiminet, «<http://www.quiminet.com>,» 2 3 2012. [En línea]. Available: <http://www.quiminet.com/articulos/las-bentonitas-en-la-industria-farmaceutica-2558725.htm>. [Último acceso: 18 7 2016].
- [65] H. Collazos, «Diseño y Operación de Rellenos Sanitarios,» de *Control de incendios*, Bogotá, Escuela de Ingeniería Ambiental, 2008, p. 108.

-
- [66] C-deg S.A.S, «Evaluación de problemáticas de combustión interna,» Medellín-, 2016.
- [67] EPA, «Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos,» [En línea]. Available: <https://espanol.epa.gov/cai/monoxido-de-carbono>. [Último acceso: 12 4 2023].
- [68] NIOSH, «Guía de bolsillo de NIOSH sobre riesgos químicos,» [En línea]. Available: <https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0337.html>. [Último acceso: 24 04 2023].
- [69] Alcaldía de Medellín., «Plan Parcial de Mejoramiento Integral del Barrio Moravia,» Medellín., 2011.
- [70] E. Marín, Manejo y recuperación de cuencas hidrográficas, Medellín: Tecnológico de antioquia-institución universitaria, 2005.
- [71] yarethquimico, «<http://www.yarethquimicos.com/>,» 2012. [En línea]. [Último acceso: 30 10 2016].
- [72] Y. Daza y S. Rodriguez, «Evaluación de la transformación socioambiental en el Morro de Moravia, en la ciudad de Medellín (Antioquia),» Manizales, 2015.
- [73] Alcaldía de Médellín, «Plan de Habilitación Ambiental del Morro de Moravia,» Medellín, 2014.
- [74] Área Metropolitana del Valle de Aburra , «Recuperación Integral del Morro de Moravia: Restauración y Gestió para la utilización como espacio público,» Medellín, Antioquia , 2007.
- [75] A. Guirao Goris , «Usefulness and types of literature review,» *SciELO Analytics*, vol. 9, n° 2, 2015.
- [76] Ministerio del medio ambiente , «Guía ambiental para el saneamiento y cierre de botaderos a cielo abierto,» Bógoda D.C, 2002.
- [77] Ministerio de Vivienda, Ciudad Y Territorio, «Marco de Gestión Ambiental y Social, Actualización,» Bogotá, 2014.

-
- [78] J. I. Montoya Restrepo, O. Cuesta , O. Flecha, D. Viadé y J. Morató, «Moravia como ejemplo de transformación de áreas urbanas degradadas: Tecnologías apropiadas para la restauración integral de cuencas hidrográficas,» *Publicación científica en ciencias biomédicas*, vol. 9, n° 15, pp. 41-52, 2011.
- [79] E. Giraldo, «TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE RELLENOS SANITARIOS,» *Revista de Ingeniería Universidad de los Andes.*, pp. 44-45, 1997.
- [80] Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, «Guía para la inclusión del análisis costo beneficio en la matriz multicriterio para la selección de la alternativa en el diagnóstico ambiental de alternativas,» ANLA, 2018.
- [81] L. García, Aplicación del análisis multicriterio en la evaluación de impactos ambientales. [Disertación Doctoral], Barcelona: Universidad Politecnica de Cataluña, 2004.
- [82] J. Millán y X. Sánchez, «Modelo matricial para la asignación del costo utilizando activity basing cost,» *Entramado*, vol. 10, n° 2, pp. 144-155, 2014.
- [83] V. Soto, N. Suárez y S. Arrieta, «Análisis comparativo de los métodos de evaluación de impacto ambiental aplicados en el subsector vial en Colombia,» *Area ambiental*, vol. 9, n° 2, pp. 281-294, 2018.
- [84] D. Soto, Guía metodológica para el estudio de impactos ambientales (EsIA) en proyectos agrícolas, Duitama: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2019.
- [85] R. Martínez, Propuesta metodológica para la evaluación del impacto ambiental en Colombia [Disertación de Maestría], Bogotá: Universidad Nacional de Colombia , 2010.
- [86] V. Conesa, Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental (4a edición), Madrid: Ediciones Mundi-Presa, 2010.
- [87] epm, «Moravia, Comuna 4,» 21 08 2020. [En línea]. Available: <https://www.epm.com.co/site/home/camino-al-barrio1/moravia>. [Último acceso: 17 01 2022].

