

**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE GENERACIÓN Y DISEÑO DE PROPUESTA
PARA EL MANEJO DE RESIDUOS PELIGROSOS EN LA SUBDIRECCIÓN DEL
LABORATORIO ADUANERO DE LA DIRECCIÓN DE IMPUESTOS Y ADUANAS
NACIONALES - U.A.E DIAN**

VALENTINA FERNANDA ORTIZ MORENO

**Informe de pasantía para optar al título de
INGENIERA QUÍMICA**

Directora

Myriam Josefina Rincón Torres

Ingeniera Química

Codirectora

Valentina Aristizábal Echeverry

Ingeniera Química

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.**

2024

NOTA DE ACEPTACIÓN

Myriam Josefina Rincón Torres
Firma de la Directora

Diana Cuesta Parra
Firma de la Jurado

Valentina Aristizábal Echeverry
Firma de la Codirectora

Ivonne Ángulo de Castro
Firma de la Jurado

Bogotá D.C., enero de 2024

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García - Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García - Peña

Vicerrectora Académica

Dra. María Fernanda Vega de Mendoza

Vicerrectora de Investigaciones y Extensión

Dra. Susan Margarita Benavides Trujillo

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Ing. José Luis Macías Rodríguez

Decana de la Facultad

Ing. Naliny Patricia Guerra Prieto

Directora del Programa

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a la autora.

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a la memoria de Killar, mi fiel compañero, que ya no está físicamente a mi lado, pero siempre estará en mi corazón. Su recuerdo vivirá a través de mí y de todo lo que logre en mi vida profesional. Su partida dejó un vacío en mi vida, pero también dejó una huella imborrable de amor y lealtad.

Killar fue más que solo una mascota, fue mi amigo incondicional. Siempre estaba ahí para mí, brindándome su compañía tanto en los momentos buenos, como en los malos. Durante la mayor parte de mi vida académica, su presencia y apoyo fueron fundamentales. Cada día de estudios y de tramos, él estuvo a mi lado, y a pesar de que no pudo acompañarme hasta esta etapa de mi carrera, me dio fuerza y motivación cuando más lo necesitaba.

Estaré eternamente agradecida de que hubiera sido mi perro y mi amigo. Siempre lo extrañaré y lo llevaré conmigo a donde quiera que vaya.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, le agradezco a la Universidad de América y a cada uno de sus docentes por los valiosos conocimientos y la formación profesional que he recibido a lo largo de mi carrera. Ha sido un privilegio estudiar en esta institución y ser parte de una comunidad académica tan enriquecedora.

Así mismo, agradezco a la U.A.E DIAN por permitirme desarrollar mis pasantías en la Subdirección del Laboratorio Aduanero. Ha sido una experiencia invaluable que ha contribuido significativamente a mi crecimiento profesional y personal.

También, agradezco a Myriam Josefina Rincón Torres y a Valentina Aristizábal Echeverry por su orientación, apoyo y dedicación durante el desarrollo de mi tesis. Sus aportes han sido fundamentales para el éxito de este trabajo.

Finalmente, agradezco a Omar Andrés Pinzón Rodríguez por su constante apoyo en el desarrollo teórico y experimental de este trabajo. Sus conocimientos y experiencia fueron de gran ayuda en la ejecución de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	11
INTRODUCCIÓN	12
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
1.1 Antecedentes	15
1.2 Formulación del problema de investigación	17
<i>1.2.1 Pregunta principal de investigación</i>	18
<i>1.2.2 Preguntas específicas de investigación</i>	18
1.3 Justificación	19
1.4 Hipótesis	20
1.5 Objetivos	20
<i>1.5.1 Objetivo general</i>	20
<i>1.5.2 Objetivos específicos</i>	21
1.6 Alcance	21
2. MARCO REFERENCIAL	23
2.1 Marco teórico	23
<i>2.1.1 Residuos peligrosos (RESPEL)</i>	23
<i>2.1.2 PGIRESPEL</i>	45
<i>2.1.3 Espectrometría de absorción atómica por atomización de llama</i>	47
2.2 Marco legal	48
<i>2.2.1 Ley 99 de 1993</i>	48
<i>2.2.2 Decreto 1076 de 2015</i>	48
<i>2.2.3 Resolución 0631 de 2015</i>	48
<i>2.2.4 Resolución 1486 de 2017</i>	49
<i>2.2.5 Resolución 909 de 2008</i>	49
3. METODOLOGÍA	50
3.1 Plan de acción	50
<i>3.1.1 Diagnóstico y clasificación de los residuos peligrosos</i>	50

