



**La química verde como herramienta para la gestión ambiental en los procesos de análisis
de matrices ambientales**

Laura Maria Rivera Florez

Trabajo de grado presentado para optar al título de Magíster en Gestión Ambiental

Director

Francisco José Molina Pérez, Doctor (PhD) en Ingeniería Química y Ambiental

Asesor

Carlos Daniel Ramos Contreras, Doctor (PhD) en Ingeniería Ambiental

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Maestría en Gestión Ambiental

Medellín, Antioquia, Colombia

2022

Cita	(Rivera Flórez, 2018)
Referencia	Rivera Flórez, L. M. (2022). <i>La química verde como herramienta para la gestión ambiental en los procesos de análisis de matrices ambientales</i> [Tesis de maestría]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Maestría en Gestión Ambiental, Cohorte II.

Grupo de Investigación Gestión y Modelación Ambiental (GAIA).



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

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas Bonilla.

Jefe departamento: Julio César Saldarriaga Molina

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

En primer lugar, quiero agradecer a Dios quien es mi guía, en segundo lugar, mi madre quien es la luz y apoyo en mi vida. A mi abuela y familia por brindarme cariño y comprensión.

A mi director Francisco Molina y Codirector Carlos Ramos, quien con sus conocimientos y apoyo me guio a través de cada una de las etapas de este proyecto para alcanzar los resultados que buscaba.

También quiero agradecer a la Universidad de Antioquia por brindarme todos los recursos y herramientas que fueron necesarios para llevar a cabo el proceso de investigación.

Finalmente quiero agradecer a Andrés y a todos y cada uno de los que hicieron parte de este proceso académico y que de una u otra forma aportaron en pro de este logro.

Muchas gracias a todos.

Contenido

1. Contextualización y planteamiento del problema	10
2. Objetivos	14
2.1 Objetivo General	14
2.2 Objetivos Específicos	14
3. Estado del arte y marco teórico	15
3.1 Generalidades	15
3. Metodología	29
3.1 Fase diagnóstico inicial para el caso de estudio	30
3.2 Evaluación verde de las metodologías para el caso de estudio	33
3.2.1 <i>Evaluación verde de las metodologías seleccionadas para el caso de estudio mediante un método de análisis de decisión multicriterio (TOPSIS, HEXAGON, RGB)</i>	33
3.3 Fase de diseño de la herramienta de química verde a ser aplicada en el caso de estudio	41
3.3.1 <i>Elaboración de la propuesta de gestión de residuos basada en química verde:</i>	41
3.3.2 <i>Evaluación de la eficiencia en cuanto al manejo de residuos de la propuesta presentada con énfasis en la química verde</i>	43
3.3.3 <i>Análisis comparativo de resultados obtenidos entre la estrategia tradicional y Química verde en la gestión de residuos</i>	44
4. Resultados y análisis	45
4.1 Recolección de la información, inspección de documentos e instalaciones	45
4.1.1 <i>Área de estudio</i>	45
4.2 Diagnóstico ambiental caso de estudio (GAIA):	60
4.3 Cumplimiento normativo caso de estudio (GAIA)	68
4.4 Identificación y evaluación de aspectos e impactos ambientales	72
4.5 Evaluación verde de las metodologías seleccionadas para el caso de estudio mediante un método de análisis de decisión multicriterio (TOPSIS, HEXAGON Y RGB)	74
4.6 Fase de diseño de la herramienta de química verde a ser aplicada en el caso de estudio	87

<i>4.6.1 Elaboración de la propuesta de gestión de residuos basada en química verde</i>	87
<i>4.6.3 Evaluación de la eficiencia de la estrategia mediante la adquisición del equipo medición del consumo energético y presupuesto</i>	93
5. Conclusiones	97
6. Recomendaciones	99
Referencias Bibliográficas	101
Anexos	101

Lista de figuras

Figura 1. Herramienta de evaluación verde por Rayne et al.....	23
Figura 2 Herramienta de evaluación verde por Płotka-Wasyłka	24
Figura 3 Fase diagnóstico inicial para el caso de estudio	30
Figura 4 Pasos generales para la aplicación del MCDA.....	34
Figura 5 Áreas operativas del laboratorio caso de estudio (GAIA).....	46
Figura 6 Etiquetado de reactivos a) Adquiridos comercialmente por proveedor autorizado b) Soluciones preparadas por analistas mediante uso del aplicativo etiquétame en el laboratorio caso de estudio (GAIA)	51
Figura 7 Área almacenamiento y clasificación de reactivos según peligrosidad para el laboratorio caso de estudio (GAIA)	53
Figura 8 Área de preparación de reactivos (cabina de extracción) del laboratorio caso de estudio (GAIA).....	54
Figura 9 Sótano 1 – Área de almacenamiento central y clasificación de residuos SIU.....	54
Figura 10 Residuos químicos generados en el laboratorio GAIA: a) Área de almacenamiento temporal b) Etiquetado de recipientes para la recolección.....	57
Figura 11 Cuarto de almacenamiento de residuos en la SIU: a) Residuos químicos líquidos b) Residuos biológicos biosanitarios.....	58
Figura 12 a) Cuantificación de residuos generados en el GAIA a) (%masa) b) (Kg) ambos para el periodo comprendido entre octubre del 2020 hasta abril del 2021.	66
Figura 13 Cuantificación de residuos generados en el GAIA en (Kg) por mes para el periodo comprendido entre mayo hasta diciembre del 2021.....	68
Figura 14 Etapas del proceso del método de determinación de mercurio en matrices acuosas....	75
Figura 15 <i>Evaluación preliminar del método RGB en la metodología de determinación de mercurio en agua.</i>	75
Figura 16 Colores resultantes de la predicción del método RBG.	76
Figura 17 Pictograma de hexágono para la metodología de determinación de mercurio en agua.	82
Figura 18 <i>Métodos evaluados para la metodología de determinación de mercurio en matrices acuosas por absorción atómica.</i>	85
Figura 19 Criterios directamente modificados por la propuesta de mejora del verdor del método analítico.....	93

Lista de tablas

Tabla 1. Residuos generados en distintas fuentes generadoras de los mismos.	10
Tabla 2. Pre-tratamientos para residuos líquidos en el laboratorio.	19
Tabla 3. Criterios de cada uno de los métodos de análisis multicriterio evaluados.	36
Tabla 4. Criterios evaluados del método analítico de determinación de mercurio en muestras acuosas por los tres análisis multicriterio para determinación del veredor de dicho método.	37
Tabla 5. Listado de procedimientos fisicoquímicos validados o verificados en el laboratorio del grupo GAIA.	47
Tabla 6. Listado de procedimientos microbiológicos y eco toxicológicos validados o verificados en el laboratorio del grupo GAIA.	49
Tabla 7. Grupos de almacenamiento de reactivos caso de estudio (GAIA.	52
Tabla 8. Pictogramas de almacenamiento de reactivos del laboratorio caso de estudio (GAIA).	53
Tabla 9. Grupos de almacenamiento y etiquetado de residuos en el caso de estudio (GAIA).	55
Tabla 10. Clasificación y cuantificación de los residuos generados en los laboratorios GAIA ubicado en la SIU desde octubre del 2020 hasta abril del 2021 según decreto 4741 del 2005.	61
Tabla 11. Diagnóstico ambiental residuos generados en el laboratorio caso de estudio (GAIA).	61
Tabla 12. Cumplimiento de la normatividad decreto 4741 de 2005 para el caso de estudio.	69
Tabla 13. Matriz DOFA.	72
Tabla 14. Determinación de figuras de mérito 1, para el método HEXAGON.	79
Tabla 15. Determinación de figuras de mérito 2 para el método HEXAGON.	80
Tabla 16. Determinación de toxicidad y seguridad para el método HEXAGON.	80
Tabla 17. Determinación de manejo de residuos para el método HEXAGON.	80
Tabla 18. Determinación de huella de carbono para el método HEXAGON.	81
Tabla 19. Determinación de costo económico anual para el método HEXAGON.	81
Tabla 20. Datos introducidos en el método TOPSIS.	83
Tabla 21. Resultados en el método TOPSIS.	83
Tabla 22. Características de los tres métodos de análisis multicriterio.	86
Tabla 23. Evaluación verde para determinación de mercurio por absorción atómica.	89
Tabla 24. Cuadro comparativo de los métodos de análisis actual y el propuesto para análisis de mercurio en muestras ambientales.	90
Tabla 25. Cuadro comparativo de metodología aplicada y metodología propuesta.	95

Resumen

Los laboratorios encargados de prestar servicios de análisis químicos de matrices ambientales suelen acreditarse en diferentes métodos de análisis para brindar credibilidad en los resultados para el cliente, siendo muchos de estos métodos, basados en normas estándar que sirven de guía para obtener los resultados esperados. Internamente los laboratorios hacen un control, almacenamiento y manejo de sus materias primas y de los residuos generados. En el laboratorio objetivo de este trabajo, el laboratorio GAIA, existe una problemática debida al control parcial de la generación de residuos y la disposición de estos, con un control también parcial de las materias primas empleadas, además de las exigencias del método empleado actualmente para determinación de mercurio en muestras acuosas, son necesarios tratamientos previos a la muestra lo que conlleva a la generación de considerables volúmenes de residuos. El objetivo general de este proyecto implica una evaluación del desempeño ambiental de todas metodologías analíticas utilizadas y diseñadas actualmente en los laboratorios de análisis de matrices ambientales, centrando la atención principalmente en el método de determinación de mercurio en matrices acuosas en el laboratorio GAIA, y posibles soluciones a los aspectos e impacto que generan en el medio ambiente. El trabajo tendrá como primer objetivo realizar el diagnóstico del impacto ambiental generado en cada una de sus etapas analíticas con respecto al uso de energía y la generación de residuos, además de analizar de forma crítica y bajo el protocolo de la química

verde, desarrollos experimentales propios de la industria de análisis de aguas con la finalidad de establecer criterios para determinar qué tan verde es un experimento o proceso. La química verde no estipula un número mínimo de principios que deben satisfacerse para que un proceso químico sea considerado como verde por lo que, como segundo objetivo, se hizo un análisis de y selección de un método de análisis multicriterio para evaluar qué tan verde son los métodos analíticos del laboratorio mediante revisión de mecanismos de manejo y minimización de residuos. Para la investigación se recurrió a fuentes de información como: documentos internos del laboratorio, cambios y modificaciones en los métodos, observaciones realizadas a las instalaciones físicas del laboratorio y revisión bibliográfica.

Finalmente, el tercer objetivo, consta de una propuesta para la sustitución de prácticas de laboratorio tradicionales por un método con enfoque en química verde, que al ser implementado le permitirá a los laboratorios de aguas incluyendo al laboratorio objeto del caso de estudio, la minimización de los efectos negativos generados hacia el medio ambiente y disminución de los riesgos para la salud y seguridad del personal.

1. Contextualización y planteamiento del problema

En laboratorios dedicados al análisis de matrices ambientales, se maneja gran cantidad de reactivos químicos y se efectúan diversos procesos que conllevan la generación de residuos (Miranda & Badilla, 2020; Benítez et al., 2013) tanto sólidos como líquidos (Mora & Benavides, 2011), que en la mayoría de los casos son peligrosos para la salud de los analistas, el medio ambiente y de la comunidad en general (Álvarez et al., 2020). Muchos de estos residuos se vierten directamente a los distintos medios receptores agua, aire y suelo.

Como caso de estudio, y para objetivo de este trabajo, se eligió el laboratorio del grupo de investigación GAIA (grupo de Investigación en Gestión y Modelación ambiental), un laboratorio ubicado en la ciudad de Medellín, el cual se dedica a la realización de estudios fisicoquímicos, toxicológicos y microbiológicos en ecosistemas acuáticos y terrestres y en ambientes industriales, el laboratorio rige según el sistema de gestión de la calidad basado en la norma NTC- ISO/IEC 17025; este sistema está fundamentado en personal competente.

Las distintas etapas de los procesos químicos para el laboratorio GAIA, generan los residuos que se observan en la tabla 1.

Tabla 1. *Residuos generados en distintas fuentes generadoras de los mismos.*

Recepción de muestras	Procesamiento de las muestras	Descarte de muestras
<ul style="list-style-type: none"> • Recipientes de toma de muestras. 	<ul style="list-style-type: none"> • Soluciones ácidas o ácidos en forma sólida. 	<ul style="list-style-type: none"> • Guantes
<ul style="list-style-type: none"> • Recipientes de ácidos para preservación de 	<ul style="list-style-type: none"> • Soluciones básicas o bases en forma sólida. 	<ul style="list-style-type: none"> • Recipientes de almacenamiento de muestras

Recepción de muestras	Procesamiento de las muestras	Descarte de muestras
muestras con residuos de ácido sulfúrico y nítrico. <ul style="list-style-type: none"> Pipetas Pasteur de pasta utilizadas en la preservación de muestras. Papel absorbente. Neveras de icopor. Guantes de nitrilo. Tapabocas 	<ul style="list-style-type: none"> Muestras de agua superficial y residual con contenido de reactivos químicos (ácidos, bases, sales, indicadores, inhibidores, estándares). Reactivos vencidos Guantes de nitrilo Tapabocas Servilletas contaminadas Tiras de pH Material de vidrio roto 	<ul style="list-style-type: none"> Muestras de agua residual y superficial con contenido de reactivos (ácidos, bases, sales, indicadores, inhibidores, estándares).

Actualmente, el laboratorio GAIA ha intentado implementar metodologías para la separación y posterior envío de los residuos a empresas gestoras de residuos para su tratamiento. En particular el laboratorio cuenta con una reglamentación institucional muy básica, donde se establecen las acciones necesarias para el manejo integral de los residuos químicos que se generan de una forma parcial, ocasionando impactos negativos por contaminación en su área de influencia directa, además se pone en riesgo la salud del personal que se encuentra expuesto como estudiantes, investigadores, docentes, técnicos y auxiliares de laboratorio, por lo cual es necesario avanzar y fortalecer dicha reglamentación específica para laboratorios donde se analicen matrices ambientales como el del caso de estudio.

Sin embargo, dentro de los laboratorios que realizan ensayos en matrices ambientales como en el caso de estudio, se involucran el uso de diferentes reactivos y disolventes generando residuos tóxicos por lo que se necesita un manejo más eficiente y seguro de los residuos (por

ejemplo, en recipientes debidamente clasificados, rotulados y almacenados según su reactividad, compatibilidad y peligrosidad), situación ocasionada por restricciones relacionadas con espacio de almacenamiento, optimización de recursos económicos, empleo de metodologías convencionales y una cultura de manejo organizacional para una gestión ambiental que evite el riesgo de que se presenten situaciones como reutilización de contenedores de productos químicos peligrosos, identificación incorrecta de residuos, sobrantes de soluciones preparadas, reactivos en desuso excedentes existentes por la compra excesiva, muestras inservibles y la no desactivación de residuos en la fuente generadora antes de su almacenamiento.

Por estas razones los laboratorios analíticos tienen un papel fundamental en la protección del medio ambiente a través del control de contaminantes en aire, agua o suelo, mediante la aplicación de la química analítica verde como mecanismo para reducir o eliminar efectos secundarios de las prácticas analíticas.

Los laboratorios que realizan análisis de matrices ambientales se encuentran interesados en mejorar la gestión en cuanto a gasto de reactivos, y generación de desechos además de evaluar el verdor en cada una de las etapas analíticas del laboratorio. Consistente con esta demanda la presente propuesta busca emplear principios de la química verde con el fin de realizar un control de medidas en cuanto a la prevención y minimización de los residuos que incrementen la seguridad durante su generación y manipulación, a su vez se pretende evaluar una metodología completa desde la recolección de la muestra hasta la determinación final, teniendo en cuenta la reducción de riesgos para la salud de los trabajadores y su impacto en el medio ambiente. Con base en lo anterior, esta propuesta busca resolver la siguiente pregunta:

¿Es posible realizar la gestión eficiente de residuos en laboratorios de análisis ambientales mediante una estrategia basada en los principios de la química verde?

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Proponer una estrategia eficiente y segura para la gestión de residuos peligrosos aplicable a laboratorios de análisis de matrices ambientales bajo principios de la química verde.

2.2 Objetivos Específicos

- Diagnosticar impactos ambientales generados por el laboratorio caso de estudio en cada una de las áreas generadoras de residuos líquidos.

- Evaluar de forma crítica y bajo el protocolo de la química verde, las metodologías propias para el laboratorio de análisis de matrices ambientales, caso de estudio, con respecto al uso de energía y generación de residuos.

- Definir la herramienta a ser aplicada en la gestión verde para el laboratorio de análisis de matrices ambientales, caso de estudio, como trabajo preventivo en la minimización de la contaminación.

3. Estado del arte y marco teórico

3.1 Generalidades

El interés por el estado del medio ambiente aumenta constantemente en el gremio de los laboratorios de análisis (Aires & Días, 2020; Workman, 2019; Hoffman & Dicks, 2020) debido a que la mayoría de los laboratorios, generan residuos tanto sólidos como líquidos (Freitas et al., 2020) en cada una de sus actividades analíticas presentando un riesgo inherente en: algunos tipos de muestras, alícuotas de reactivos y solventes utilizados, además del consumo de energía relacionado con equipos cada vez más modernos que producen desperdicio y emisiones provenientes de los numerosos pasos de metodologías analíticas empleadas (De la Guardia & Garrigues, 2011; Armenta et al., 2019) por lo tanto; se hace significativo examinar los procesos y actividades químicas que pueden afectar el medio ambiente, tanto a nivel de laboratorio como a escala industrial (Namieśnik, 2001; Sheldon et al., 2022). En consecuencia, en los laboratorios analíticos el residuo generado simplemente es tratado una vez finaliza el proceso, solución que, puede además suponer un grave riesgo para la salud y el medio ambiente, resulta costosa y poco efectiva, pues se limita a transferir la contaminación (residuos, emisiones y vertidos) de un medio a otro (Cardona, 2007).

En este sentido, muchos laboratorios han implementado Planes de Gestión de Residuos para brindar procedimientos y acciones en cuanto al manejo integral y minimización de los residuos desde su generación hasta su disposición final (Jurjeva & Koel, 2022), lo que permite de alguna forma estandarizar los procesos, bajo una política de calidad (Leiton & Revelo,

2017), encaminada hacia el tratamiento de los residuos como aspecto imprescindible en la organización de todo laboratorio (Berrio, Beltrán et al., 2012; Garrigues et al., 2019). La gestión de desechos como mecanismo de acción a su vez permite prevenir la degradación ambiental, así como la contaminación del suelo y los recursos hídricos (Lemos et al., 2018).

En la actualidad, la “química verde” ofrece a la industria una posible solución para la gestión de residuos y su minimización, especialmente en aspectos importantes como el tratamiento y la recuperación de sustancias químicas (Ramírez et al., 2017). La química verde supone beneficios económicos, pues requiere menos inversión para tratar el residuo generado y para consumir reactivos químicos, así como la optimización del consumo de los mismos (Bolaños, 2012; Chemat & De la Guardia, 2019).

La Química Verde o química sostenible consiste en una visión integral que incluye: la utilización de sustancias químicas amigables con el ambiente, buscando la reducción de los residuos químicos en las diferentes etapas analíticas donde se generen (Díaz et al., 2019; Pacheco & Pino, 2019) vale la pena destacar su carácter preventivo, ya que pretende evitar los problemas antes de que ocurran (Benavides et al., 2015). Actualmente se conocen doce principios de la Química Verde desarrollados por Anastas y Warner, como guía en la síntesis y aplicación de productos y procesos químicos que reduzcan o eliminen, el uso y producción de materiales dañinos al ambiente (Rodríguez, 2019):

1. Prevención en la generación de residuos.
2. Métodos de síntesis que deben incorporar al máximo, en el producto final, todos los materiales usados.
3. Síntesis química menos peligrosa empleando sustancias no tóxicas o de baja toxicidad.
4. Diseño de productos químicos más seguros con mínima toxicidad.

5. Minimización del empleo de disolventes y productos auxiliares.
6. Diseño para la Eficiencia Energética.
7. Uso de materias primas renovables.
8. Reducir la formación de derivados.
9. Empleo de catalizadores lo más selectivos posibles.
10. Diseño de productos químicos para que se degraden al final de su vida útil.
11. Control en tiempo real de compuestos contaminantes
12. Química inherentemente más segura para la prevención de accidentes

Para los laboratorios de análisis de matrices ambientales se hará énfasis en los principios de prevención en la generación de residuos, minimización del empleo de solventes y productos auxiliares, uso de productos químicos más seguros y eficiencia energética. Al implementar estas acciones el laboratorio debe considerar: Las actividades humanas y los residuos químicos generados, la minimización y eliminación de los residuos almacenados o descargados y el tratamiento de los residuos químicos peligrosos de una manera eficiente (Estrada, 2015). A su vez se debe tomar en cuenta la función del diseño de objetivos ambientales, ciclo de vida de los reactivos químicos y demás sustancias empleadas en el laboratorio (Bolaños, 2012; Pacheco& Pino, 2019).