-
- [88] El Colombiano, «Lo que está en riesgo con nuevas invasiones en el morro de Moravia,» 18 08 2021. [En línea]. Available: <https://www.elcolombiano.com/antioquia/asentamientos-informales-en-el-morro-de-moravia-BB15410472>. [Último acceso: 11 02 2021].
- [89] topographic maps, «Morro de Moravia,» 12 01 2022. [En línea]. Available: <https://esco.topographic-map.com/maps/a24b/Morro-de-Moravia/>. [Último acceso: 01 02 2022].
- [90] White Light Sky, «El clima en Moravia,» 12 01 2022. [En línea]. Available: <https://whitelightskyes.com/administrative-area/4829406-moravia/>. [Último acceso: 12 01 2022].
- [91] P. Miller y N. Clesceri, Waste sites as biological reactors: characterization and modelling, Boca Raton, FL: Lewis publishers, 2003.
- [92] M. Cutimbo, Estudio exploratorio del proceso de combustión de carbón y biomasa mediante análisis termogravimétrico para su aprovechamiento en la generación de calor, Bogotá: Universidad Nacional, 2017.
- [93] G. Guerrero, Hornos de combustión: alternativas de reducción de emisiones e incremento de rentabilidad, Bucaramanga: Universidad de Santander, 2017.
- [94] G. Huang, J. Wang, Dai, Fengwai y C. Deng, «Targeted inertization with flue gas injection in fully mechanized caving gob for residual coal spontaneous combustion prevention with CFD modeling,» *Energy Science & Engineering*, vol. 8, n° 11, pp. 3961-3979, 2020.
- [95] Z. Xin, W. Kai, D. Kai y L. Jing, «Stripping and excavating control technology of spotaneous combustion area in shallow buried coal seam,» *Web of conferences*, n° 233, pp. 23-34, 2021.
- [96] C. Berry, A guide to OSHA excavations standar, Washington: University of Duke, 2009.
- [97] J. Elicer, Diseño básico de una cámara de combustión para una micro turbina a gas, Santiago de Chile: Universidad de Chile, 2017.

- [98] Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES), «Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos,» Bogotá, D.C. , 2016.
- [99] Superservicios, «Informe de disposición final de residuos,» Palermo, 2013.
- [100] Alcaldía de Medellín , «Atención PQRS,» Medellín , 2021.
- [101] V. Conesa, «Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental,» MUNDI-PRENSA, Madrid, 2006.
- [102] Ministerio de desarrollo económico., «Reglamento técnico del sector de aguas potable y saneamiento básico; sistema de aseo urbano tituo F,» Bogotá, 2000.
- [103] Y. Caldera, D. Sulbarán , Y. Márquez , I. Mendoza y L. Fuentes , «Sitiación ambiental generada por el vertedero a cielo abierto "pedregalito" en el municipio cabimas de Venezuela,» *Revista arbitrada Venezolana del nucleo costa oriental del lago*, vol. 10, nº 1, pp. 9-21, 2015.
- [104] Superintendencia de servicios públicos, «Disposición final de residuos sólidos informe nacional,» Bogotá, 2015.
- [105] «<http://www.quiminet.com>,» 2 3 2012. [En línea]. Available: <http://www.quiminet.com/articulos/las-bentonitas-en-la-industria-farmaceutica-2558725.htm>. [Último acceso: 18 7 2016].
- [106] P. Fooss, «Reduciendo el riesgo de incendios en los rellenos sanitarios,» Palermo, 2013.
- [107] J. Sánchez Gómez , «Guia para el control de incendios en vertederos de residuos sólidos,» Editor cenapred unam, México D.F, 2021.
- [108] H. Navid , D. Timothy y T. Thalhamer, «IDENTIFYING AND CONTROLLING LANDFILL FIRES,» *Waste Management & research*, pp. 303- 309, 1984.