Según el Manual de Seguridad de Residuos Químicos (Panreac,2020) se presentan las siguientes estrategias para el manejo de los residuos generados a partir del uso de reactivos en las diferentes etapas analíticas:

1. Realizar el inventario de todos los posibles residuos.

2. Definir los grupos de residuos (según sus características fisicoquímicas, peligrosidades y tratamiento/ eliminación posterior)
3. Considerar las posibilidades de minimización.
4. Gestionar las compras correctamente (evitar tener stocks elevados para disminuir la cantidad de residuos generada por reactivos caducados, o no usados).
5. Implantar sistema de recogida selectiva en función de los grupos establecidos y destinar recipientes adecuados a las características de los residuos.
6. Identificar y etiquetar los envases y contenedores que contienen residuos.
7. Informar y formar al personal del laboratorio sobre el procedimiento de gestión de residuos
8. Contactar con una empresa externa autorizada (gestor de residuos) para la recogida, tratamiento y eliminación de aquellos residuos que no puedan tratarse en el propio laboratorio.
9. Cumplir con la legislación vigente.

Antes de proceder al envío a gestores autorizados, los residuos obtenidos podrían ser tratados de modo que disminuya su peligrosidad y acondicionados en recipientes debidamente clasificados de acuerdo con su uso (Ver tabla 2). Los pre-tratamientos propuestos para el caso de estudio se realizarán con base en los siguientes “grupos” (en el caso de residuos pertenecientes a un mismo grupo pueden depositarse en un mismo recipiente):

- A. Disolventes orgánicos no halogenados
- B. Disolventes orgánicos halogenados
- C. Disoluciones neutralizadas a pH 6-8
- D. Soluciones de Sales Metálicas

E. Residuos químicos no peligrosos

Para el caso de residuos sólidos generados en el laboratorio como papeles de filtro, guantes desechados, trapos, aserrín u otras materias impregnadas de reactivos químicos, sin efectuar previamente una clasificación, eliminación, destrucción o neutralización de los mismos, no se pueden disponer directamente en rellenos sanitarios y deben ser entregados a un gestor autorizado.

Tabla 2. *Pre-tratamientos para residuos líquidos en el laboratorio.*

Nº RECIPIENTE	CLASIFICACIÓN Y USO	PRODUCTOS	TRATAMIENTO
1	Ácidos inorgánicos, sales y soluciones acidas usados en la etapa de preservación de muestras	Ácido nítrico, ácido sulfúrico, bifosfatos, bisulfatos, etc.	Diluir con agua aproximadamente a 1:5 y neutralizar añadiendo lentamente sodio hidróxido en solución o en escamas (hasta pH 6)
2	Ácidos orgánicos utilizados en procesos de limpieza y desinfección del laboratorio.	Ácido acético, butírico, fenilnitrilico, naftalensulfónico, toluensulfónico, etc.	Diluir con agua aproximadamente a 1:5 y neutralizar añadiendo lentamente sodio hidróxido en solución o en escamas a pH 6-8.
3	Bases y soluciones básicas, aminas, sales básicas, como neutralizadoras de pH en	Dietilamina, trietanolamina, hidróxido de amonio, hidróxido de potasio, hidróxido de sodio, carbonato	Diluir con agua aproximadamente a 1:5 y neutralizar añadiendo lentamente ácido sulfúrico

Nº RECIPIENTE	CLASIFICACIÓN Y USO	PRODUCTOS	TRATAMIENTO
	procesos analíticos de muestras.	de potasio y carbonato de sodio.	diluido hasta pH 6-8. La solución resultante se diluye 1:10. Para el vertido de bases específicamente emplear para su neutralización y absorción de los productos específicos comercializados. En caso de no disponer de ellos, neutralizar con abundante agua a pH ligeramente ácido o con bicarbonato.
4	Sales y soluciones inorgánicas.	Sulfatos, nitratos, metales pesados, mercurio, cadmio, arsénico, cromo, etc) Disoluciones acuosas inorgánicas.	No descartar directamente en el desagüe. Precipitar el cadmio, cobre, mercurio, cromo etc, mediante la adición de un grupo hidroxilo OH ⁻ (obtenido al agregar hidróxido de sodio) a una solución del metal, en sus diferentes estados de oxidación, generando la precipitación del metal en forma de hidróxido, el precipitado es colectado para facilitar su

Nº RECIPIENTE	CLASIFICACIÓN Y USO	PRODUCTOS	TRATAMIENTO
			reutilización. Se evita precipitar en forma de sulfuros debido a la peligrosidad de los reactivos.

Nota: Modificado a partir de la información del Manual de seguridad de laboratorios Químicos, Panreac Química S.A., 2019.

Por su parte, para la implementación del plan de manejo de residuos, deben participar y colaborar los trabajadores del laboratorio y en general todas las personas implicadas en la producción de residuos peligrosos (servicio de prevención y medio ambiente sistema de 2001, 2020). El tratamiento “final” se debe realizar siempre por un gestor autorizado de residuos, aunque se realice algún pre-tratamiento por parte del laboratorio generador (caso de estudio). Sin embargo; se debe cumplir con la normativa vigente en Colombia en materia de residuos Decreto 1076 del 2015, Título 6 “Residuos peligrosos”, artículo 2.2.6.1.3.1 “obligaciones”. En el presente decreto se establecen las obligaciones que tienen los generadores de residuos y se dictan otras disposiciones relacionadas con el marco de la gestión integral de los residuos (gestión de residuos, identificación de peligrosidad, capacitaciones, envasado, embalado y etiquetado, planes de contingencia de derrames, medidas de carácter preventivo, contrataciones en servicios de tratamiento y/o disposición final y registro ante la autoridad ambiental competente entre otras). En los anexos I y II del documento se presenta la clasificación de peligrosidad de los desechos peligrosos debido a su carácter corrosivo, reactivo, explosivo, inflamable, infeccioso, reactivo y tóxico).

Sin embargo, a pesar de la aplicación de los planes de gestión de residuos, persiste la problemática relacionada con el riesgo inherente de las metodologías de química analítica y su contribución en el aumento de la cantidad de contaminación y otros problemas ecológicos. Por lo que es importante trabajar en ecologizar los métodos analíticos, mientras se toma bajo consideración aspectos claves como la precisión y sensibilidad (Płotka-Wasyłka & Namieśnik, 2019). En este sentido, los principios de la química analítica verde han designado cuatro factores principales a tener en cuenta durante la evaluación verde y ecologización de métodos analíticos, los cuales son: recolección y preparación de muestras, instrumentación y reactivos usados (Namieśnik, 2001; Kannaiah et al., 2021).

Las afirmaciones anteriores sugieren que para el caso de los laboratorios de química que desarrollen prácticas más amigables con el medio ambiente, mediante la aplicación de estrategias de selección de reactivos menos tóxicos o en su efecto realizando la sustitución de los reactivos convencionales por unos menos peligrosos y la reducción del consumo energético e insumos, se evidenciará además, una disminución en la generación de RESPEL y su correspondiente peligrosidad en cada una de sus etapas analíticas (Güzel & Canlı, 2022; Herrera et al., 2015; Wojnowski et al., 2022).

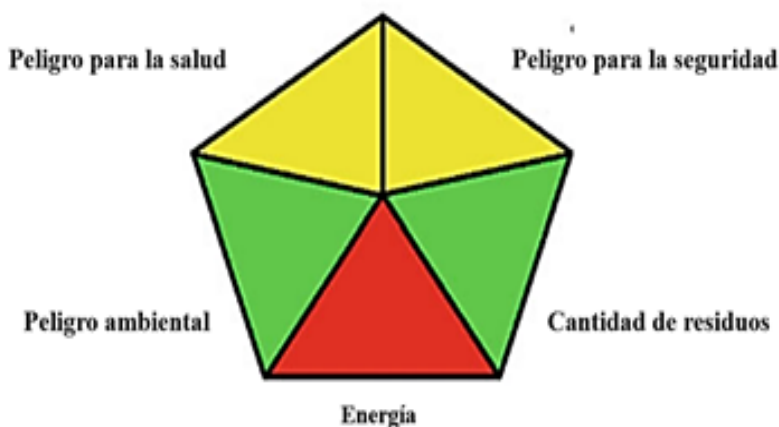
A su vez, como complemento a estas estrategias de la química verde con enfoque en el manejo de residuos anteriormente mencionadas, la minimización del impacto ambiental de los métodos ya existentes, en cada etapa del procedimiento analítico (es decir, recolección de muestras, preparación de muestras, análisis y la generación de los resultados) debe evaluarse en los procesos tanto en función de los residuos generados como su influencia en el medio ambiente y la posibilidad de aumentar su verdor (Tobiszewski, Mechlińska, Zygmunt & Namieśnik, 2009;

Jurjeva & Koel, 2022). A continuación, se proponen una serie de herramientas de evaluación ecológica para los métodos analíticos mate:

Índice Nacional de Métodos Ambientales (NEMI): Herramienta de evaluación en función de perfiles de verdor (Mohamed & Fouad, 2020). Para evaluar un método particular se toman en consideración cuatro criterios principales: toxicidad y corrosividad de los productos usados, productos químicos, peligro y cantidad de residuos, persistente, bioacumulativo o tóxico y el pH durante el análisis (rango de 2–12).

Otra herramienta ha sido propuesta por Raynie y Driver (2009): En este caso, los procedimientos se evalúan con base en cinco criterios: potencial ambiental, salud y riesgo de seguridad, cantidad de residuos generados y consumo de energía (Figura 1).

Figura 1. *Herramienta de evaluación verde por Rayne et al*



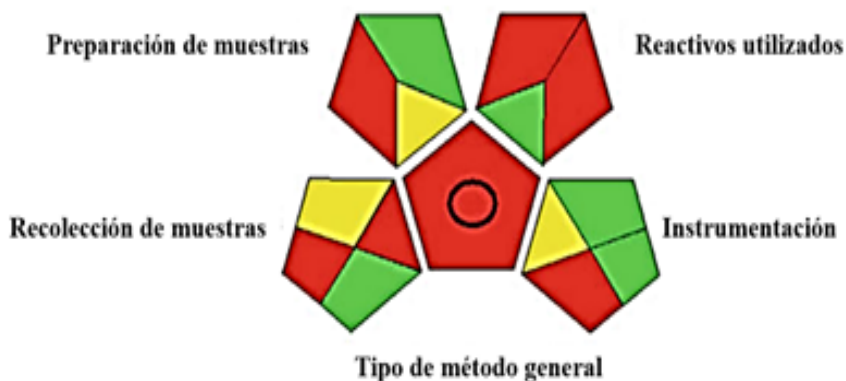
Nota: Green assessment of chemical methods. In: 13th annual green chemistry and engineering conference, por Raynie D, Driver J, 2009, p.34.

Enfoque alternativo de Ecoescala Analítica propuesta por Namie´snik et, al (2012):

En esta herramienta se evalúan varios parámetros del procedimiento, como el número de reactivos utilizados o residuos generados.

Índice de Procedimiento Analítico Verde (GAPI): Herramienta novedosa, en donde la evaluación de la ecologización de cada paso del procedimiento analítico se presenta en forma de pictograma compuesto por cinco pentagramas (Figura 2), que proporcionan información sobre el verdor de diferentes pasos del procedimiento analítico. Se evalúan la recolección y preparación de muestras, los reactivos utilizados, la instrumentación y un método general basado en su impacto ambiental utilizando una escala de tres colores. Por lo que GAPI es considerada una buena herramienta semicuantitativa para la comparación y evaluación verde, debido a sus criterios de evaluación bien definidos y la simplicidad en su aplicación (Płotka-Wasyłka , 2018; El-Kafrawy et al ., 2022).

Figura 2 Herramienta de evaluación verde por Płotka-Wasyłka



Nota: A new tool for the evaluation of the analytical procedure: Green Analytical Procedure Index. por Płotka-Wasyłka, J, 2018, Talanta, p. 204-209.

Así mismo, una forma interesante de abordar problemas multiobjetivo en análisis químico es la aplicación del análisis de decisiones multicriterio (MCDA). Este es un grupo de técnicas y/o herramientas que pueden evaluar muchos criterios (parámetros de evaluación) y alternativas (posibles opciones) que además constituyen una gran cantidad de datos en los problemas de toma de decisiones. Difieren en sus mecanismos debido al uso de varios métodos matemáticos (algoritmos), tal es el caso de la forma de asignación de los valores de ponderación a los criterios, dado que se puede hacer de una manera específica y distinta en cada método (Bystrzanowska & Tobiszewsk, 2018).

Los métodos de análisis multicriterio más ampliamente conocidos y utilizados en el área de química son:

TOPSIS (Técnica para el orden de preferencia por similitud con la solución ideal), AHP (proceso de jerarquía analítica) PROMETHEE (Método de organización de clasificación de preferencias para el enriquecimiento) (Bystrzanowska & Tobiszewsk, 2018).

En la literatura se reportan ejemplos del uso de métodos MCDA en casos de procesos de elección de procedimientos analíticos (Cinelli et al., 2017; Raccary et al., 2022; Tobiszewski & Orłowski, 2015), debido a su facilidad para evaluar el desempeño en la química analítica verde (GAC) cuando los criterios que describen las alternativas se refieren a su veredor.

Entre las ventajas del análisis de decisión multicriterio (MCDA) se encuentran la capacidad de evitar la toma de decisiones subjetivas y la posibilidad de asignar valores de ponderación a criterios que reflejen las preferencias de las partes interesadas, por lo que la comparación o evaluación se hace más sistemática y completa. Los resultados finales se expresan como valores numéricos mediante el uso de herramientas comerciales como software de computadora como Expert Choice, D-Sight, M-MACBETH entre otros. Las operaciones que

utilizan software no son particularmente laboriosas y no requieren mucho tiempo ya que algunos parámetros se pueden calcular automáticamente. Además, la mayoría de los programas permiten que los resultados obtenidos sean presentados en forma de gráficos y diagramas claros para que puedan ser fácilmente entendidos (Bystrzanowska et al. 2020). Sin embargo, la elección de la metodología para la evaluación verde de los métodos analíticos depende de las condiciones específicas que se presenten en el laboratorio analítico a estudiar y el equilibrio entre la compatibilidad de los principios de la química verde y la química analítica que busca la mejor precisión, selectividad y sensibilidad en los métodos.

Algoritmo HEXAGON. La herramienta cuantitativa hexagonal comprende la calificación de cinco variables de un método mediante la asignación de puntos de penalización (PP). Las variables se dividen en cinco grupos: características analíticas o cifras de mérito, riesgos químicos y para la salud asociados, respeto al medio ambiente, sostenibilidad y coste económico (A. Ballester-Caudet et al 2019). Específicamente, las cifras de mérito incluyen el desempeño analítico del método en evaluación y se organizan en diferentes bloques de la siguiente manera: las cifras de mérito 1 (FM-1) involucran el tratamiento de la muestra, las características del método y el procedimiento de calibración mientras que las cifras de mérito 2 (FM-2) explican el control de calidad y la precisión. El sistema globalmente armonizado (SGA) evalúa las consideraciones de toxicidad química, peligrosidad y seguridad (Tarin 2004, Phan et al 2015). Los residuos derivados del método analítico y la posibilidad de reciclarlos se tienen en cuenta para evaluar la sostenibilidad que ofrece el procedimiento analítico. Además, el impacto ambiental se cuantifica mediante la métrica de huella de carbono (Płotka-Wasyłka 2018), que considera el consumo energético de los equipos empleados y el tiempo para realizar el análisis. El costo anual relacionado de la determinación analítica se estima de acuerdo con el costo del

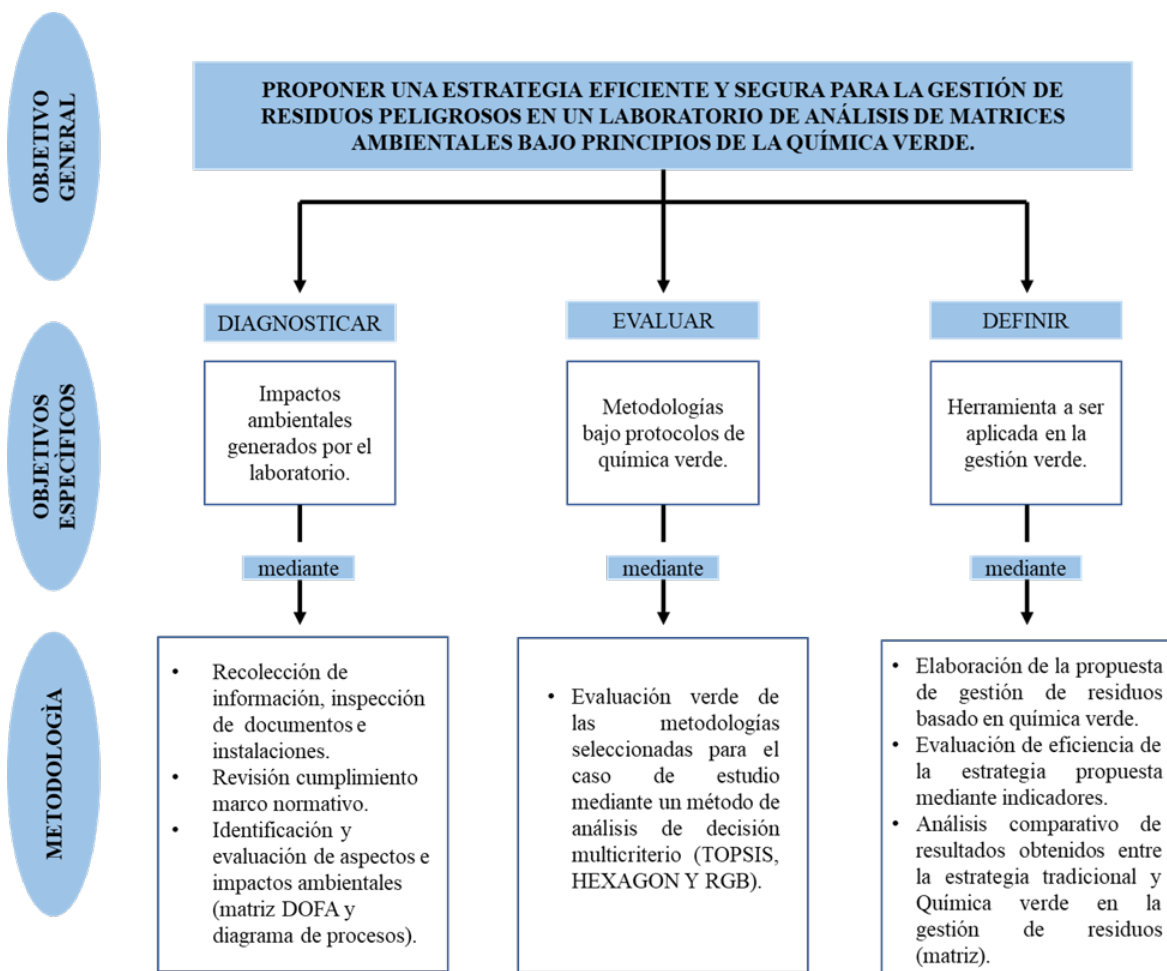
equipo necesario además de su costo de consumo eléctrico, el costo de los reactivos y materiales utilizados y el salario asignado al personal calificado. La huella de carbono y el coste anual se cuantifican en términos absolutos, mientras que los puntos de penalización se asignan al resto de variables. Finalmente, la suma de los PP y los valores estimados de la huella de carbono y los costos se clasifican en una cuantificación general para cada variable utilizando una escala 0e4 y se organizan en un hexágono como pictograma resultante. Cuanto mayor sea la puntuación (es decir, acercándose a 4), se cumplen las siguientes afirmaciones: peor la adecuación de las cifras de mérito para proporcionar un resultado analítico fiable, peor la contribución a la salud y seguridad, peor el impacto ambiental, sostenibilidad y relación costo-beneficio. En la etapa final, se calcula la media aritmética de la puntuación 0e4 (Sav) para clasificar los procedimientos analíticos y eventualmente comparar los resultados de la evaluación al aplicar los otros algoritmos propuestos en el presente artículo. La escala se relaciona con el desempeño excelente, bueno, adecuado, débil y fallido del método analítico probado para las puntuaciones: 0, 1, 2, 3 y 4, respectivamente. El algoritmo hexagonal se ha aplicado a una amplia variedad de métodos que emplean diferentes técnicas analíticas (Ballester., et al, 2019). Entre ellos, la espectroscopia de absorción atómica (AAS), la espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) y la espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES), la cromatografía de líquidos y gases (Ballester-Caudet et al., 2022), así como la radiactividad, ya se han evaluado al analizar la industria del agua. También se han comparado recientemente los métodos de espectrofotometría UVeVis, fluorescencia, quimioluminiscencia y potenciometría ISE para el análisis de amonio en muestras de agua.

Algoritmo RGB. El modelo RGB desarrolla y amplía el concepto de "verdor" de un método analítico por los otros colores primarios asignados a otros atributos básicos de un

método, como resultado de lo cual el color resultante de un método está determinado por la contribución del Rojo, Componentes verde y azul (Nowak et al., 2020; Mazzaracchio et al., 2022). El color rojo (R) se asigna al rendimiento analítico expresado por criterios de validación, que son una medida de la calidad del resultado analítico, el verde (G) a la seguridad y el respeto al medio ambiente y el azul (B) a la eficiencia práctica y la productividad. La intensidad de un color primario dado se expresa mediante el parámetro CS (Puntuación de color) en la escala de 0e100%, distinguiendo tres rangos: <33.3% - el rango de una falta general de aceptación para el atributo en consideración, 33.3% y <66,6%: rango de aceptación, pero no satisfacción, y 66,6% de satisfacción para un atributo determinado. Los rangos anteriores permiten simplificar significativamente el uso del modelo RGB para la evaluación de métodos analíticos y distinguir el número limitado de colores resultantes / finales de un método, presentado en la Fig. 4. El color de un método es el parámetro cualitativo que es fácil de determinar. Estimar e interpretar. Otro parámetro llamado "brillantez del método" (MB) está dedicado a una evaluación cuantitativa más completa. MB se calcula como la media geométrica ponderada de tres valores CS correspondientes a los respectivos colores primarios, con pesos "W", seleccionados por el usuario. Como resultado, MB no tiene correlación directa con el color, ya que permite asignar diferentes pesos a los atributos primarios dados, por ejemplo, mayor para el rojo (rendimiento analítico) que el verdor, etc. Además, reconocer MB como la media geométrica lo hace más sensible a valores extremadamente bajos de CS, que pueden constituir cuellos de botella de todo el método y afectar su utilidad.

3. Metodología

La propuesta de la gestión y minimización de residuos fue dividida en 3 fases principales que permitieron orientar y definir por escrito la puesta en marcha del programa, (Subdirección ambiental, área metropolitana de Bucaramanga, 2020) a través de un conjunto de actividades operativas del laboratorio GAIA enfocadas en la estrategia de la prevención de la contaminación, principio básico de la química verde ("La Química Verde y la problemática de los residuos químicos de los laboratorios", 2006). Se tomo como objetivo de estudio un laboratorio de análisis de matrices ambientales ubicado en la ciudad de Medellín, el laboratorio del grupo de investigación de gestión y modelación ambiental GAIA. Así mismo la propuesta de la gestión verde de residuos se ejecutó mediante una evaluación del veredor de uno de sus procedimientos analíticos: la determinación de mercurio en matrices ambientales por técnicas espectrofotométricas, así, con la finalidad de dar cumplimiento a los objetivos planteados con anterioridad, se acoto el trabajo a este procedimiento analítico a pesar de que hay varios métodos dentro del laboratorio que requieren la concerniente atención. El proceso seguido se ilustra en la figura 3.

Figura 3 Fase diagnóstica inicial para el caso de estudio

3.1 Fase diagnóstica inicial para el caso de estudio

Recolección de la información e inspección. Como punto de partida, se realizó el diagnóstico del laboratorio mediante observación directa a las instalaciones del área operativa del laboratorio caso de estudio (visita presencial por parte del estudiante de maestría) y revisión de la plataforma documental del caso de estudio (GAIA) en cada uno de sus procesos estratégicos, de apoyo, misionales entre otros, verificando la situación actual documentado en (formatos,

manuales, guías, protocolos, instructivos de métodos, informes de validación) con las que cuenta el laboratorio en cuanto a la generación, segregación, desactivación y almacenamiento de los residuos. Además de los vertimientos realizados producto de cada actividad, lo anterior mediante la información obtenida en el informe de “revisión por la dirección” del laboratorio GAIA del año 2020, donde se reportó el total de análisis realizados (número de análisis / parámetro) y los parámetros más analizados y menos analizados con su respectiva generación de residuos sólidos. Se revisó también las clasificaciones de los residuos generados según lineamientos establecidos por la normatividad vigente en el “Manual de gestión integral de residuos generados en la SIU”

La etapa en mención se desarrolló entre el 30 de agosto a septiembre del año 2021.

Cumplimiento normativo. A su vez con respecto al marco normativo, se verificó el nivel de cumplimiento por parte del laboratorio caso de estudio en cuanto a normas relacionadas con “la prevención y manejo de residuos desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral” (Decreto 4741 de 2005) y “uso de agua y normas de vertimiento de residuos líquidos” (Decreto 1594 de 1984). Además de la reglamentación asociada a los vertimientos según resolución 0631/2015 y decreto 3930/2010 y cumplimiento normativo reportado en el “Manual de gestión integral de residuos comunes, reciclables, biológicos, químicos y especiales generados en la Sede de investigación universitaria - SIU ” según acuerdo superior 434 de 2015 por la cual se establece la Política de Seguridad y Salud en el Trabajo para la Universidad de Antioquia y manual Guía para el Manejo de Residuos Sólidos en el Valle de Aburra del Área Metropolitana. La etapa en mención se desarrolló entre agosto a octubre del año 2021.

Diagrama de procesos. Para analizar cada una de las actividades asociadas al método analítico de determinación de mercurio, dentro del laboratorio, se establecieron los aspectos ambientales que de ellas se derivan por medio de la elaboración de diagramas de procesos.

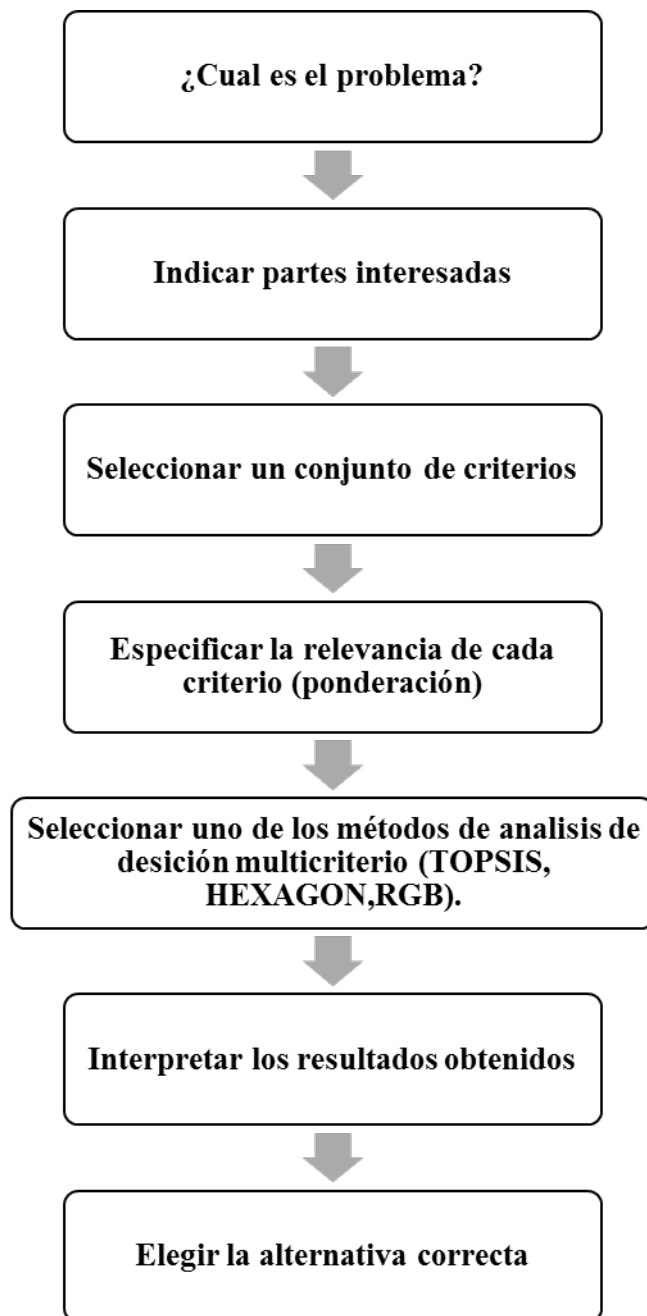
Identificación y evaluación de aspectos e impactos ambientales. Con base en los resultados obtenidos en la fase diagnóstica, se identificaron las debilidades, oportunidades, amenazas y fortalezas del caso de estudio mediante la elaboración de una matriz DOFA, y sus respectivas alternativas de manejo integral. Por su parte para conocer cuáles son las actividades en las que los procesos analíticos del laboratorio GAIA (especialmente el método de determinación de mercurio) interactúan con el medio ambiente y, por tanto, cuáles son los impactos ambientales, fue necesario conocer e identificar los aspectos ambientales asociados a estos impactos y sus áreas de influencia además de las condiciones características de cada proceso. Una vez identificados, se definieron unos criterios para evaluar su importancia e impactos significativos mediante la elaboración de una matriz de aspectos e impactos (matriz identificación y evaluación de aspectos e impactos ambientales).

3.2 Evaluación verde de las metodologías para el caso de estudio

3.2.1 Evaluación verde de las metodologías seleccionadas para el caso de estudio mediante un método de análisis de decisión multicriterio (TOPSIS, HEXAGON, RGB)

La segunda fase correspondió a la evaluación verde del método de determinación de mercurio, para el laboratorio GAIA, se ejecutó mediante la aplicación de una herramienta de apoyo para la optimización y desarrollo de los métodos analíticos. Esta herramienta se basa en el análisis de decisiones multicriterio (MCDA) un grupo de técnicas que permiten describir un problema utilizando valores numéricos y que con la aplicación de un algoritmo adecuado se obtiene una clasificación de las opciones disponibles en orden de preferencia (Bystrzanowska et al. 2020). La aplicación de la herramienta de evaluación del carácter verde (análisis de decisiones multicriterio) para el método analítico de determinación de mercurio del laboratorio GAIA, se hizo en primera instancia con ayuda de la base de datos documental previamente obtenida en la fase diagnóstico (inciso 3.1) específicamente el informe de la validación de dicho método, y respecto a criterios que describen las alternativas posibles con la finalidad de encontrar el proceso o procedimiento analítico preferible (alternativa correcta).

Independiente del mecanismo del algoritmo a seleccionar (TOPSIS, HEXAGON, RGB) los pasos generales para la aplicación del MCDA en la presente investigación se muestran a continuación en el esquema:

Figura 4 *Pasos generales para la aplicación del MCDA*

En primer lugar, se definió un problema, por lo que se especificó el propósito de una evaluación, se requirió también elegir las partes interesadas que participaron en el proceso de toma de decisiones. Sin embargo, debido al alcance del presente documento se remitió a un

único responsable de la toma de decisiones (DM). Entre las alternativas, se seleccionó la mejor solución con referencia a las condiciones de evaluación dadas. El siguiente paso es la definición de un conjunto de criterios que permitan describir y comparar las alternativas disponibles para la opción más adecuada.

Otro elemento que se tuvo en cuenta es la ponderación de los criterios (preferencias del único responsable al evaluar la importancia de cada criterio), debido a que esta etapa permite indicar la dirección del análisis, de modo que podrán incluirse criterios metrológicos, medioambientales o económicos. La selección y aplicación de un método MCDA fue el penúltimo paso, para ello se tuvo como posibles opciones a aplicar en el caso de estudio las herramientas (TOPSIS, HEXAGON, RGB) más usadas en los procesos de selección de procedimientos analíticos de acuerdo con reportes en la literatura. Estos descritos en detalle por Fabjanowicz et al., 2018 (determinación de resveratrol en muestras de vino) y por Serna et al., 2015 (ruta de proceso químico para producir acetato de etilo) usando AHP, también por Tobiszewski et al., 2015 (determinación de aldrina en muestras de agua) usando PROMETHEE y Bigus et al., 2016 (Aplicación del análisis de decisión multicriterio en la optimización del tipo de solventes para la determinación de clorofenoles con una micro extracción líquido-líquido dispersivo) usando TOPSIS. Finalmente se procedió a la interpretación de los resultados, presentados (ranking de opciones disponibles), seguido por la elección de la alternativa más adecuada. (Aenishaenslin et al., 2013; Bystrzanowska et al., 2020).

Para el presente estudio se seleccionaron 3 métodos multicriterio TOPSIS, HEXAGON y RGB métodos que fueron definidos anteriormente para el caso de estudio. La evaluación de estos algoritmos en la de determinación de mercurio se hizo con base en el trabajo realizado por Nowak *et.al* 2020. A. En la tabla 3, se describe detalladamente los criterios de evaluación que

maneja cada uno de los métodos, dichos criterios todos importantes para el objetivo del análisis, sin embargo, con diferente relevancia, así las cosas, para marcar dicha diferencia se asigna a cada criterio ponderaciones de importancia definidos como peso total respecto a los otros criterios.

Tabla 3. *Criterios de cada uno de los métodos de análisis multicriterio evaluados.*

TOPSIS		HEXAGON		RGB	
Criterio	Wtot	Criterio	Wtot	Criterio	Wtot
LOD	1/8	Figuras de mérito 1 (tratamiento	1/6	Precisión RDB	10/120
Precisión	1/8	de muestra,		Precisión	10/120
Cantidad de solvente orgánico	1/8	características del método y calibración)		LOD	10/120
Cantidad de solvente orgánico peligroso	1/8	Figuras de mérito 2 (control de calidad y precisión)	1/6	Linealidad	10/120
Cantidad de muestra	1/8	Toxicidad / seguridad		Otros aspectos rojos	10/120
Residuo solido	1/8	Huella de carbono	1/6	Cantidad de muestra	
Otros análisis	1/8	Residuos	1/6	Toxicidad de los químicos	9/120
Tiempo de análisis	1/8	Costo del análisis	1/6	Otros riesgos laborales	9/120
			1/6	Otros aspectos verdes	
				Costo del análisis	6/120
				Tiempo de análisis	
				Consumo de muestra	6/120
				Otros aspectos azules	12/120
					12/120
					8/120
					8/120

Donde Wtot corresponde al peso que se le da al criterio respecto a todos los criterios listados.

Según la información que pudo ser recolectada al inicio de este trabajo, fue posible contar con el documento de validación del método determinación de mercurio para una matriz de agua,

donde se determinaron las variables que servirán para decidir cuál de las metodologías se ajustan para evaluar el verdor del método analítico. En la tabla 4 se observan los valores de los criterios usados para la evaluación multicriterio obtenidos del informe de verificación del laboratorio, del método SM 3112B y el informe de control de suministros del laboratorio, siendo todos ellos información confidencial pero que, para fines académicos relacionados con esta tesis, estuvieron disponibles algunos datos requeridos.

Tabla 4. *Criterios evaluados del método analítico de determinación de mercurio en muestras acuosas por los tres análisis multicriterio para determinación del verdor de dicho método*

CRITERIOS	VALORES
Linealidad	0,9997
LD	0,2 microgramos por litro
LQ	0,4 microgramos por litro
DS	0,028
Consumo energético	0,05 kW
Precisión RSD	4,8
Exactitud (% recuperación)	88,9%
Cantidad de residuos generados (agua contaminada con mercurio y otros reactivos)	2,18 L
Tiempo de análisis	240 minutos
Preservación de la muestra	Aceptable
Almacenamiento	Satisfactorio
Cantidad de muestra	Aceptable

CRITERIOS	VALORES
Pretratamiento de la muestra	Deficiente
Portabilidad del equipo	Insuficiente
Robustes del equipo	Aceptable
Frecuencia de calibración	Medianamente aceptable
Control de calidad del método	Aceptable (método validado)
Toxicidad	Carcinógeno, mutagénico (4)
Tratamiento de los residuos	Aceptable
Huella de carbono (Dada en consumo total de energía)	Insuficiente
Costos de análisis anuales	35.685 euros

Nota: Documento de validación de determinación de mercurio total en agua por espectrofotometría de absorción atómica vapor frío SM 3112B, GAIA.

Para la determinación del método de análisis multicriterio más adecuado para evaluar el verdor del método analítico se hizo con base en la metodología propuesta por Nowak *et.al* 2020, donde se propone una medida de la eficiencia general del método multicriterio expresado en porcentajes, que resulta de las evaluaciones obtenidas utilizando cada uno de los tres algoritmos.

Se comienza con la evaluación del método RGB, donde se hace uso de la herramienta utilizada por los autores Nowak *et.al* 2020. Dicha herramienta empleada consiste en una plantilla de Excel donde se introdujeron los datos requeridos para una serie de criterios evaluados y reportados en el documento de la validación del método analítico, y el algoritmo determina un color según los valores introducidos, este color da un criterio de lo apropiado o no que es este método para evaluar el verdor.

Se parte de una plantilla en blanco donde se evalúan 3 atributos principales: Rendimiento analítico, seguridad con el medio ambiente y eficacia práctica, partiendo de una clasificación de acuerdo con su importancia subjetiva (W) asignando valores a W de forma individual a cada atributo. En segunda instancia se seleccionan mínimo tres criterios según los cuales se evaluará el método para cada uno de los atributos principales, para el objetivo de este trabajo se eligieron para rendimiento analítico (linealidad, límite de detección, límite de cuantificación, precisión, y exactitud como porcentaje de recuperación); para seguridad con el medio ambiente (cantidad de residuos, toxicidad de los reactivos químicos, toxicidad de los residuos, y otros riesgos laborales); y para eficacia práctica (costo de análisis, tiempo de análisis, consumo de muestra y otros aspectos), estos criterios se introducen en la plantilla que da lugar a la evaluación de muchos más pero se pueden reducir las columnas para acotar la evaluación. Posteriormente se clasifican los criterios de acuerdo con su importancia individual (W), asignando valores a W dentro de cada atributo teniendo en cuenta que la suma de los valores de W debe ser 10 dentro de cada atributo. El tamaño de las celdas combinadas resulta de sus valores de W (dimensión vertical) y w (dimensión horizontal). Luego se definió el valor más bajo aceptable (LAV) y el valor más bajo aceptable (LSV) para cada criterio, los umbrales estipulados que se definieron en base al informe de validación del método, valores determinados experimentalmente y con alta precisión, y otros criterios más subjetivos y con los que no se contaba suficiente información del método se hicieron aproximaciones o predicciones como lo fueron los criterios evaluados en seguridad con el medio ambiente y seguridad práctica; a continuación se registran los valores alcanzados por el método evaluado en cada criterio en la celda indicada como resultado. Una vez se ingresan estos valores en la plantilla las hojas de cálculo formateadas condicionalmente asignan un color a los rectángulos individuales definido por un valor: negro para puntaje <33.3,

gris para puntaje <66.6 pero ≥ 33.3 , y rojo, verde o azul para puntaje ≥ 66.6 . Estos valores no requieren la entrada de información puesto que ya se genera el cálculo automáticamente. El resultado se lee como una medida cuantitativa final de la adecuación del método o brillantez (MB) y los valores de color score (CS) para cada atributo principal.

3.3 Fase de diseño de la herramienta de química verde a ser aplicada en el caso de estudio

3.3.1 *Elaboración de la propuesta de gestión de residuos basada en química verde:*

La tercera fase estuvo comprendida en la presentación del esquema de una propuesta basada en los principios de la química verde y normatividad vigente (Decreto 1076 de 2015 Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible). La metodología implementada fue la de prevención y minimización de los residuos generados, y las estrategias de optimización en los procesos analíticos que permitieron mejorar la gestión integral de los residuos generados en el laboratorio, evitando formación de sustancias peligrosas o aumento en los residuos, contribuyendo así a la prevención de la contaminación (principio propio de la química verde).

Los residuos generados en el laboratorio provienen, en gran proporción, de los reactivos químicos en desuso o vencidos y muestras analizadas con presencia de reactivo o sin analizar, por lo tanto, demandan, además del costo de adquisición, una inversión para su disposición y/o tratamiento, lo anterior se definió en una serie de etapas para llevar a cabo la tercera fase de esta propuesta:

Primera etapa: Consistió en la administración de inventario, que encierra el control adecuado sobre los reactivos, el número y tamaño de muestras además de su manejo. Para esto se tuvo en cuenta el almacenamiento de reactivos químicos, matrices de compatibilidad, manipulación dentro de las instalaciones, la inspección de las instalaciones, la clasificación y rotulado tanto de sustancias químicas preparadas, reactivos en uso o vencidos además de muestras analizadas.

Segunda etapa: La modificación de procesos analíticos propios del caso de estudio, que comprendió cambios en procedimientos analíticos mediante la propuesta de sustitución o

eliminación de una de las metodologías, miniaturización en el tamaño de muestra, evitar pretratamientos de muestra y uso de reactivos y solventes químicos peligrosos y/o tóxicos utilizados en la determinación de parámetros como durezas, fósforo, cianuro, nitrógeno, mercurio en aguas y la utilización de ácidos en la preservación de muestras. Cambios en los equipos con mayor consumo energético, actividades operativas enfocadas en la minimización del uso de reactivos. Para la elección de la metodología a modificar, se requirió previamente de los resultados obtenidos en la evaluación verde (ver numeral 3.2) del método de determinación de mercurio en matrices acuosas, con su respectiva validación en el laboratorio caso de estudio, mediante metodologías propuestas en la literatura (método de decisión multicriterio) con la finalidad de evaluar los procesos y su impacto ambiental.

Tercera etapa: Comprendió la administración de residuos y en ella se definieron los factores de clasificación, manejo, tratamiento, almacenamiento y disposición de los residuos químicos peligrosos. El almacenamiento de residuos en espacio físico será definido dentro del laboratorio previamente acondicionado (señalizado, delimitado con pictogramas, áreas separadas según la naturaleza de los residuos, con protección a condiciones climáticas, buena ventilación y demás requisitos según decreto 1076). El registro se hizo mediante fotografías a las áreas del laboratorio.

Cuarta etapa: Una vez realizada la selección y evaluación verde del método analítico del laboratorio (ver numeral 3.2), se procedió a realizar la generación de una propuesta basada en una práctica nueva o modificada que impacte lo menos posible el ambiente con las medidas adecuadas en la minimización y disposición de residuos, previamente documentada de manera comprensible para los analistas y demás partes interesadas del laboratorio.

Quinta etapa: En la última etapa a pesar de que el laboratorio GAIA ya cuenta con un componente de gestión de residuos externos subcontratado. El laboratorio solicitó al gestor de residuos suministrar información como soporte acerca del tipo de disposición final para los residuos peligrosos generados.

Con el objetivo de definir la herramienta que debe ser aplicada al laboratorio de aguas caso de estudio se realizaron las siguientes actividades:

3.3.2 Evaluación de la eficiencia en cuanto al manejo de residuos de la propuesta presentada con énfasis en la química verde

En esta etapa se midió la eficiencia entre la gestión de residuos actualmente usada por el laboratorio (caso de estudio) y la propuesta basada en química verde (modificación en procesos, minimización en generación de residuos, uso de reactivos menos tóxicos), para ello se tuvo en cuenta la medición de los siguientes indicadores:

Consumo energético y volumen de residuos generados. El comparativo entre el uso de energía y volumen de residuos generados entre los métodos analíticos actualmente empleados en el caso de estudio permitió valorar qué tan verde son, para de esta manera generar una propuesta que cuente con las mismas características incorporadas a evaluar. Posteriormente, se determinó el consumo energético y la cantidad de residuos en mililitros generados, además de su peligrosidad.

Presupuesto. El presupuesto contó con un comparativo entre realizar el manejo de los residuos con una estrategia tradicional y una de manejo ambiental bajo principios de la química

verde. Con la finalidad de establecer el costo beneficio. Incluyendo las actividades a desarrollar si se implementa el plan, tales como:

- Compra y cambio de recipientes para segregación de residuos peligrosos y no peligrosos.
- Compra de reactivos o recambio.
- Contrato con gestor de recolección de residuos peligrosos y su respectivo costo con la frecuencia de acuerdo con la generación.
- Capacitaciones al personal sobre manejo de residuos peligrosos y otros costos asociados que se consideren necesarios.
- Compra de insumos y equipos.
- Etiquetado y señalización.

3.3.3 Análisis comparativo de resultados obtenidos entre la estrategia tradicional y Química verde en la gestión de residuos

Finalmente, con base a los resultados obtenidos en la fase 3 inciso anterior, se pudo inferir que tan eficiente es la estrategia presentada para el manejo de residuos bajo principios de la química verde. En aspectos tanto económicos como ambientales (matriz de viabilidad técnica y ambiental).

4. Resultados y análisis

4.1 Recolección de la información, inspección de documentos e instalaciones

4.1.1 Área de estudio

Se realizó observación directa a las instalaciones del área operativa del laboratorio caso de estudio (Grupo de Investigación en Gestión y Modelación ambiental – GAIA) ubicado en la SIU (sede de investigación universitaria) de la Universidad de Antioquia, Medellín – Colombia (figura 5).

En el recuento del proceso operativo (análisis de muestras) fueron identificados los siguientes elementos:

- Recopilación de las hojas de seguridad de los reactivos utilizados en los métodos del laboratorio y posibles residuos químicos generados.

- Inventario de los residuos generados en el laboratorio para su mejor disposición, mediante caracterización cuantitativa y cualitativa de los residuos generados y aporte de cada una de las sustancias en la totalidad del residuo.

- Procesos y/o metodologías analíticas involucradas en la generación de residuos (Diagrama de procesos).

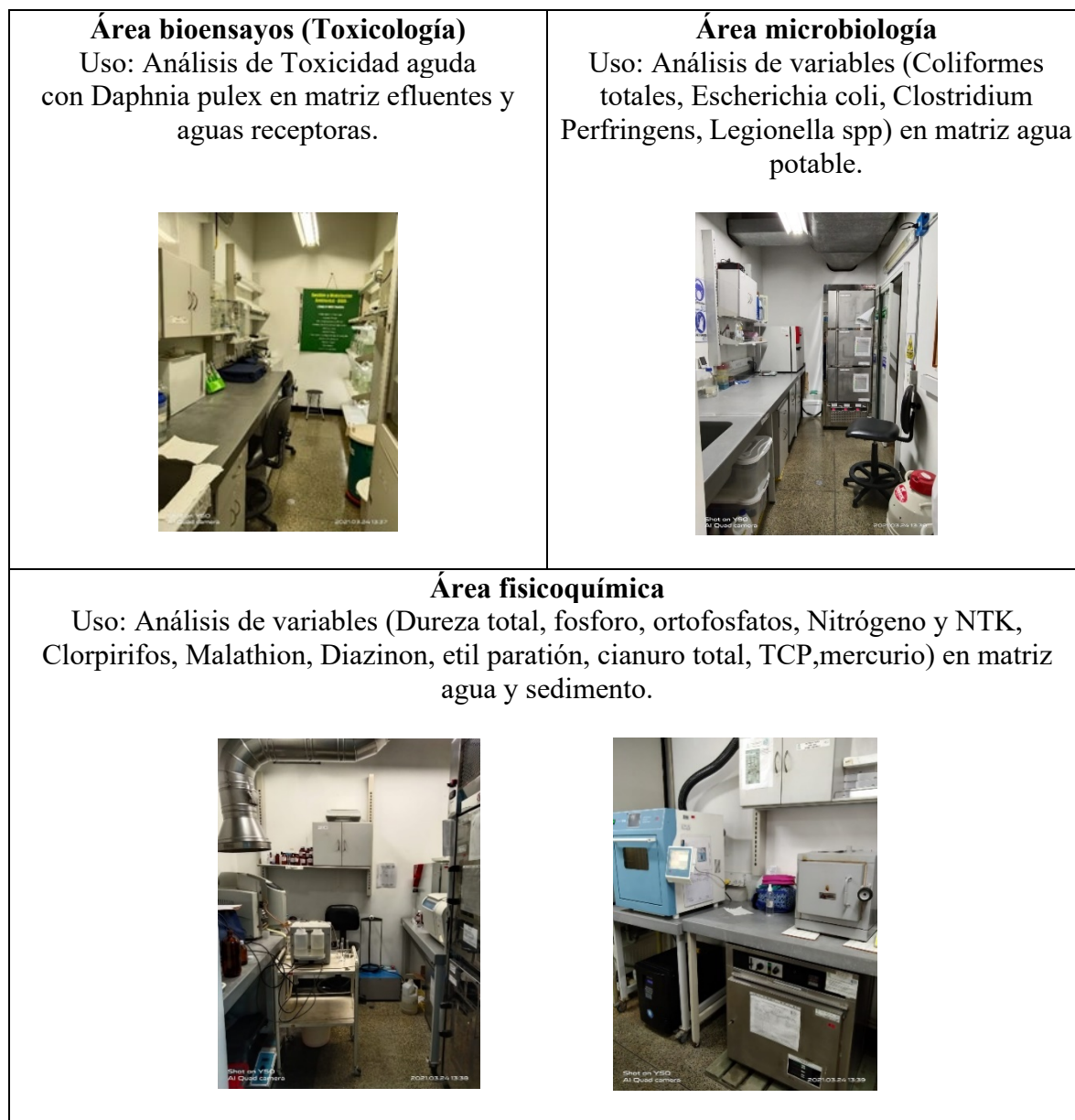
- Identificación y evaluación de aspectos e impactos ambientales (Matriz).

- Número de trabajadores que ingresan a las instalaciones de la organización.

- Revisión de los protocolos relacionados con la gestión de residuos en el laboratorio.

- Análisis de costos asociados al manejo de residuos empleados actualmente.

- Encuestas a los analistas del laboratorio.

Figura 5 Áreas operativas del laboratorio caso de estudio (GAIA)

Nota: Autor a partir de Manual de métodos fisicoquímicos, microbiológicos y eco toxicológicos - GAIA.

El grupo de Investigación en Gestión y Modelación ambiental – GAIA- realiza estudios y presta servicios de análisis fisicoquímicos, toxicológicos y microbiológicos en ecosistemas acuáticos, terrestres y en ambientes industriales específicamente en muestras de agua, suelos, sedimentos, materiales, ambientes industriales y organismos.

Las tres áreas de análisis del laboratorio: fisicoquímicos, microbiológicos y ecotoxicológicos, sirven de apoyo a los tres pilares misionales del grupo que son la docencia, investigación y extensión. De acuerdo con la revisión documental en el manual M-EA-001: MANUAL DE MÉTODOS FISICOQUÍMICOS, MICROBIOLÓGICOS Y ECOTOXICOLÓGICOS se encuentra la recopilación de las técnicas analíticas que se realizan en dichas áreas del laboratorio, partes de las técnicas recopiladas son tomadas de normas nacionales e internacionales y adaptadas a las condiciones técnicas y ambientales del grupo GAIA (ver Tabla 5 y 6):

Tabla 5. *Listado de procedimientos fisicoquímicos validados o verificados en el laboratorio del grupo GAIA.*

Área de análisis	Analito/Indicador	Matriz	Metodología de referencia
Fisicoquímica	Dureza total	Agua	Método titulométrico EDTA referenciado a SM-2340-C
Fisicoquímica	Fósforo total	Agua	Método del ácido ascórbico SM-4500-P-E
Fisicoquímica	Ortofosfatos	Agua	Método del ácido ascórbico según SM-4500-P-E.
Fisicoquímica	Nitrógeno y NTK	Agua y sedimento	Método KJELDAHL SM 4500-Norg B, 4500-NH3 B,C.
Fisicoquímica	Mercurio	Sedimento	Método de extracción por

Área de análisis	Analito/Indicador	Matriz	Metodología de referencia
		Músculo de pez	microondas EPA 3052 y
		Tejido vegetal	cuantificación por absorción atómica de vaporfrío, SM 3112 B.
Fisicoquímica	Metilmercurio	Sedimento	Metodología de cromatografía de gasesacoplada a masas. (GC/MS)
Fisicoquímica	Metilmercurio	Músculo de pez	Metodología de cromatografía de gasesacoplada a masas. (GC/MS)
Fisicoquímica	Nitrógeno Total	Sedimento	Método Kjeldahl modificado descrito en la norma técnica colombiana ISO 11261
Fisicoquímica	Carbono orgánico Total	Sedimento	Método de oxidación sulfocrómica, ISO 14235
Fisicoquímica	Clorpirifos, Malathion, Diazinon, etilparation	Agua	Metodología por cromatografía de gases/espectrometría de masas descrita en EPA 8270E
Fisicoquímica	Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn	Sedimento	Metodología por extracción ácida con reflujo cerrado asistida por microondas (EPA 3052) y cuantificación por absorción atómica de llama (Standard Methods 3111B-D)
Fisicoquímica	Cianuro Total	Agua y	Metodología EPA 9010C y 9013A

Área de análisis	Analito/Indicador	Matriz	Metodología de referencia
		sedimento	y cuantificación potenciométrica DIM 38405-7
Fisicoquímica	Fósforo Total	Sedimento	Método de ignición Andersen Evaluación verde de la metodología de
Fisicoquímica	Mercurio	Agua	espectrofotometría de absorción atómica-vaporfrío, SM 3112 B
Fisicoquímica	Clorrifos, Malathion, Diazinon, etilparation	Sedimento	Metodología por cromatografía de gases/espectrometría de masas descrita en EPA8270E
Fisicoquímica	HAPS	Material particulado atmosférico	Metodología de cromatografía de gases acoplada a masas. (GC/MS)

Nota: M-EA-001: Manual de métodos fisicoquímicos, microbiológicos y eco toxicológicos –GAIA

Tabla 6. Listado de procedimientos microbiológicos y eco toxicológicos validados o verificados en el laboratorio del grupo GAIA.

Área de análisis	Analito/Indicador	Matriz	Metodología de referencia
Microbiología	Coliformes totales y <i>Escherichia coli</i>	Agua natural	Norma ISO/9308-2:2012
Microbiología	<i>Clostridium</i> <i>perfringens</i>	Agua potable	Norma ISO 14189:2013

Área de análisis	Analito/Indicador	Matriz	Metodología de referencia
Toxicología	<i>Toxicidad aguda con Daphnia pulex</i>	Efluentes y aguas receptoras	EPA 2021:2002

Nota: M-EA-001: Manual de métodos fisicoquímicos, microbiológicos y ecotoxicológicos -GAIA

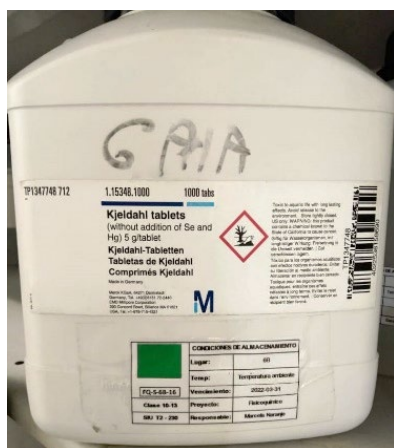
La adquisición de reactivos por parte del Laboratorio del grupo de Investigación y Modelación Ambiental – GAIA se realiza de acuerdo a las necesidades presentadas en el mismo, estas deben ceñirse a las disposiciones de la Resolución rectoral 39475 del 24 de noviembre de 2014 Estatuto General de Contratación de la Universidad de Antioquia y las demás normas que la modifiquen, sustituyan o complementen. En cuanto a esto se observó que para los reactivos, medios de cultivos y materiales de referencia se debe registrar el ingreso y salida del inventario en el aplicativo Etiquétame de la Universidad de Antioquia, además de ser usado como guía para determinar la peligrosidad de los productos químicos, pictogramas, frases de advertencia entre otros.

El etiquetado, identificación y codificación de reactivos y estándares en el laboratorio GAIA se hace mediante el uso del aplicativo Etiquétame de la Universidad de Antioquia, estos se identifican mediante un código único, que se asigna según se trate de reactivos de reserva (los adquiridos comercialmente) (figura 6 a) o reactivos y/o soluciones preparadas para los análisis (figura 6 b), el rotulo del reactivo cuenta con información detallada acerca del nombre, pictogramas, frases H (advertencia de peligro), frases P (consejos de prudencia) ,palabra de advertencia, código, lugar de almacenamiento, fecha de vencimiento, nombre del responsable, nombre del proyecto, banda de color y propiedades fisicoquímicas del mismo.

Se evidencia debilidades en cuanto a la información actualizada registrada en el aplicativo mencionado anteriormente (etiquétame) relacionado con el inventario de reactivos e

insumos químicos, posiblemente debido a trámites administrativos y cambios en el personal del laboratorio. De acuerdo con la revisión documental se evidenció el uso del formato interno en el GAIA asociado al control de pedidos (F-GC-002), con un registro de compra anual de aproximadamente 34 productos químicos que tienen salida continua.

Figura 6 Etiquetado de reactivos a) Adquiridos comercialmente por proveedor autorizado b) Soluciones preparadas por analistas mediante uso del aplicativo etiquétame en el laboratorio caso de estudio (GAIA)



a.


















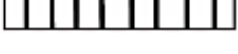




b.

El laboratorio caso de estudio cuenta con estantes de madera dispuestos en la zona de análisis clasificados y separados según la sistematización de colores recomendada por la Universidad de Antioquia (Tabla 7). Se observa también que cada estante se encuentra rotulado debidamente con una indicación escrita y gráfica del tipo de riesgo que implican los reactivos allí almacenados (Figura 7).

Las Figura 7 y 8 muestran el área de preparación y almacenamiento de reactivos del caso de estudio, en este último se encontraron reactivos contaminados, esto se evidencia en el cambio

de sus características físicas y químicas; transformándose en residuos, y en el área de preparación se observaron algunos recipientes sin etiquetar. Para no sobrepasar la capacidad de almacenamiento interna de insumos químicos, se observa que el laboratorio cuenta con un espacio en el almacén de la sede de investigaciones universitaria ubicado en el sótano 1 de la SIU, ver figura 9 allí se almacenan prioritariamente sustancias inflamables y corrosivas (ácidos y bases fuertes).

Tabla 7. Grupos de almacenamiento de reactivos caso de estudio (GAIA)

Clase de peligro	Código IMDG	Pictograma de transporte	Banda de color
Explosivos	1.1 a 1.6		
Gases y aerosoles inflamables	2.1		
Líquidos inflamables	3		
Sólidos inflamables Sustancias que reaccionan espontáneamente	4.1		
Líquidos y sólidos pirofóbicos Sustancias que se calientan espontáneamente	4.2		
Sustancias que reaccionan con el agua	4.3		
Gases, líquidos y sólidos comburentes	5.1		
Peróxidos Orgánicos	5.2		
Todas las sustancias con peligros para la salud y el medio ambiente	6.1		
Corrosivos (Peligros físicos para la salud humana)	8		
Gases a presión	2.2		
Sustancias peligrosas varias	9		

Nota Tomado del I-GR-001 Instructivo de manejo de reactivos

Tabla 8. Pictogramas de almacenamiento de reactivos del laboratorio caso de estudio (GAIA).

E  EXPLOSIVOS	O  OXIDANTES Y COMBURENTES	F  ALTAMENTE INFLAMABLES	F+  EXTREMADAMENTE INFLAMABLES	C  CORROSIVOS
T  TÓXICOS	T+  MUY TÓXICOS	Xn  NOCIVOS	Xi  IRRITANTES	N  PELIGROSOS PARA EL MEDIO AMBIENTE

Nota: Tomado del I-GR-001 Instructivo de manejo de reactivos

Figura 7 Área almacenamiento y clasificación de reactivos según peligrosidad para el laboratorio caso de estudio (GAIA)



Nota: Autor

Figura 8 Área de preparación de reactivos (cabina de extracción) del laboratorio caso de estudio (GAIA)



Nota: Autor

Figura 9 Sótano 1 – Área de almacenamiento central y clasificación de residuos SIU



Nota: Autor

Algunos de los residuos generados en el grupo de investigación (GAIA), son residuos peligrosos por su carácter infeccioso, reactivo, radiactivo, inflamable, entre otros. En el

laboratorio se encontró en el área de almacenamiento temporal (ver figura 10 inciso a) recipientes previamente rotulados para la disposición de los residuos químicos, con la siguiente nomenclatura:

Tabla 9. Grupos de almacenamiento y etiquetado de residuos en el caso de estudio (GAIA).

Rotulo de residuo	Tipo de recipiente almacenamiento	Pre-tratamiento del residuo en GAIA
<p>Mercurio</p> <p>(Proviene del tratamiento final de las muestras en el análisis de mercurio total, el pH es ácido)</p>	<p>Bidón blanco</p> 	<p>Precipitación (NaOH) (inicialmente se adiciona hidróxido para subir el pH a mayor o igual a 12, luego el precipitado sólido o semisólido se agrega en un recipiente y se marca como lodos con metales y se envía a la SIU para la gestión con proveedor externo, el sobrenadante se recolecta y su neutraliza)</p>
<p>orgánicos</p>	<p>Bidón azul</p> 	<p>No aplica</p> <p>(Se entrega a la SIU para que se gestione el descarte con proveedor externo)</p>
<p>Cianuros</p>	<p>Bidón amarillo</p>	<p>No aplica</p>

Rotulo de residuo	Tipo de recipiente almacenamiento	Pre-tratamiento del residuo en GAIA
		<p>(Se entrega a la SIU para que se gestione el descarte con proveedor externo)</p>
<p>ácidos con metales</p>	<p>Bidón azul</p> 	<p>Precipitación (NaOH) inicialmente se adiciona hidróxido para subir el pH a mayor o igual a 12, luego el precipitado sólido o semisólido se agrega en un recipiente y se marca como lodos con metales y se envía a la SIU para la gestión con proveedor externo, el sobrenadante se recolecta y su neutraliza)</p>
<p>ácidos sin metales</p>	<p>Bidón azul</p> 	<p>Neutralización (NaOH) Se realiza la neutralización empleando los residuos básicos sin metales, luego al estar neutralizado se descarta por la poceta dejando correr agua del grifo)</p>
<p>Básicos con metales</p>	<p>Bidón azul</p>	<p>Precipitación (NaOH) inicialmente se adiciona hidróxido para subir el pH a mayor o igual a 12, luego el precipitado sólido o semisólido se</p>

Rotulo de residuo	Tipo de recipiente almacenamiento	Pre-tratamiento del residuo en GAIA
Sólidos	Bolsa y caneca roja	agrega en un recipiente y se marca como lodos con metales y se envía a la SIU para la gestión con proveedor externo, el sobrenadante se recolecta y su neutraliza)
		
No aplica (Se entrega a la SIU para que se gestione el descarte con proveedor externo)		

Nota: Autor

Figura 10 Residuos químicos generados en el laboratorio GAIA: a) Área de almacenamiento temporal b) Etiquetado de recipientes para la recolección



a	b
---	---

Nota: Autor

Adicionalmente se comprobó que la segregación y/o clasificación de los residuos peligrosos de carácter líquido (tabla 9) en el laboratorio caso de estudio se hace con respecto al criterio de contenido de metales en el mismo, puesto que este permite determinar si se hace precipitación de metales, permitiendo que el sobrenadante obtenido en este proceso se trate con un ácido o base según sea el caso y se descarte como residuo ordinario, mientras que el precipitado con contenido de metales sea enviado posteriormente al área de almacenamiento de residuos de la SIU (Figura 11 a).

Figura 11 Cuarto de almacenamiento de residuos en la SIU: a) Residuos químicos líquidos b) Residuos biológicos biosanitarios



Nota; Gestor de residuos de la SIU

A su vez en el desarrollo de las actividades analíticas y académicas del laboratorio GAIA se evidenció que actualmente se está trabajando en realizar procesos de desactivación, neutralización y/o precipitación para algunos de los residuos químicos (ver tabla 5) generados antes de ser almacenados temporalmente dentro del laboratorio y posteriormente ser entregados

al gestor de residuos de la SIU (Figura 11), identificando una posible debilidad relacionada con la conciencia ambiental teniendo en cuenta el uso de grandes cantidades de reactivos en cada uno de sus metodologías, sin tener documentados dichos procesos para su recuperación o reutilización. Sin embargo, cabe resaltar que dentro de los documentos externos encontrados en la plataforma documental GAIA se encuentran dos instructivos asociados a la precipitación de metales pesados (D-GS-09) útil para residuos en ensayos biológicos y determinaciones en matrices acuosas y otro para la neutralización de ácidos y bases (D-GS-06) útil para ensayos, que reportan a nivel general el principio metodológico para realizar estos procesos mencionados anteriormente.

Por su parte se evidenció también que el laboratorio busca alinearse con los estándares de inactivación, tratamiento y/o minimización de riesgo de los residuos generados reportados en el documento externo generado por la SIU “M-GS-02 Manual de gestión integral de residuos comunes, reciclables, biológicos, químicos y especiales generados en la sede de investigación universitaria”, con la finalidad de dar cumplimiento con los lineamientos establecidos en la normatividad ambiental vigente. Este último documenta el proceso de gestión de residuos interno dentro de la SIU el cual se realiza centralizado y consiste en llevarlos residuos generados en cada una de los laboratorios de la UDEA al sitio de almacenamiento central para coordinar la disposición final, se tienen programadas las rutas diarias de recolección independientes por tipo de residuos generados, incluyendo las actividades de generación, segregación en la fuente, desactivación de alta eficiencia de residuos biológicos, tratamiento de residuos químicos, movimiento interno, almacenamiento y entrega de los residuos al prestador del servicio especial de aseo.

Actualmente la SIU de la Universidad de Antioquia tiene contratos vigentes con empresas especializadas como “BIOLOGICOS Y CONTAMINADOS” para la biorremediación e incineración de residuos biológicos y químicos, “AQUIMSAS” empresa de aprovechamientos químicos encargada de recibir residuos químicos orgánicos sin halógenos para reutilización y aprovechamiento de estos en la elaboración de productos como pinturas, barnices entre otros (Tabla3). Además de un convenio con “RESIMEC” para la donación de los subproductos de residuos aprovechables (reciclaje) generados en la Universidad.

4.2 Diagnóstico ambiental caso de estudio (GAIA):

El laboratorio caso de estudio (GAIA) no cuenta con un registro específico asociado a la cantidad exacta de residuos generados. Sin embargo de acuerdo con el informe semestral reportado por la SIU para los residuos obtenidos como parte de la actividad académica e investigativa en los laboratorios de la SIU-UDEA, se reportó un estimado de residuos totales generados en unidades de peso 171,7 (Kg) producidos durante el periodo de octubre de 2020 hasta abril de 2021 (ver en detalle figura 13) en el laboratorio GAIA, clasificados según la normatividad vigente decreto 4741 del 2005 (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, por medio del cual se reglamenta parcialmente la prevención y manejo de los residuos y desechos peligrosos en el marco de la gestión integral); peligrosidad, almacenamiento, tratamiento y disposición final de los mismos, los resultados obtenidos y el diagnóstico se presentan en las Tablas 10 y 11.

Tabla 10. Clasificación y cuantificación de los residuos generados en los laboratorios GAIA ubicado en la SIU desde octubre del 2020 hasta abril del 2021 según decreto 4741 del 2005.

CUANTIFICACIÓN DE RESIDUOS GENERADOS EN EL LABORATORIO GAIA - EN EL PERIODO COMPRENDIDO ENTRE OCTUBRE DEL 2020 HASTA ABRIL 2021								
FUENTE	Código (Decreto 4741). Anexo I: Lista de residuos o desechos peligrosos por procesos o actividades	TIPO DE RESIDUO	Código (Decreto 4741). Anexo II: Lista A, Residuos o desechos peligrosos por corrientes de residuos	TIPO DE RESIDUO	FRECUENCIA DE RECOLECCIÓN	CANTIDAD MENSUAL (Kg)	TIPO DE CONTENEDOR	PELIGROSIDAD, TRATAMIENTOS Y DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS
Laboratorio (GAIA)	Y41	Solventes orgánicos halogenados	A3150(Desechos de disolventes orgánicos halogenados)	disolventes orgánicos halogenados	Mensual	1,2	Bidon	MATERIAL INFLAMABLE/TRATAMIENTO BIORREMEDIACIÓN/EMPRESA BIOLÓGICAS Y CONTAMINADOS
	Y42	Disolventes orgánicos, con exclusión de disolventes halogenados	A 3140 (Desechos de disolventes orgánicos no halogenados pero con exclusión de los desechos especificados en la lista B)	disolventes orgánicos no halogenados	Mensual	1,3	Bidon	MATERIAL INFLAMABLE/APROVECHAMIENTO/MPRESA AQUIMSAS
	Y21(Cr)	Compuestos de cromo hexavalente	que tengan Cr hexavalente) Mercurio, compuestos de mercurio	soluciones acuosa con metales pesados	Mensual	7,2	Bidon	MATERIAL TÓXICO/ALMACENAMIENTO BIORREMEDIACIÓN-CELDA DE SEGURIDAD
	Y29(Hg)	Mercurio, compuestos de mercurio	A1010(Desechos metálicos y desechos que contengan aleaciones de mercurio) A1030(Desechos que tengan como constituyentes o contaminantes al mercurio)		Mensual	46,8	Bidon	MATERIAL TÓXICO/ALMACENAMIENTO BIORREMEDIACIÓN-CELDA DE SEGURIDAD
	Y34	Soluciones ácidas o ácidos en forma sólida	A4090(Desechos de soluciones ácidas o básicas, distintas de las especificadas en el apartado	Soluciones ácidas o ácidos en forma sólida	Mensual	1,7	Bidon	SÓLIDOS INFLAMABLES Y CORROSIVOS/INCINERACIÓN DE SÓLIDOS/BIOLÓGICOS CONTAMINADOS
	Y35	Soluciones básicas o bases en forma sólida	A4090(Desechos de soluciones ácidas o básicas, distintas de las especificadas en el apartado	Soluciones básicas o bases en forma sólida	Mensual	0	Bidon	N/A
			A4140 (Desechos consistentes o que contienen productos químicos que no responden a las especificaciones o caducados. Correspondientes a las categorías del anexo I y que muestran las características peligrosas del anexo II)	soluciones acuosas sin metales pesados	Mensual	32,5	Bidon	PELIGROSOS PARA EL MEDIO AMBIENTE/INCINERACIÓN/BIOLÓGICOS Y CONTAMINADOS
	Y34, Y35	Soluciones básicas o bases en forma sólida. Soluciones ácidas o ácidos en forma sólida	A4090(Desechos de soluciones ácidas o básicas, distintas de las especificadas en el apartado correspondiente de la lista B)	Soluciones inorgánicas; ácidos básicos . sustancias solidas inorgánicas	Mensual	0	Bolsa	N/A
	Y42	Disolventes orgánicos, con exclusión de disolventes halogenados	A3140 Desechos de disolventes orgánicos no halogenados pero con exclusión de los desechos especificados en la lista B	Sólidos orgánicos	Mensual	2,6	Bolsa	PELIGROSOS PARA EL MEDIO AMBIENTE/INCINERACIÓN/BIOLÓGICOS Y CONTAMINADOS
			A4020 (Desechos clínicos y afines y desechos generados en hospitales u otras instalaciones durante actividades de investigación). A4140 (Desechos consistentes o que contienen productos químicos que no responden a las especificaciones o caducados) (Correspondiente al Anexo I, y que muestran las características peligrosas del anexo II)	Material contaminado	Mensual	78,4	Bidon	RIESGO INFECCIOSO/TRATAMIENTO INCINERACIÓN DE BIOLÓGICOS/BIOLÓGICOS Y CONTAMINADOS

Nota: Elaborado por el autor a partir del Informe semestral de la SIU (Sede investigativa de la universidad) –UDEA y Decreto 4745 del 2005.

Tabla 11. Diagnóstico ambiental residuos generados en el laboratorio caso de estudio (GAIA).

LABORATORIO CASO DE ESTUDIO (GESTIÓN Y MODELACIÓN AMBIENTAL GAIA) GENERADOR DE RESIDUOS PELIGROSOS

FUENTE GENERADORA	RESIDUOS (RIESGO BIOLÓGICO)	CANTIDAD DE RESIDUOS ESTIMADA GENERADA MENSUALMENTE (KG)	FUENTE GENERADORA	RESIDUOS (RIESGO QUÍMICO)	CANTIDAD DE RESIDUOS ESTIMADA GENERADA MENSUALMENTE (KG)
- Determinación de Legionella, en agua potable, determinación de coliformes totales y E.coli en agua natural, determinación de mercurio total en sedimentos, tejido foliar, musculo de pez:	Aguas con microorganismo s y material contaminado (Legionella, ciantoxinas, Clostridium sp, E. coli, coliformes totales, ostras, cianobacterias, salmonela, hongos ambientales, con pos.) Restos de tejido de peces, y	78,4	A) Análisis de plaguicidas en agua:	A) Disolventes orgánicos halogenados (diclorometano, cloroformo).	a) 1,2
			B) Análisis de nitrógeno NTK en agua y sedimento; metilmercurio en sedimentos; metilmercurio en tejido de pez; nitrógeno total en sedimento; Diazinon malatión, clorpirifos en agua	B) Solventes orgánicos no halogenados: Metanol, etanol, hexano, acetato de etilio, heptano, acetonitrilo, octanol, tolueno.	b) 1,3

	<p>heces y mucosas de nutrias y renacuajos. Cabellos humanos Guantes, filtros, servilletas, puntas, ependord Guardianes con portaobjetos contaminados</p>		<p>cruda; silicio biogénico en sedimento; Cd, Cr, Cu,Ni,Pb,Zn ; nitritos en agua.</p> <p>C)Análisis de ortofosfatos en agua; mercurio total en sedimentos, tejido foliar y pez; metilmercurio en sedimentos; COT en sedimentos; silicio biogénico en sedimentos; Determinación de Cd, Cr, Ni, Pb y Zn en sedimento.</p> <p>D)Almacenamient o y preservación de muestras. Análisis de fosforo total y ortofosfatos en agua.</p>	<p>C) Soluciones acuosas con metales pesados: Silicio, estaño, manganeso, mercurio, plata, zinc, aluminio, cromo, cadmio, metilmercurio, sodio, potasio, titanio cobre, plomo,</p> <p>D) Soluciones ácidas o ácidos en forma sólida: Mezcla de ácidos con molibdeno y cromo. Mezcla de</p>	<p>c) 54</p> <p>d) 1,7</p>
--	---	--	---	--	----------------------------

			<p>Determinación de Clostridium en agua potable.</p> <p>Análisis de Cianuro en muestra de sedimento y agua.</p> <p>Análisis de mercurio en agua superficial.</p> <p>Determinación de nitratos en agua.</p> <p>Determinación de metilmercurio en sedimento y musculo de pez.</p>	<p>ácidos: sulfúrico, nítrico, clorhídrico, fluorhídrico, acético glacial, fosfórico, cianhídrico, ascórbico.</p> <p>Soluciones ácidas con amoniaco.</p> <p>Soluciones acidas con molibdeno, vanadio y fosfatos.</p>	
			<p>F) Determinación de dureza total, determinación de nitritos en agua</p>	<p>F) Soluciones acuosas sin metales pesados: Soluciones acidas con sulfanilamida. Soluciones con nitrato y nitrito de sodio.</p>	F)32,5

			H) Determinación de material particulado PM10	Soluciones sulfatosacidas con nitratos. Muestras contaminadas con organofosforados. H) Solidos orgánicos: Ditizona, difenilcarbazida. metilmercurio. naftiletilendiamina	H)2,6
--	--	--	--	---	-------

Nota: Modificado por el autor a partir del M-GS-02 Manual De Gestión Integral De Residuos Comunes, Reciclables, Biológicos, Químicos Y Especiales Generados En La Sede De Investigación Universitaria, 2019 e informe semestral de la SIU (Sede investigativa de la universidad) –UDEA.

Por su parte de acuerdo con el informe de revisión por la dirección elaborado por el laboratorio caso de estudio GAIA; para el periodo comprendido entre enero a diciembre del 2019. Se registró un total de 1.251 muestras procesadas en diferentes matrices (310) en sedimento, (298)

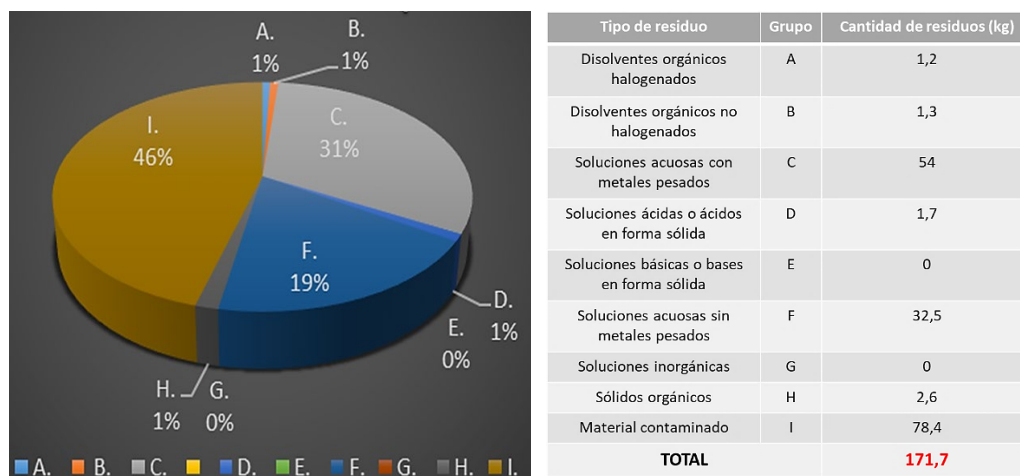
agua residual, (279) tejido de pez, (188) agua superficial, (51) heces, (50) estruvita, (22) SPMD, (16) lixiviado, (15) POCIS, (13) residuo sólido, (7) lodo, (1) turba, (1) medio de cultivo. Entre los parámetros y/o variables más analizadas (número de análisis/ parámetro) se reportaron (513) Mercurio Hg, (331) fosforo P, (329) metilmercurio MeHg y (322) ortofosfatos.

Sin embargo, para el periodo de enero a diciembre del 2020 se procesaron apenas un total de 501 muestras procesadas en diferentes matrices (292) en agua superficial, (29) tejido de pez, (256) sedimento, (37) tejido vegetal; entre los parámetros y/o variables más analizadas (número de análisis/ parámetro) se registraron (124) PT, (115) OP, (124) Hg.

Finalmente, para el año 2021 en este mismo periodo (enero a diciembre) se analizaron 669 muestras en matrices como (296) agua superficial, (273) sedimento, (81) tejido de pez, (37) tejido vegetal, las variables con mayor demanda para el año en mención fueron (125) PT, (115) OP, (81) Hg.

Lo anterior se traduce en un decrecimiento en el número de análisis realizados por el laboratorio GAIA por año específicamente para el año 2020, esto posiblemente debido a la situación de emergencia (pandemia) sanitaria ocasionada por el coronavirus (COVID-19) a nivel mundial, que afecto considerablemente el sector de prestación de servicios ambientales y análisis de laboratorio.

Figura 12 a) *Cuantificación de residuos generados en el GAIA a) (%masa) b) (Kg) ambos para el periodo comprendido entre octubre del 2020 hasta abril del 2021.*

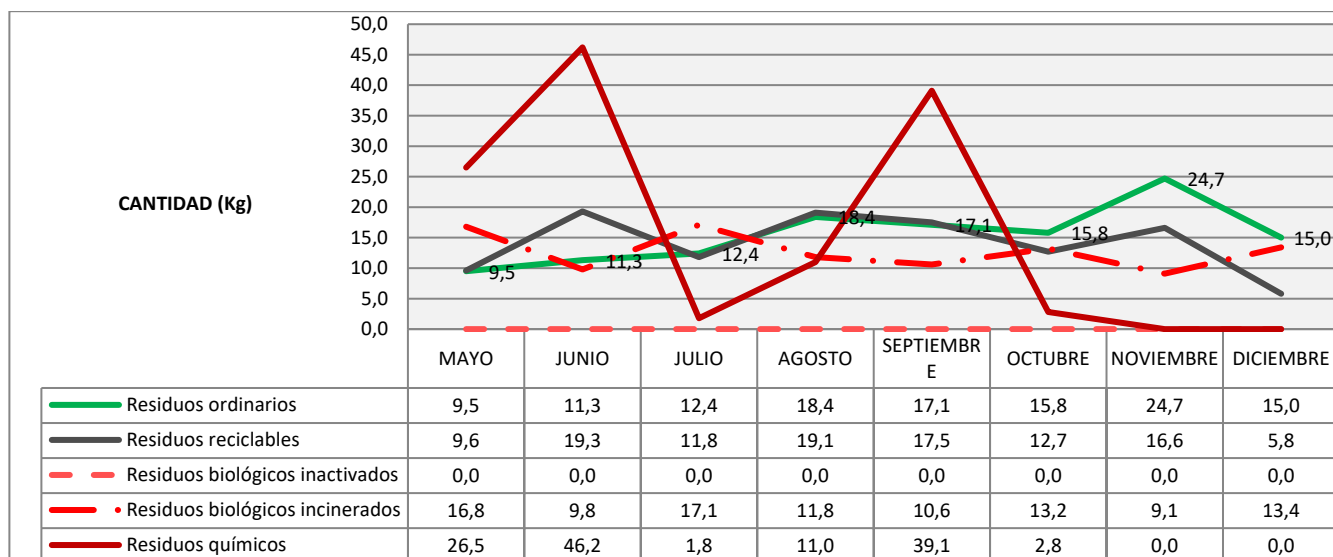


Nota: Autor

La clasificación (tipo) y cuantificación (% masa) de los residuos generados en el laboratorio GAIA se presentan gráficamente en la figura 12 con un total de 171,7 kg producidos durante octubre de 2020 hasta abril de 2021. La cuantificación mensual según el tipo de residuo evidenció que el material contaminado Grupo I se produce en mayor cantidad con un porcentaje de 45,6%, seguida de soluciones acuosas con metales pesados del grupo C con 31,4%, soluciones acuosas sin metales pesados del grupo F con 19% y en menor medida, disolventes orgánicos halogenados del Grupo A con 0,6%.

Adicionalmente tal como se observa en la figura 13 para el periodo restante entre mayo a diciembre del 2021 se cuenta con la información reportada en el “informe de indicadores de destinación” elaborado por la administración de la SIU con la cantidad total de residuos generados por el GAIA, es de inferir que se tiene un registro de un total de 465,8 kg de residuos generados por mes entre el rango de tiempo en mención y clasificados respectivamente según el tipo de desechos en: residuos ordinarios (124,2 kg), residuos reciclables (112,4 kg), residuos biológicos inactivados (0 kg), residuos biológicos incinerados (101,8 kg), residuos químicos (127,4 kg).

Figura 13 Cuantificación de residuos generados en el GAIA en (Kg) por mes para el periodo comprendido entre mayo hasta diciembre del 2021.



Nota: Modificado por el autor a partir del informe de indicadores de destinación de la SIU (Sede investigación de la universidad)-UDEA para el año 2021.

4.3 Cumplimiento normativo caso de estudio (GAIA)

La universidad de Antioquia en cabeza de la administración de la SIU cuenta con el “manual de gestión integral de residuos biológicos, químicos y especiales generados en la sede de investigación universitaria” que permite establecer procedimientos, procesos y actividades para la gestión integral de residuos comunes, biológicos, químicos, cumpliendo parcialmente el Decreto 4741 del 30 de diciembre de 2005, “Por el cual se reglamenta la prevención y manejo de los residuos desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral”, como se evidencia en la Tabla 8. Además de lo establecido en resolución 1164 de 2002 “Por la cual se adopta el Manual de Procedimientos para la Gestión Integral de los residuos hospitalarios y similares” y Decreto 351 de 2014 “Por el cual se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en la atención en salud y otras actividades” y reglamentaciones institucionales como

el acuerdo Superior 434 de 2015 “Por la cual se establece la Política de Seguridad y Salud en el Trabajo para la Universidad de Antioquia”.

En lo que se refiere a los residuos químicos peligrosos generados específicamente en el laboratorio caso de estudio (GAIA), no se encuentra documentado a nivel interno.

Tabla 12. *Cumplimiento de la normatividad decreto 4741 de 2005 para el caso de estudio.*

ARTICULO O ITEM	NIVEL DE CUMPLIMIENTO		OBSERVACIONES
	SI	NO	
Artículo 5. Clasificación de los residuos desechos peligrosos.		X	Existe una clasificación parcial, la cual no se ha estandarizado y documentado dentro del laboratorio.
Artículo 6. Características que confieren a un residuo o desecho la calidad		X	No se cuenta con una caracterización de peligrosidad RESPEL. En la SIU se cuenta únicamente con caracterización de los vertimientos de aguas residuales.
Artículo 7. Procedimiento mediante el cual se puede identificar si un residuo o desecho es peligroso.		X	No se cuenta con métodos de identificación de peligrosidad de RESPEL
Artículo 8. Referencia para procedimiento de muestreo y análisis de laboratorio para		X	No se cuenta con procedimientos para el muestreo y determinación de peligrosidad de un RESPEL.

ARTICULO O ITEM	NIVEL DE CUMPLIMIENTO		OBSERVACIONES
	SI	NO	
determinar la peligrosidad de un residuo o desecho peligroso			
Artículo 9. De la presentación de los residuos o desechos peligrosos.	X		Los residuos se encuentran envasados y etiquetados en el laboratorio. Se cuenta con recolección por parte de la SIU de todos los Respel generados en el laboratorio caso de estudio (GAIA), para su posterior disposición y tratamiento final con empresas especializadas
Artículo 10. Obligaciones del Generador. De conformidad con lo establecido en la Ley, en el marco de la gestión integral de los residuos o desechos peligrosos.	X		*Se cumple parcialmente con las obligaciones establecidas en el decreto: Incisos a), b) y c) puesto que la universidad cuenta con un plan para la gestión integral de residuos peligrosos, y una identificación de acuerdo a peligrosidad de los residuos según con el conocimiento técnico y una clasificación muy general de las listas de desechos o residuos peligrosos de los anexos I y II del decreto 4741, más no cuenta con la caracterización fisicoquímica de los mismos. Gran parte de los recipientes están rotulados únicamente con el nombre del residuo que se deposita en ellos, las bolsas se marcan con el nombre del laboratorio o área a la que pertenecen (cumplimiento parcial inciso d). La universidad cuenta con servicios de tratamiento y disposición final de residuos prestados por empresas especializadas como “Biológicos y contaminados”, “Aquimsas” entre otros (dando cumplimiento inciso e). La universidad está registrada ante la autoridad ambiental como generador con su respectiva actualización anual (cumplimiento inciso f). Se cuenta con programa de formación y educación además del registro de asistencia a capacitaciones asociado al riesgo de los residuos. También Se encuentra documentado el plan de

ARTICULO O ITEM	NIVEL DE CUMPLIMIENTO		OBSERVACIONES
	SI	NO	
			contingencia y certificaciones de la disposición final por parte de los receptores. (Dando cumplimiento inciso g,h,i y j). Los servicios para el tratamiento y/o disposición final de los residuos generados se hacen con empresas que cuentan con licencias y permisos de acuerdo a la normatividad ambiental vigente (Dando cumplimiento al inciso k).
Artículo 11.	X		
Responsabilidad del generador			La inscripción de la Universidad de Antioquia sede de la SIU en el Registro de Generadores (Clasificación: mediano generador) se llevó a
Artículo 12°.	X		cabo en el año 2020 ante la autoridad ambiental competente (IDEAM).
Subsistencia de la responsabilidad			
Artículo 23°. Del consumidor o usuario final de productos o sustancias químicas con propiedad peligrosa	X		La universidad hace entrega de los residuos o desechos peligrosos posconsumo provenientes de productos o sustancias químicas con propiedad peligrosa a empresas especializadas, para el caso de medicamentos (incineración).
Artículo 27 y 28. Del Registro e Inscripción de Generadores.	X		La inscripción de la Universidad de Antioquia sede de la SIU en el Registro de Generadores (Clasificación: mediano generador) se llevó a cabo en el año 2020 ante la autoridad ambiental competente (IDEAM).

Nota: Autor a partir del decreto 4741 de 2005 unificado en el título 6 decreto 1076 único y reglamentario del sector ambiente y desarrollo sostenible de 2015

4.4 Identificación y evaluación de aspectos e impactos ambientales

Después de recolectar la información en el laboratorio GAIA (documentos, registros fotográficos etc.) Se evidencia que hay muchos aspectos por mejorar y muchas debilidades asociadas al etiquetado de materia prima, y manejo de residuos sólidos y líquidos, provenientes de varios procesos fisicoquímicos validados. Se procede a la realización de un análisis estratégico del caso de estudio por medio de una matriz DOFA (Cordina,2011), donde se identifican tanto las fortalezas representativas como por ejemplo el uso de procesos de desactivación y/o neutralización de residuos generados, y las debilidades, propias del laboratorio GAIA puesto que no cuentan con un registro específico de los residuos generados y se presenta una clasificación parcial no estandarizada. Por su parte como oportunidades de mejora (Valoncillos, 2021) el caso de estudio busca alinearse a los estándares de tratamiento y minimización de riesgos asociados a los residuos. Lo anterior se hizo con el fin de consolidar la información requerida para el posterior análisis comparativo entre métodos de determinación de mercurio en matrices ambientales, y así proponer estrategias que puedan ser implementadas desde los principios de la química verde. En la tabla 13 se ilustra la matriz DOFA.

Tabla 13. Matriz DOFA

<h1 style="margin: 0;">Matriz DOFA</h1>		Fortalezas (F)	Debilidades (D)	
			1. Cuenta con áreas aisladas y definidas para cada uno de los metodos que se emplean (Fisicoquimicos,microbiologicos, ecotoxicologico)	1. Dentro del area de almacenamiento y preparacion de los reactivos quimicos, se encuentran reactivos contaminados, los cuales cambian en sus propiedades fisicas y quimicas, lo que los convierte directamente en residuos.
			2. Se cuenta con un acertado sistema de etiquetado (aplicativo etiquetame) de las materias primas de ingreso y salida que sirve como guia para determinacion de las peligrosidades	2. Se observan reactivos quimicos sin etiquetar dentro del area de almacenamiento lo que podria representar un peligro.
			3. Los reactivos se encuentran almacenados correctamente dentro del laboratorio en estantes de madera debidamente rotulados y separados de acuerdo al tipo de peligro que implican los grupos de reactivos.	3. No hay una actualizacion recurrente de la informacion en el aplicativo relacionado con inventario de insumos quimicos, debido a cambio constante de personal, y errores administrativos.
			4. Los reactivos quimicos liquidos tambien estan clasificados respecto al criterio de contenido de metales, ya que gracias a esto, se les puede realizar el debido tratamiento para el descarte de residuos.	4. Los residuos de naturaleza organica, y los que contienen cianuros, no cuentan con tratamiento previo dentro del laboratorio, si no que se le deja al proveedor externo para el descarte del desecho.
			5. Cuenta con procesos fisicoquimicos validados o verificados.	5. El laboratorio no cuenta con un registro especifico asociado a la cantidad exacta de residuos generados.
			6. El laboratorio implementa procesos de desactivacion, neutralizacion, y precipitacion de residuos quimicos generados para el almacenamiento que posteriormente seran entregados al gestor de residuos.	6. Existe una clasificacion parcial, no estandarizada y documentada dentro del laboratorio.
Oportunidades (O)	<p>1. El laboratorio busca alinearse con los estandares de inactivacion, tratamiento y minimizacion de riesgos de los residuos generados con la finalidad de dar cumplimiento con los lineamientos de la normatividad ambiental vigente.</p> <p>2. Se tienen dispuestas rutas diarias de recoleccion de residuos por tipo, de todos los laboratorios dentro de la UDEA.</p> <p>3. Se tienen contratos vigentes con empresas especializadas en la disposicion y descarte de residuos.</p> <p>4. Se cuenta con el registro del generador de residuos en el Registro de Generadores ante el IDEAM.</p> <p>5. Se reporta un estimado de residuos generados en unidades por peso, clasificados según la normatividad vigente.</p>	<p>Estrategia FO Continuar con las recolecciones de residuos dentro de la universidad, pero haciendo un registro mas adecuado de la cantidad en peso de residuos generados dentro del laboratorio.</p>	<p>Estrategia DO Mantener actualizado el aplicativo etiquetame, de esta manera se puede llevar un control de las materias primas.</p>	
Amenazas (A)	<p>1. El laboratorio usa grandes cantidades de reactivos en cada una de las metodologias empleadas sin tener documentados procesos para su recuperacion y reutilizacion. Lo cual no es coherente con la conciencia ambiental.</p> <p>2. No se cuenta con una caracterizacion de peligrosidad RESPEL. Solo se cuenta con caracterizacion de los vertimientos de agua residuales.</p> <p>3. No se cuenta con metodos de identificacion de peligrosidad RESPEL.</p> <p>4. No se cuenta con procedimientos para el muestreo y determinacion de peligrosidad de un RESPEL.</p> <p>5. Dentro de las practicas efectuadas en el laboratorio se generan residuos de carácter infeccioso, reactivo, radiactivo, inflamable, entre otros.</p>	<p>Estrategia FA Implementar la caracterizacion, metodos y procedimientos de identificacion de peligrosidad RESPEL.</p>	<p>Estrategia DA Al implementar el sistema peligrosidad RESPEL, se logran solucionar problemas asociados con el tipo y cantidades de residuos generados, además se podría estandarizar el uso del aplicativo etiquetame para que no influya el cambio de personal dentro del laboratorio con la trazabilidad de los procesos que allí se generan.</p>	

4.5 Evaluación verde de las metodologías seleccionadas para el caso de estudio mediante un método de análisis de decisión multicriterio (TOPSIS, HEXAGON Y RGB)

Según lo observado en la recolección de la información que se hizo en el laboratorio GAIA (documentos, registros fotográficos etc) se evidencia que hay muchos aspectos por mejorar y muchas debilidades relacionadas con etiquetado de materia prima, y manejo de residuos sólidos y líquidos, provenientes de varios procesos fisicoquímicos validados como se evaluó en la matriz DOFA, sin embargo para acotar la información, y enfocar el segundo objetivo de este trabajo que consiste la evaluación verde mediante metodologías de análisis de decisión multicriterio, se seleccionó el método de determinación de mercurio por absorción atómica en matrices acuosas, basado en el método normalizado **SM 3112B Método espectrométrico de absorción atómica de vapor frío**, un método que merece un importante enfoque ya que es uno de los métodos validados del laboratorio, de los más empleados y que requiere una gran atención en su generación de residuos, puesto que estos tienen un control parcial, con posibilidades de fortalecimiento, son peligrosos por el contenido de metales pesados y se generan indiscriminadamente obteniendo grandes volúmenes por muestra analizada. En la figura 14 se esquematizan las diferentes etapas de la metodología donde son generados los residuos contaminados con este metal.

Figura 14 Etapas del proceso del método de determinación de mercurio en matrices acuosas

Nota: El autor

Según lo observado en este método se generan 2,18 L de residuo líquido contaminado con mercurio, un metal pesado que representa una alta peligrosidad al medio ambiente y por supuesto la salud de los analistas que tienen contacto con este residuo. Es por esto por lo que es importante evaluar el veredor de este método con tres metodologías de análisis de decisión multicriterio.

A continuación, se presenta el resultado de la evaluación del método RGB y los colores resultantes de la predicción. (ver documentos de Excel en anexos).

Figura 15 Evaluación preliminar del método RGB en la metodología de determinación de mercurio en agua.

		W=8	w=2		w=2		w=2		w=2		w=2			
REDNESS (Rendimiento analítico)			LINEALIDAD (R2)		LIMITE DE DETECCIÓN		LIMITE DE CUANTIFICACIÓN		PRECISION (RSD)		EXACTITUD (% RECUPERACION)			
CS: 77,5%	LAV=33.3		0,99		0.02 ug/L		0.15 ug/L		15%		80%			
	LSV=66.6		0,999		0.2 ug/L		0.4 ug/L		2%		120%			
	Result		0,997		0.2 ug/L		0.4 ug/L		4,80%		88,90%			
	Score (0-100)		95	95	70	70	75	75	70	70	80	80		
GREENNESS (Seguridad con el medio ambiente)		W=8	w=3				w=3				w=1			
			CANTIDAD DE RESIDUOS				TOXICIDAD DE LOS REACTIVOS QUIMICOS				TOXICIDAD DE LOS RESIDUOS		OTROS RIESGOS LABORALES	
CS: 52,4%	LAV=33.3		acceptable				acceptable				5 riesgos			
	LSV=66.6		satisfactorio				satisfactorio				2 riesgos			
	Result		acceptable				acceptable				deficiente		2 riesgos	
	Score (0-100)		50	50	50	50	60	60	60	60	40	40	60	60
BLUENESS (Productividad/eficacia práctica)		W=8	w=2				w=3				w=2		w=3	
			COSTO DE ANALISIS				TIEMPO DE ANALISIS				CONSUMO DE MUESTRA		OTROS ASPECTOS	
CS: 51,9%	LAV=33.3		acceptable				acceptable				acceptable		acceptable	
	LSV=66.6		satisfactorio				satisfactorio				satisfactorio		satisfactorio	
	Result		promedio				moderado				promedio		satisfactorio	
	Score (0-100)		50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	60	60
FINAL COLOR:			REDNESS		GREENNESS		BLUENESS		BRILLIANCE (MB):		59,5%			
RED			≥33.3%	≥66.6%	≥33.3%	≥66.6%	≥33.3%	≥66.6%						
			yes	yes	yes	no	yes	no						
Short annotation: 59red			Long annotation: 59red(77/8red-52/8green-52/8blue)											

Figura 16 Colores resultantes de la predicción del método RBG.

Resultante método color	ROJIZO	AZUL	VERDE	RECOMENDACIONES GENERALES
Blanco	CS ≥ 66.6%	CS ≥ 66.6%	CS ≥ 66.6%	El método es completo y bien fundamentado en términos de los tres atributos principales (rendimiento analítico, productividad/eficacia práctica y seguridad). Es un buen candidato para el método de elección para todas las aplicaciones
Magenta	CS ≥ 66.6%	CS ≥ 66.6%	CS ≥ 33.3%	El método proporciona una puntuación satisfactoria en los aspectos rojo y azul aunque

Resultante método color	ROJIZO	AZUL	VERDE	RECOMENDACIONES GENERALES
				carece del carácter verde para ser completo. Puede ser el método de elección si no hay alternativas “más verdes” disponibles.
Amarillo	CS \geq 66.6%	CS \geq 33.3%	CS \geq 66.6%	El método proporciona una puntuación satisfactoria en términos de los aspectos rojos y verde, aunque carece del azul para ser completa. Puede ser el método de elección si el número de análisis previstos es relativamente bajo
Cian	CS \geq 33.3%	CS \geq 66.6%	CS \geq 66.6%	El método proporciona una puntuación satisfactoria en términos de los aspectos azul y verde, aunque carece del carácter rojo para ser completo. Puede ser el método de elección si los requisitos relativos a la calidad del resultado analítico son menos estrictos
Rojo	CS \geq 66.6%	CS \geq 33.3%	CS \geq 33.3%	Este método se caracteriza por un buen rendimiento analítico, aunque solo proporciona un nivel aceptable de seguridad y productividad/eficacia práctica. Puede ser el método de elección si el número de análisis planificados es relativamente bajo y si no hay alternativas más verdes disponibles.
Azul	CS \geq 33.3%	CS \geq 66.6%	CS \geq 33.3%	Este método se caracteriza por una buena productividad/eficacia práctica. Aunque solo proporciona un nivel aceptable de potencia analítica y seguridad. Puede ser el método de elección si los requisitos relativos a la calidad

Resultante método color	ROJIZO	AZUL	VERDE	RECOMENDACIONES GENERALES
				del resultado analítico son menos estrictos y si no hay alternativas más verdes disponibles.
Verde	CS \geq 33.3%	CS \geq 33.3%	CS \geq 66.6%	Este método es generalmente seguro y respetuoso del medio ambiente, aunque solo proporciona un nivel aceptable de potencia analítica y productividad/eficacia práctica. Puede ser el método de elección si el número de análisis previstos es relativamente bajo y si los requisitos relativos a la calidad del resultado analítico son menos estrictos.
Incoloro (gris)	CS \geq 33.3%	CS \geq 33.3%	CS \geq 33.3%	El método es generalmente aceptable en todos los aspectos, aunque carece de predisposiciones claras. Su utilización puede considerarse condicionalmente, si no hay mejores métodos disponibles.
Negro	CS < 33.3% para uno o más tributos primarios (falta de aceptación)			La utilización apropiada del método es dudosa porque es defectuosa a causa de uno o más atributos primarios y esto eclipsa cualquier característica positiva.

Según los datos obtenidos, el método se clasifica dentro del color rojo, dado por la predicción que genera el análisis multicriterio el cual afirma que el método está caracterizado por tener un buen rendimiento analítico, aunque sólo proporciona un nivel aceptable de seguridad y respeto al medio ambiente y productividad y eficacia práctica. Según lo anterior es una buena alternativa elegir este método para el análisis multicriterio, en caso de que el número de análisis

planificados sea relativamente bajo teniendo presente que ahora existen alternativas más ecológicas. El porcentaje obtenido en el algoritmo es 59,5%.

El segundo método evaluado fue el método de HEXAGON donde se asignan unos puntos de penalización en una escala de 10 puntos donde 0 puntos indica que no representa ningún peligro, 1 punto representa advertencia y 4 puntos representa peligro. De esta manera se obtuvieron las sumatorias de las puntuaciones para cada criterio que evalúa el método, al final se introduce en un sistema de cuantificación que asigna un valor de 0 a 4 donde la escala está relacionada con rendimiento excelente, bueno, adecuado, débil y fallido respectivamente, y se representa en un pictograma de hexágono y se obtiene el correspondiente resultado. En la tabla 14,15,16,17, 18 y 19 se observan los datos registrados en la plantilla de Excel, y en la figura 17 se observan los resultados finales de la evaluación en la figura de hexagon.

Tabla 14. *Determinación de figuras de mérito 1, para el método HEXAGON*

FIGURAS DE MERITO 2 (FM-2)			Control de calidad	PPs	Precisión	PPs
			Frecuencia	2	Frecuencia	3
Tiempo requerido	2	Tiempo requerido	2			
Numero de estandares	3	Niveles de concentración	3			
		Magnitud/Tamaño	3			
		Selectividad	2			
Total FM-2 PPs:	20	Sum PPs	7			13

Tabla 15. Determinación de figuras de mérito 2 para el método HEXAGON.

			Riesgos	PPs				Riesgos	PPs
			TOXICIDAD: Peligros para la salud y el medio ambiente					Toxicidad severa	4
		Corrosivo		3			Inflamables	2	
		Irritación		3			Provocan quemaduras	3	
		Irritación en los ojos		3			Gases de bajas presiones	2	
		Irritación al sistema respiratorio y piel		3			Sustancias que reaccionan espontáneamente	2	
		Mutagenico		3			Piroforicos	2	
		Carcinogeno		5			Sustancias que experimentan un calentamiento espontáneo.	4	
		Toxico/Veneroso		5			Gases inflamables activados por agua	2	
		Toxicidad sistémica para el órgano diana		5			Peroxidos orgánicos	2	
		Toxicidad para el medio acuático		5			Corrosivos para metales	2	
		Cantidad de reactivo		2			Cantidad de reactivos	2	
Total toxicidad PPs:	41	Sum PPs	41	Total seguridad PPs:	25	Sum PPs	25		

Tabla 16. Determinación de toxicidad y seguridad para el método HEXAGON.

RESIDUOS			Ite m	PPs
		Tratamiento de desechos	4	
		Material desechable	4	
Total residuos PPs:	12	Sum PPs	12	

Tabla 17. Determinación de manejo de residuos para el método HEXAGON.

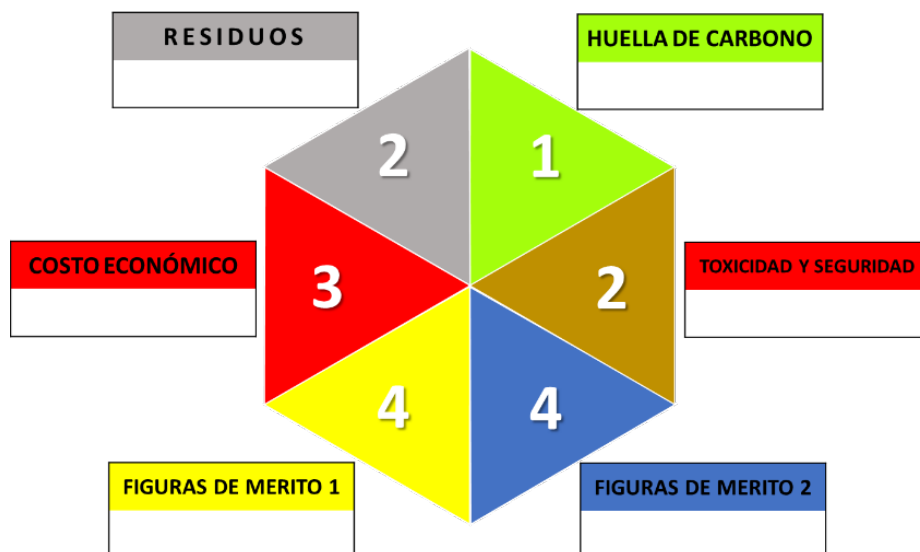
HUELLA DE CARBONO	Tiempo de análisis/muestra (horas)	4,00
	Consumo de potencia total (kW)	0,05
	kg CO₂ equivalent/sample	0,049

Tabla 18. *Determinación de huella de carbono para el método HEXAGON.*

COSTO ECONOMICO ANUAL	Número de muestras/semana	30	Numero de muestras/año	1560
	Costo de equipamiento (€)	22893	Costo de equipamiento (€)/año	2289
	Periodo de amortization (años)	10		
	Costo de reactivos (€)	523,75	Costo reactivos (€)/año	2095
	Costo de material consumible (€)	1000	Material consumible/año (€)	100
	Periodo de amortización(años)	10		
	Salario personal calificado (€/ hora)	15	Salario del personal (€)/año	31200
	Consumo de electricidad (€/kWh)	0,15	Costo total de electricidad (€)/año	0,030
	Consumo de potencia total(kW)	0,05		
	Tiempo de análisis (h)/muestra	4,00		
			TOTAL COSTO (€/year)	35684

Tabla 19. *Determinación de costo económico anual para el método HEXAGON*

		Tratamiento de la muestra y preparación		Características de método		Calibración	
		PPs		PPs		PPs	
FIGURAS DE MERITO 1 (FM-1)	Preservación	3	Categorías de metodos	1	Frecuencia	3	
	Almacenamiento	3	Modo operacional	1	Tiempo requerido	1	
	Cantidad	1	Portabilidad	0	Número de estandares	3	
	Reactivos/solventes utilizados	2	Metodo/muestra	1	Ajuste lineal R ²	3	
	Cantidad de reactivos/solventes	2	Análisis/muestra	2	LOD, LOQ	3	
	Instrumentos vs adecuacion al métodos	2	Tiempo de análisis/muestra	1	Rango de trabajo y linealidad	3	
	Número de muestras semanales	2	Robustes	2	Precision	3	
	Pretratamiento	3					
	Total FM-1 PPs:	45	Sum PPs	18	8	19	

Figura 17 Pictograma de hexágono para la metodología de determinación de mercurio en agua.

Según los resultados obtenidos de la evaluación de este método, se observa que la mayoría de los criterios están alrededor de 4, esta alta penalización es debida al uso de reactivos peligrosos, la cantidad de residuos generados lo que conduce a un método que no representa una sostenibilidad ambiental. De este método obtenemos un promedio de los puntos de penalización a los cuales se les asigna un porcentaje para ser comparado con los otros métodos, como se describe en la ecuación 1.

$$\text{Promedio} = \frac{1 + 2 + 3 + 4 + 4 + 2}{6} = 2,67$$

Para obtener un porcentaje que permita comparar los tres algoritmos, se toma el promedio obtenido y se calcula el porcentaje respecto al máximo valor de penalización del método (4).

$$\text{Porcentaje de criterio} = \frac{2,67}{4} \times 100 = 66,67\%$$

El siguiente método evaluado es el método TOPSIS en el cual se introducen valores de los criterios del método, el método crea una solución ideal con la cual se hace una comparación obteniendo al final un valor correspondiente a la similitud del método con la solución ideal creada. En la tabla 20 se evidencian los datos introducidos en la plantilla de Excel y en la tabla 21 se exponen los resultados arrojados por la evaluación.

Tabla 20. *Datos introducidos en el método TOPSIS.*

	LOD [µg/l]	RSD [%]	Cantidad de solventes orgánicos [ml]	Cantidad de solventes orgánicos* toxicidad (Peligro)	Cantidad de muestra [g o mL]	Residuo sólido(g)	Otros analitos (por concepto de analito)	Tiempo de análisis [min]
DETERMINACION DE MERCURIO POR ABSORCION ATOMICA VAPOR-FRIO	0,025	0,028	1	0	100	0	0	240

Como resultado de la evaluación del método se obtiene el siguiente resultado:

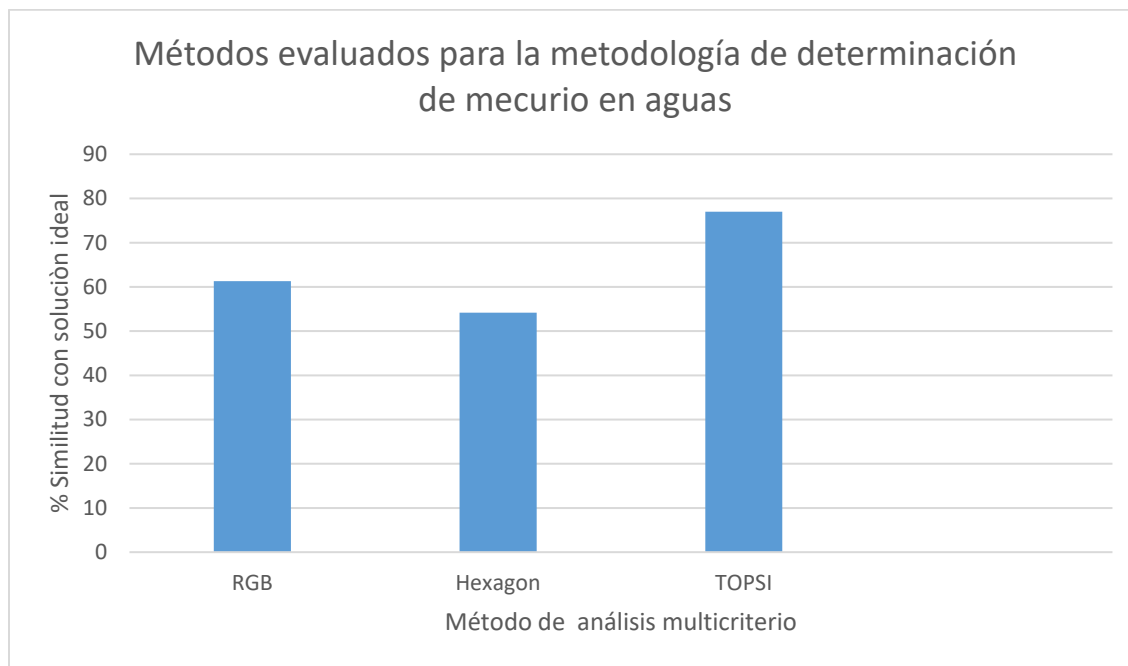
Tabla 21. *Resultados en el método TOPSIS.*

Método	Similitud con la solución ideal
Método de determinación de mercurio	0,71

Comparación de métodos

Con los resultados arrojados por las evaluaciones se procede a comparar los métodos en porcentaje de similitud con la solución ideal obteniendo los siguientes resultados:

Figura 18 *Métodos evaluados para la metodología de determinación de mercurio en matrices acuosas por absorción atómica.*



Según lo observado en la comparación de métodos, el más sencillo o de emplear y que arroja el resultado más conforme respecto a la similitud de la metodología con la solución ideal, se observa que TOPSI sería el método más adecuado de emplear. Sin embargo, es necesario hacer otras comparaciones puesto que aquí solo se está teniendo en cuenta un criterio de comparación, pero se deben evaluar otros factores y características de los métodos que puedan ajustarse más a las necesidades y herramientas que posea el laboratorio GAIA.

En la tabla 22 se resumen algunas características de los 3 métodos

Tabla 22. Características de los tres métodos de análisis multicriterio.

	TOPSIS	HEXAGON	RGB
Puntos fuertes	<ul style="list-style-type: none"> • Facilidad operacional • Sencillez en cuanto a interpretación. • Amplia aplicabilidad en otros campos además de la clasificación de métodos 	<ul style="list-style-type: none"> • Los colores como medio facilitador de interpretación de resultados. • Pictograma de resultado visualmente atractivo. • Regla de evaluación simple (otorgando puntos de penalización) compatible con la Eco-Scale. • Sencillez de interpretación 	<ul style="list-style-type: none"> • Los colores como medio facilitador de interpretación de resultados. • Flexibilidad en la selección de criterios. • Transparencia de la evaluación al proporcionar toda la información en una hoja de cálculo de Excel detallada según criterios del método.
Puntos débiles	<ul style="list-style-type: none"> • No presenta información detallada adicional sobre características del método y criterios a evaluar. • Se hace más representativa cuando es aplicada a varios métodos (la evaluación de 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere conocimiento y experiencia para otorgar puntos de penalización de manera objetiva. • La evaluación tiende a ser subjetiva e influenciada por intereses y apreciaciones propias del 	<ul style="list-style-type: none"> • La flexibilidad de las variables de evaluación puede potencialmente disminuir su objetividad. • Se debe tener previo conocimiento para entender con mayor facilidad el método, debido a su extensión.

TOPSIS	HEXAGON	RGB
un solo método hace difícil sin datos de referencia adicionales)	sujeto a cargo de del análisis multicriterio mediante HEXAGON.	• La evaluación cuantitativa de algunos criterios es problemática, a veces requiere simplificaciones y suposiciones

Según lo anterior no es tarea fácil hacer una evaluación del método a seleccionar para la evaluación del verdor de la metodología objetivo del trabajo, sin embargo, puede elegirse el método más deseable y que se ajuste a las necesidades. Aun considerando la simplicidad, del método TOPSIS, además de los resultados de similitud con soluciones ideales, se eligen los métodos HEXAGON y RGB puesto que ambos complementan una evaluación completa de criterios, y con el método HEXAGON es posible presentar los resultados de una manera simple y vistosa.

4.6 Fase de diseño de la herramienta de química verde a ser aplicada en el caso de estudio


4.6.1 Elaboración de la propuesta de gestión de residuos basada en química verde

Los métodos analíticos seleccionados para la evaluación del verdor de la metodología de análisis de mercurio por absorción atómica arrojaron resultados que indican que esta metodología es adecuada desde el punto de vista del rendimiento analítico, pero arroja niveles de alta toxicidad, un considerable impacto como huella de carbono, y un alto consumo de materias

primas y generación de residuos, traducido además en altos costos de análisis, así mismo como un considerable consumo energético. De esta manera, esta metodología requiere de la implementación de una estrategia para la gestión de mejoras en el impacto ambiental negativo que causa.

Tabla 23. Evaluación verde para determinación de mercurio por absorción atómica.



Evaluación verde del método para determinación de mercurio por absorción atómica diferentes matrices ambientales

HEXAGON	RGB
	<p>El método se caracteriza por un buen rendimiento analítico, aunque solo proporciona un nivel aceptable de seguridad / respeto al medio ambiente y productividad / eficacia práctica. Puede ser el método de elección si el número de análisis planificados es relativamente bajo y si no hay alternativas más ecológicas disponibles.</p>

De acuerdo con esta evaluación realizada, son varios los puntos críticos del método actualmente empleado SM 3112B, donde se hace necesario implementar una nueva estrategia que intervenga en el laboratorio. Así las cosas, la estrategia estaría basada en la actualización de la norma, implementando por consiguiente el método EPA 7473, lo que implica la alternativa de compra y adquisición de un nuevo equipo para la medición de mercurio en matrices acuosas, lo cual iría encaminado con la prevención y minimización de los residuos generados, además de que dicha estrategia estaría asociada directamente con la optimización en los procesos analíticos que permitan mejorar la gestión integral de los residuos generados en el laboratorio, evitando formación de sustancias peligrosas o aumento en los residuos, contribuyendo así a la reducción del impacto ambiental que se genera actualmente.

En la tabla 24 se hace una comparación entre el método de análisis actualmente empleado (3112B) y la alternativa propuesta (basada en la norma EPA 7473).

Tabla 24 . Cuadro comparativo de los métodos de análisis actual y el propuesto para análisis de mercurio en muestras ambientales.

Método nuevo	Parámetro	Método actual
Método EPA 7473		SM 3112B
DMA-80	Equipo	BUCK SCIENTIFIC 410 Mercury Analyzer
		
Descomposición térmica de muestra, amalgamación, absorción atómica	Principio	Digestión acida con permanganato de la muestra con posterior reducción y absorción atómica.
5 minutos	Tiempo típico de análisis	4 horas
Placas integradas de 2 x 40 con carga de muestras "sobre la marcha"	Tipo de muestreador	Muestreador manual
Sólido, líquido y gaseoso	Tipo de muestra	Líquida
0,5 gramos	Max. peso de muestra (sólido)	1,5 g
1,5 mL	Max. volumen de muestra (líquido)	100 mL
Aire u oxígeno	Gas portador	Suministro externo de argón, aire o nitrógeno
4 bar	Presión de entrada	30 a 100 psi
Ca. 100 ml / minuto	Flujo	400 mL/minuto
Múltiples materiales disponibles (cuarzo)	Barco de muestra	Cubeta de cuarzo

Método nuevo	Parámetro	Método actual
Método EPA 7473		SM 3112B
Tubo de cuarzo lleno de catalizador con zona de doble temperatura.	Horno de combustión	No
Tiempo de temperatura y tiempo en programas de temperatura	Temperatura de combustión	No
lámpara de mercurio de baja presión	Fuente de luz	Lampara de cátodo hueco de mercurio
253,65 nm	Longitud de onda	253,65 nm
Dos fotodiodos mejorados con UV	Detector	Tubo fotomultiplicador
0,001 ng Hg	Límite de detección	0,04 µg de Hg
0,01 ng a 1500 ng Hg	Rango de trabajo	190-930 nm
< 1,0% @ 10 ng Hg	Precisión típica	30-100 psi
Soluciones estándar y materiales de referencia certificados	Calibración	Soluciones estándar y materiales de referencia certificados
Hasta 10 veces	Pre-concentración	No
110 – 230 v, 50-60 Hz	Fuente de alimentación	240 V AC 50/60 Hz 220, 240V AC, 50/60 Hz Consumo energético: 50W
EPA 7473. El análisis directo de mercurio incorpora: descomposición térmica, Conversión Catalítica, Amalgamación y Espectrofotometría de Absorción Atómica.	Descripción del método utilizado	Standard Methods 3112B. Determinación de mercurio por espectroscopia de absorción atómica por vapor frío.

Con esta comparación se observa que al implementar esta estrategia para mitigar el impacto ambiental que tiene el método en el laboratorio GAIA, lograría reducir el consumo

energético, evitaría el pretratamiento de las muestras, y por su puesto disminuiría la generación de residuos gracias a la miniaturización del tamaño de muestra.

Se analiza la alternativa de adquirir un moderno equipo DMA-80 evo es un analizador directo de mercurio para muestras sólidas, líquidas y gaseosas. Implica un tiempo de análisis de solo 5 minutos y no se requiere la preparación de la muestra. La técnica es muy fácil de utilizar, solo debe pesar la muestra, cargarla en el auto-sampler incorporado e iniciar el análisis.

4.6.3 Evaluación de la eficiencia de la estrategia mediante la adquisición del equipo medición del consumo energético y presupuesto

En el siguiente esquema se observa las mejoras que estarían implementándose al aplicar la estrategia propuesta en el laboratorio GAIA:

Figura 19 Criterios directamente modificados por la propuesta de mejora del verdor del método analítico



Control del inventario. Es importante realizar un control de los insumos consumibles, puesto que esto implica mayor consumo de materias primas como solventes orgánicos y ácidos fuertes, lo que a su vez esta traducido en la generación de más residuos, esta problemática se ve mitigada con la implementación de este equipo nuevo que tiene la ventaja de no necesitar un pretratamiento de las muestras y este equipo también promueve la miniaturización de dicha muestra.

Modificación de los procesos analíticos. Al ser un nuevo equipo, se tendrán que implementar nuevas metodologías y modificar las ya establecidas y validadas en el laboratorio. Este equipo implementa normas como EPA 7473 (mercurio en sólidos y soluciones por descomposición térmica, amalgamación, y espectrometría de absorción atómica). Además, cumple con los métodos ASTM D-6722-01 (mercurio total en carbón y residuos de combustión en carbón), ASTM D-7623-10 (mercurio total en petróleo crudo) y UOP 938-10 (mercurio total y especies de mercurio en hidrocarburos líquidos).

Administración de residuos. Este equipo cuenta con la ventaja de que necesita muy poca muestra para la realización del análisis es por esto por lo que los residuos generados serán menores que los que se generan actualmente (3 L/por muestra aprox.). Así mismo se propone la gestión de un sistema normativo interno, donde haya una estricta clasificación, manejo y tratamiento de reactivos así como la disposición de los residuos generados separados adecuadamente, lo cual se podría hacer fortaleciendo el sistema de etiquetado con el que se cuenta actualmente, además de la adecuación de espacios adecuados para el almacenamiento de los reactivos y residuos correctamente señalizados con pictogramas, con áreas separadas y condiciones ambientales óptimas. Para realizar un control de la implementación de esta estrategia se propone realizar auditorías internas del cumplimiento de esta propuesta, donde específicamente se haga un análisis de mercurio en los residuos generados con el método, con rangos máximos de concentración de este metal.

Matriz de viabilidad técnica. Una vez establecida la propuesta nueva a implementar, se hace un cuadro comparativo entre las dos metodologías aplicadas (la actual y la propuesta) con el fin de establecer las ventajas que tendría una mejora de lo ya existente:

Tabla 25. Cuadro comparativo de metodología aplicada y metodología propuesta.

Criterio	Método actual (SM 3112B)	Método propuesto (EPA 7473)
Tamaño de la muestra	1,5 g	0,5 g
Tipo de muestra	Líquidos y sólidos	Líquido, sólido y gas
Control del inventario	Control parcial del inventario	Sistema de control de inventario más estricto
Pretratamientos de la muestra	Requiere pretratamientos con ácidos inorgánicos tóxicos.	No requiere pretratamiento de las muestras
Uso de reactivo peligrosos	Si	No
Mantenimiento continuo de equipos	Lo requiere, pero no se hace continuamente	Para lograr un proceso continuamente óptimo, es importante hacer el mantenimiento del equipo, sin embargo, al ser un equipo nuevo, traería una calibración de fábrica
Control en la clasificación de residuos	Se realiza parcialmente	Se realizaría en base a un sistema de gestión, de forma estricta y adecuada.
Señalización de espacio para el almacenamiento	Se realiza parcialmente	Se realizaría en base a un sistema de gestión, de forma estricta y adecuada.
Acondicionamiento de espacio de almacenamiento de residuos	Se realiza parcialmente	Se realizaría en base a un sistema de gestión, de forma estricta y adecuada.
Tiempos de análisis	4h	5 min
Consumo energético	Alto consumo energético 240 v	Bajo consumo energético 110 – 230 v
Rentabilidad económica	Se dispone actualmente del equipo, pero el gasto de reactivos para el pretratamiento de la muestra	Tendría que hacerse una inversión inicial con la adquisición del equipo, pero, en adelante los análisis requerirían más facilidad y bajos costos.

Criterio	Método actual (SM 3112B)	Método propuesto (EPA 7473)
	hace que el método no tenga una buena rentabilidad.	
Generación de residuos	Alta generación de residuos. (2,18 L) por muestra analizada. Residuos producto de pretratamiento y análisis de muestra, blancos de verificación, y duplicado.	Al miniaturizar y eliminar el pretratamiento de la muestra, también se generan menos residuos
Huella de carbono	Alta huella de carbono (considerable generación de volúmenes de muestras contaminadas con metales pesados).	Baja huella de carbono (disminución de volúmenes generados contaminados con metales, no requiere pretratamiento de la muestra)

5. Conclusiones

La recolección de la información sirvió como punto de partida para la realización del diagnóstico del impacto ambiental generado por el método de interés (determinación de mercurio) en el laboratorio caso de estudio encontrando que se hace un control y manejo de residuos de forma parcial, no se realiza la actualización de la plataforma donde se hace el control de inventario, se determina el uso de reactivos tóxicos y alta generación de volumen de residuos contaminados con metales en el proceso analítico. Por tanto, se hizo necesario proponer la implementación de una estrategia basado en principios de química verde, adquisición de un equipo nuevo y sustitución de método actual (SM3112B) por el propuesto (EPA 7473) con la finalidad de mitigar los impactos en mención. La evaluación del verdor asociado al método analítico (Determinación de mercurio en matrices ambientales por absorción atómica), por medio del análisis multicriterio (RGB, TOPSIS, HEXAGON) arrojó información más precisa y completa de los impactos ambientales generados. Aun considerando la simplicidad, del método TOPSIS, además de los resultados de similitud con soluciones ideales, a criterio del autor se eligen los métodos HEXAGON y RGB puesto que ambos complementan una evaluación completa y detallada de criterios (analíticos, ambientales, económicos) y con el método HEXAGON es posible presentar los resultados de una manera simple y vistosa mediante un pictograma.

Finalmente, la estrategia a implementar, método analítico basado en la norma EPA 7473 - Mercurio en sólidos y soluciones por descomposición térmica, amalgamación y espectrofotometría de absorción atómica, implica la alternativa de adquisición de un nuevo equipo para realizar los análisis correspondientes, además el nuevo método influenciaría positivamente en el verdor, disminuiría la huella de carbono que actualmente es ocasionada por la generación de considerables

volúmenes de muestras contaminadas con metales pesados, miniaturización de la muestra y eliminación de etapas de pretratamientos de muestra, además del consumo energético y rentabilidad económica.

6. Recomendaciones

Entre las problemáticas asociadas al método propuesto EPA 7473 (Mercurio en sólidos y soluciones por descomposición térmica, amalgamación y espectrofotometría de absorción atómica) del presente estudio, se encuentra el hecho de requerirse una inversión económica y/o un costo elevado para el grupo de investigación caso de estudio GAIA. Por tanto, como posible alternativa a esta propuesta se sugiere aplicar alternativas propias de la química verde para el análisis de mercurio en matrices ambientales:

- Disminuir o miniaturizar el tamaño de muestra actualmente utilizado en el método 3112B, ya que es considerable.
- Disminución de cantidad de reactivos usados conservando proporciones analíticas o en su efecto sustitución de reactivos tóxicos por unos más amigables con el medio ambiente.
- De acuerdo con reportes en la literatura el método de determinación de mercurio no solo se limita a descomposición térmica, alternativamente, otros sistemas de introducción de vapor de mercurio como la generación de vapor frío de mercurio pueden ser apropiados, se pueden aplicar otros aparatos de introducción de muestra siempre y cuando se conserve la calidad analítica.
- El analizador automático de mercurio DMA 80 es el equipo propuesto a usar como método nuevo en el presente documento. Sin embargo, otros instrumentos basados en principios similares también pueden ser apropiados.
- La prevención de la contaminación comprende cualquier técnica que reduzca o elimine la cantidad y/o toxicidad de los residuos en el punto de generación (proceso analítico). La EPA ha establecido una jerarquía preferida de técnicas de gestión ambiental que sitúa la prevención de la contaminación como la gestión opción de primera elección. Siempre que sea factible, el personal de laboratorio debe utilizar métodos de prevención de la contaminación y sus respectivas técnicas

para abordar la generación de residuos. Cuando los desechos no pueden reducirse de manera factible en la fuente, la agencia recomienda reciclar como la siguiente mejor opción.

Referencias Bibliográficas

A. Ballester-Caudet, P. Campíns-Falcó, B. Pérez, R. Sancho, M. Lorente, G. Sastre, C. González, A new tool for evaluating and/or selecting analytical methods: summarizing the information in a hexagon, *Trends Anal. Chem.* 118 (2019) 538e547.

Aenishaenslin, Cécile & Hongoh, Valerie & Cissé, Hassane & Hoen, Anne & Samoura, Karim & Michel, Pascal & Waaub, Jean-Philippe & Bélanger, Denise. (2013). Multi-criteria decision analysis as an innovative approach to managing zoonoses: Results from a study on Lyme disease in Canada. *BMC public health.* 13. 897. 10.1186/1471-2458-13-897.

Aires, C., & Pimenta, H. (2020). Prácticas ambientales en laboratorios químicos universitarios: una revisión sistemática de la literatura. *Investigación, sociedad y desarrollo*, 9(8), e378985490. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i8.5490>

Aleksander M. Astel, Katarzyna Bigus, Krystian Obolewski, Katarzyna Glińska-Lewczuk, Spatiotemporal assessment of water chemistry in intermittently open/closed coastal lakes of Southern Baltic, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Volume 182, Part A, 2016, Pages 47-59, ISSN 0272-7714, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2016.09.010>.

Álvarez, R., Garma-Quen, P., & León-Reyes, W. (2020). Manejo de residuos peligrosos biológicos e infecciosos en una escuela de química de nivel superior RPBI Management at High School of Chemical Gestão de resíduos perigosos biológicos e infecciosos em uma escola de química de nível superior. *Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*. Consultado el 17 de agosto de 2022, de <https://www.ride.org.mx/index.php/RIDE/article/view/651>.

Armenta, S., Garrigues, S., Esteve-Turrillas, F., & de la Guardia, M. (2019). Green extraction techniques in green analytical chemistry. *Trends In Analytical Chemistry*, (116), 248 - 253. Retrieved 19 August 2022, from <https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.03.016>.

Ballester-Caudet, A., Navarro-Utiel, R., Campos-Hernández, I., & Campíns-Falcó, P. (2022). Evaluación de la influencia del tratamiento de muestras en la evaluación verde y sostenible de los métodos de cromatografía líquida mediante la herramienta HEXAGON: Determinación de colorantes a base de sulfonato en muestras de carne. *Química Analítica Verde*, 3, 100024.

<https://doi.org/10.1016/j.greeac.2022.100024>

Benavides, A., Vargas-González, X., Mora-Aparicio, C., Vega-Gúzman, I., & Valdéz-Díaz, S. (2015). Gestión de reactivos y desechos químicos en los laboratorios de docencia de la Cátedra de Química Orgánica en la Escuela de Química. *Chemical Reagent and Residue Management at The Teaching Laboratories of The Organic Chemistry Department in The Chemistry School, Universidad Nacional*. *Revista Universidad en Diálogo*, 5(2), 229-250.

Benítez B, R., Ruiz G, D., Obando M, M., Miranda, C., & Gil M, J. (2013). Gestión integral de residuos químicos generados en los laboratorios de docencia en química de la Universidad del Cauca. *Gestión Integral de Residuos Químicos en Laboratorios Docentes de Química de la Universidad del Cauca*. *Ciencia en Desarrollo*, 63 - 72. Consultado el 17 de agosto de 2022, de.

Berrio, L., Beltrán, O., Agudelo, E., & Cardona, S. (2012). Sistemas de tratamiento para residuos líquidos generados en laboratorios de análisis químico. *Treatment systems for liquid wastes generated in chemical analysis laboratories*. *Gestión Y Ambiente*, 15(3). doi: 10.15446/ga

Bolaños, J. (2012). Protocolo para la gestión verde en laboratorios de química con fines académicos. *Pensamiento Actual*. Universidad De Costa Rica., 12(18-19), 47-58.

Bystrzanowska, M., & Tobiszewski, M. (2020). Chemometrics for Selection, Prediction, and Classification of Sustainable Solutions for Green Chemistry—A Review. *Symmetry*, 12(12), 2055. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/sym12122055>

Cardona Gallo, M. (2007). Minimización de Residuos: una política de gestión ambiental empresarial. *Waste minimization: An environmental management corporative policy*. *Producción + Limpia*, 1(2), 47-52.

Chemat, Farid; Guardia, Miguel de la (2019). Resumen editorial: Química analítica verde. *Opinión actual en química verde y sostenible*, 19(), A1–A2. doi:10.1016/j.cogsc.2019.08.008.

Cordina, A (2011). Deficiencias en el uso del FODA, causas y sugerencias. *Revista de ciencias estratégicas*. Vol 1. N° 25. Medellín, Colombia.

DECRETO 1076 DE 2015. Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.

De La Guardia, M. Garrigues, S. (2011) An ethical commitment and an economic opportunity. In: de la Guardia M, Garrigues S (eds). *Challenges in green analytical chemistry*. Royal Society of Chemistry, pp 1–12

El-Kafrawy, D., Abo-Gharam, A., Abdel-Khalek, M., & Belal, T. (2022). Métodos cromatográficos ecológicos para la estimación concurrente de Montelukast y Bambuterol con su sustancia relacionada con la farmacopea Terbutalina: Evaluación del verdor utilizando métricas analíticas Eco-scale, GAPI y AGREE. *Revista Microquímica*, 176, 107236.

<https://doi.org/10.1016/j.microc.2022.107236>

Estrada, J., & Villanueva, C. (2015). Tratamiento de residuos peligrosos generados en laboratorios químicos *Generated hazardous waste treatment chemicals in laboratories*. *Rev. Del Instituto De Investigación (RIIGEO), FIGMMG-UNMSM*, 18(35), 135-138.

Fabjanowicz, Magdalena & Bystrzanowska, Marta & Namieśnik, Jacek & Tobiszewski, Marek & Płotka-Wasyłka, Justyna. (2018). An analytical hierarchy process for selection of the optimal procedure for resveratrol determination in wine samples. *Microchemical Journal*. 142. 10.1016/j.microc.2018.06.028.

Freitas Matos, M., Espanhol-Soares, M., Kondo, M., & Apolinário da Silva, M. (2020). Avances en el tratamiento de residuos químicos generados por la Universidad Federal de Itajubá (UNIFEI) y posibles medidas de mitigación. *Investigación, sociedad y desarrollo*, 1-16. Consultado el 18 de agosto de 2022, de <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i2.2164>.

Güzel, B., & Canlı, O. (2022). Un método analítico estable y respetuoso con el medio ambiente para la determinación de bifenilos policlorados (PCB) indicadores en muestras de aceites sólidos y residuales mediante cromatografía de gases-detector de captura de electrones (GC-ECD). *Revista Microquímica*, 178, 107325. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2022.107325>

Herrera, C., Bernal Higuera, F., & Valbuena Duarte, S. (2015). Manual para el manejo sostenible de los Residuos Peligrosos en Laboratorios de Química [Ebook] (1st ed., pp. 17-20). Editorial Universitaria de la Costa EDUCOSTA.

Hoffman, K. C., & Dicks, A. P. (2020). Cambiando el paradigma de la educación química al ecologizar el laboratorio de la escuela secundaria. *Química y Farmacia Sostenibles*, 16, 100242. doi:10.1016/j.scp.2020.100242

In: Leal Filho W., Frankenberger F., Iglecias P., Mülfarth R. (eds) Towards Green Campus Operations. World Sustainability Series. Springer, Cham

Jurjeva, J., & Koel, M. (2022). Implementing greening into design in analytical chemistry. *Talanta Open*, (6), 100136. <https://doi.org/10.1016/j.talo.2022.100136>.

Kannaiah, K. P., Sugumaran, A., Chanduluru, H. K. y Rathinam, S. (2021). Impacto ambiental de las herramientas de evaluación del verdor en cromatografía líquida – Una revisión. *Revista Microquímica*, 170, 106685. doi:10.1016/j.microc.2021.106685

La Química Verde y la problemática de los residuos químicos de los laboratorios. (2006), 2(2), 131-146. <https://doi.org/0121-7488>

Leiton Rodriguez, N., & Revelo Maya, W. (2017). Gestión integral de residuos sólidos en la empresa Cyrgo SAS. *Tendencias*, 18(2), 103. doi:10.22267/rtend.171802.79

Lemos P.F.I., e Silva A.C.C.F.A., Moro C.C. (2018) Environmental Governance of Solid Waste in USP Campuses: The University as a Laboratory for Environmental Public Policies.

Marco Cinelli, Stuart R. Coles, Mallikarjuna N. Nadagouda, Jerzy Błaszczyński, Roman Słowiński, Rajender S. Varma, Kerry Kirwan, Robustness analysis of a green chemistry-based model for the classification of silver nanoparticles synthesis processes, *Journal of Cleaner Production*. Volume 162, 2017, Pages 938-948, ISSN 0959 6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.113>.

Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. Decreto número 4741 (2005). Bogotá.

Ministerio de agricultura. Decreto 1594 de 1984 (1984). Bogotá.

Mohamed, D., & Fouad, M. M. (2020). Application of NEMI, Analytical Eco-Scale and GAPI tools for greenness assessment of three developed chromatographic methods for quantification of sulfadiazine and trimethoprim in bovine meat and chicken muscles: Comparison to greenness profile of reported HPLC methods. *Microchemical Journal*, 157, 104873.

<https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.104873>

Montero Miranda, E., & Ríos Badilla, E. (2020). Gestión de residuos químicos en la Universidad Estatal a Distancia: abordajes desde la Regencia Química. *Repertorio Científico*, 12-18.

Consultado el 17 de agosto de 2022, desde

<http://file:///D:/Users/Laura/Desktop/REQUISITOS%20GRADO%20UDEA/TRABAJO%20DE%20GRADO/REFERENCIAS%20BIBLIOGRAFICAS/art%203%20residuos%20laboratorios%202020.pdf>.

Molina-Díaz, A., Beneito-Cambra, M., Moreno-González, D., & Gilbert-López, B.

(2019). Espectrometría de Masas Ambiental desde el punto de vista de la Química Analítica

Verde. Opinión actual en química verde y sostenible. doi:10.1016/j.cogsc.2019.05.005

Mora, J., & Benavides, D. (2011). Clasificación de residuos químicos en laboratorios de la

Universidad Nacional Classification of Chemical Residues in laboratories of the Universidad

Nacional. *Ciencias Ambientales*, 61-69. Consultado el 17 de agosto de 2022, desde

<http://www.revistas.una.ac.cr/ambientales>.

Namieśnik, J., 2001. Green analytical chemistry - Some remarks. *Journal of Separation Science*, 24(2), pp.151-153. doi:10.1002/1615-9314(20010201)24:2<151::aid-jssc151>3.0.co;2-4

PANREAC Manual De Seguridad En Laboratorios Químicos. Barcelona, España: Polígono Pla de la Bruguera (2020), pp.47-51.

Pacheco-Fernández, I., & Pino, V. (2019). Disolventes verdes en química analítica. Opinión actual en química verde y sostenible. doi:10.1016/j.cogsc.2018.12.010

Paweł Mateusz Nowak, Paweł Kościelniak, Marek Tobiszewski, Ana Ballester-Caudet, Pilar Campíns-Falcó, Overview of the three multicriteria approaches applied to a global assessment of analytical methods, *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, Volume 133, 2020, 116065, ISSN 0165-9936, <https://doi.org/10.1016/j.trac.2020.116065>.

Phan, C. Gallardo, J. Mane, Green MOTION: a new and easy to use green chemistry metric from laboratories to industry, *Green Chem.* 17 (2015) 2846e2852

Plotka-Wasyłka, J. (2018). A new tool for the evaluation of the analytical procedure: Green Analytical Procedure Index. *Talanta*, 181, 204-209. doi: 10.1016/j.talanta.2018.01.013

Raccary, B., Loubet, P., Peres, C., & Sonnemann, G. (2022). Evaluación de los impactos ambientales de los métodos de química analítica: De una revisión crítica hacia una propuesta

utilizando un enfoque de ciclo de vida. *Trac Trends In Analytical Chemistry*, 147, 116525.

<https://doi.org/10.1016/j.trac.2022.116525>

Ramírez Lara, E., De la Rosa, J., Ramírez Castillo, A., Cerino-Córdova, F., López Chuken, U., Fernández Delgadillo, S., & Rivas-García, P. (2017). A comprehensive hazardous waste management program in a Chemistry School at a Mexican university. *Journal Of Cleaner Production*, 142, 1486-1491. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.158>

Raynie D, Driver J (2009) Green assessment of chemical methods. In: 13th annual green chemistry and engineering conference, p 34

Rodríguez, B. (2019). Enseñanza de la química sostenible en las carreras de ingeniería Teaching sustainable chemistry in engineering careers. *Revista De Química PUCP*, 32(1), 13-17.

Serna L., Sebastian; Carvajal O., Juan Camilo; Aristizábal M., Valentina; Cardona A., Carlos Ariel. (2015). Evaluación tecno-económica y ambiental de la producción de acetato de etilo por vía química y biológica. *Revista de la Facultad de Ciencias Químicas*. ISSN: 1390-1869. N° 13.

Sheldon, R., Bode, M., & Akakios, S. (2022). Métricas de química verde: Minimización de residuos. *Opinión actual en química verde y sostenible*, 33, 100569.

<https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2021.100569>

Subdirección ambiental, área metropolitana de Bucaramanga. (2020). Guía para elaboración y presentación del plan de gestión integral de residuos o desechos peligrosos-PGIRESPEL aplicado a micro generadores (pp. 1-8). Bucaramanga.

Tarín, A. Huici, M.X. Guardino, NTP 726: Clasificación y etiquetado de productos químicos: sistema mundialmente armonizado (GHS), Instituto nacional de higiene y seguridad en el trabajo, Spain, 2004. www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/

Tobiszewski, M., & Orłowski, A. (2015). Multicriteria decision analysis in ranking of analytical procedures for aldrin determination in water. *Journal of chromatography. A*, 1387, 116–122. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2015.02.009>

Tobiszewski, Marek. (2016). Metrics for green analytical chemistry. *Anal. Methods*. 8. 10.1039/C6AY00478D.

Tobiszewski M, Mechlinska A, Zygmunt B, Namieśnik J (2009) Green analytical chemistry in sample preparation for determination of trace organic pollutants. *TrAC Trends Anal Chem* 28(8):943–951.

Uv.es. 2020. Sistema De Recogidas. [En línea] disponible en: ww.uv.es/uvweb/servicio-prevencion-medio-ambiente/es/medio-ambiente/area-medioambiente/residuos-laboratorio/sistema-recogidas-1285902695195.html [Acceso 2 marzo 2020]. (Acceso 2 marzo 2020)

Valencillos, Y. (2021). Química para el medio ambiente proyecto: Investigaciones aplicadas desde el aula de clase para publicaciones. Revista facultad de ingeniería UVM, 15 (1).

V. Mazzaracchio, A. Sassolini, K.Y. Mitra et al. (2022). A fully-printed electrochemical platform for assisted colorimetric detection of phosphate in saliva: Greenness and whiteness quantification by the AGREE and RGB tools. Green Analytical Chemistry, Volume 1, 2022100006, ISSN 2772-5774. <https://doi.org/10.1016/j.greeac.2022.100006>.

Wojnowski, W., Tobiszewski, M., Pena-Pereira, F., & Psillakis, E. (2022). AGREEprep – Métrica de verdor analítico para la preparación de muestras. Trac Trends In Analytical Chemistry, 149, 116553. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2022.116553>

Workman, P. S. (2019). Uso de la química verde para introducir la investigación. Integración de los principios de la química verde y sostenible en la educación, 49–83. doi:10.1016/b978-0-12-817418-0.00003-6

Anexos