3.1.2 <i>Procedimiento de determinación de micronutrientes por espectrometría de absorción atómica por atomización de llama utilizando curvas de calibración preparadas con soluciones multielementales</i>	51
3.1.3 <i>Aprovechamiento de los residuos peligrosos</i>	57
3.1.4 <i>Capacitación y divulgación</i>	57
3.1.5 <i>Monitoreo y mejora continua</i>	57
3.1.6 <i>Cronograma de actividades</i>	58
4. RESULTADOS	60
4.1 Plan de acción	60
4.1.1 <i>Diagnóstico y clasificación de los residuos peligrosos</i>	60
4.1.2 <i>Procedimiento de determinación de micronutrientes por espectrometría de absorción atómica por atomización de llama utilizando curvas de calibración preparadas con soluciones multielementales</i>	62
4.1.3 <i>Aprovechamiento de los residuos peligrosos</i>	65
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	68
5.1 Plan de acción	68
5.1.1 <i>Diagnóstico y clasificación de los residuos peligrosos</i>	68
5.1.2 <i>Procedimiento de determinación de micronutrientes por espectrometría de absorción atómica por atomización de llama utilizando curvas de calibración preparadas con soluciones elementales</i>	69
5.1.3 <i>Procedimiento de determinación de micronutrientes por espectrometría de absorción atómica por atomización de llama utilizando curvas de calibración preparadas con soluciones multielementales</i>	72
5.1.4 <i>Capacitación y divulgación</i>	79
5.1.5 <i>Monitoreo y mejora continua</i>	80
5.1.6 <i>Aprovechamiento de los residuos peligrosos</i>	80
6. CONCLUSIONES	84
REFERENCIAS	85

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Organigrama actual de la U.A.E DIAN	13
Figura 2. Pirámide de proceso jerárquico para la gestión de residuos	46
Figura 3. Diagrama esquemático de un espectrómetro de absorción atómica	47
Figura 4. Diagrama de flujo de la preparación de la muestra	54
Figura 5. Cronograma de actividades para el desarrollo del plan de acción para la disminución de los residuos peligrosos en la Subdirección del Laboratorio Aduanero de la U.A.E DIAN	59
Figura 6. Curva de calibración para el Manganeseo (Mn)	64
Figura 7. Curva de calibración para el Hierro (Fe)	65
Figura 8. Residuos generados de ácido clorhídrico en el periodo de tiempo establecido (enero de 2021 - septiembre de 2023)	68
Figura 9. Comparación de los residuos producidos en el desarrollo de ambos métodos	75
Figura 10. Diagrama de flujo del proceso de intercambio iónico	83
Figura 11. Acta de entrega de residuos 001-2021 del contrato 00-102-2021	91
Figura 12. Acta de entrega de residuos 001-2022 del contrato 00-125-2022	92
Figura 13. Acta de entrega de residuos 001-2023 del contrato 00-126-2023	93

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Pictogramas de peligrosidad	23
Tabla 2. Categoría Y - Residuos o desechos peligrosos por procesos o actividades	33
Tabla 3. Lista A - Residuos o desechos peligrosos por corrientes de residuos	36
Tabla 4. Condiciones de digestión para el método de ensayo	53
Tabla 5. Intervalos de concentración de cada elemento	55
Tabla 6. Masas para la preparación de las curvas de calibración	55
Tabla 7. Condiciones del método de corrida en el equipo ContrAA 800	56
Tabla 8. Residuos peligrosos provenientes de análisis muestral de laboratorio	60
Tabla 9. Resultados de comparación de respuesta instrumental	63
Tabla 10. Residuos del periodo evaluado (enero de 2021 - septiembre de 2023) con su respectivo tratamiento y disposición final	66
Tabla 11. Masas para la preparación de las curvas de calibración con soluciones elementales de Hierro (Fe)	70
Tabla 12. Masas para la preparación de las curvas de calibración con soluciones elementales de Manganeso (Mn)	71
Tabla 13. Consumo de reactivo	72
Tabla 14. Masas para la preparación de las curvas de calibración con soluciones multielementales de hierro (Fe) y manganeso (Mn)	74
Tabla 15. Masas para la preparación de las curvas de calibración con soluciones multielementales de hierro (Fe) y manganeso (Mn)	74
Tabla 16. Sesgos relativos y absolutos de las absorbancias determinadas por medio de soluciones elementales y multielementales	77

RESUMEN

Dentro de la pasantía realizada en la Subdirección del Laboratorio Aduanero de la U.A.E DIAN, se desarrolló un plan de acción con el objetivo de disminuir los residuos peligrosos de ácido clorhídrico contaminado con trazas metálicas, mediante el procedimiento de determinación de micronutrientes por medio de curvas de calibración preparadas con soluciones multielementales, los cuales fueron generados en el análisis fisicoquímico de espectrometría de absorción atómica por atomización llama. Posteriormente se definió el proceso de intercambio iónico como alternativa para purificar el ácido clorhídrico, con la finalidad de utilizarlo nuevamente en el lavado de material de laboratorio para limpiar los rastros metálicos que pudieron permanecer en este.

Palabras clave: Residuos peligrosos, ácido clorhídrico, espectrometría de absorción atómica, micronutrientes, curvas multielementales, trazas metálicas, intercambio iónico.

INTRODUCCIÓN

La Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales (U.A.E DIAN) es una entidad vinculada al Ministerio de Hacienda y Crédito Público de Colombia [1]. Esta fue creada con el objetivo de garantizar la seguridad fiscal del Estado colombiano y proteger el orden público económico nacional [2]. Así mismo, su función principal es administrar y controlar el cumplimiento de las obligaciones tributarias, aduaneras y cambiarias, además de facilitar las operaciones de comercio exterior en condiciones de equidad, transparencia y legalidad [2].

El 1 de junio de 1993, la Dirección de Impuestos Nacionales (DIN) se asoció con la Dirección de Aduanas Nacionales (DAN) para formar una entidad unificada encargada de la gestión aduanera y tributaria del país (DIAN) [3]. Posteriormente, la DIAN se constituyó como una Unidad Administrativa Especial mediante el Decreto 2117 de 1992 [3].

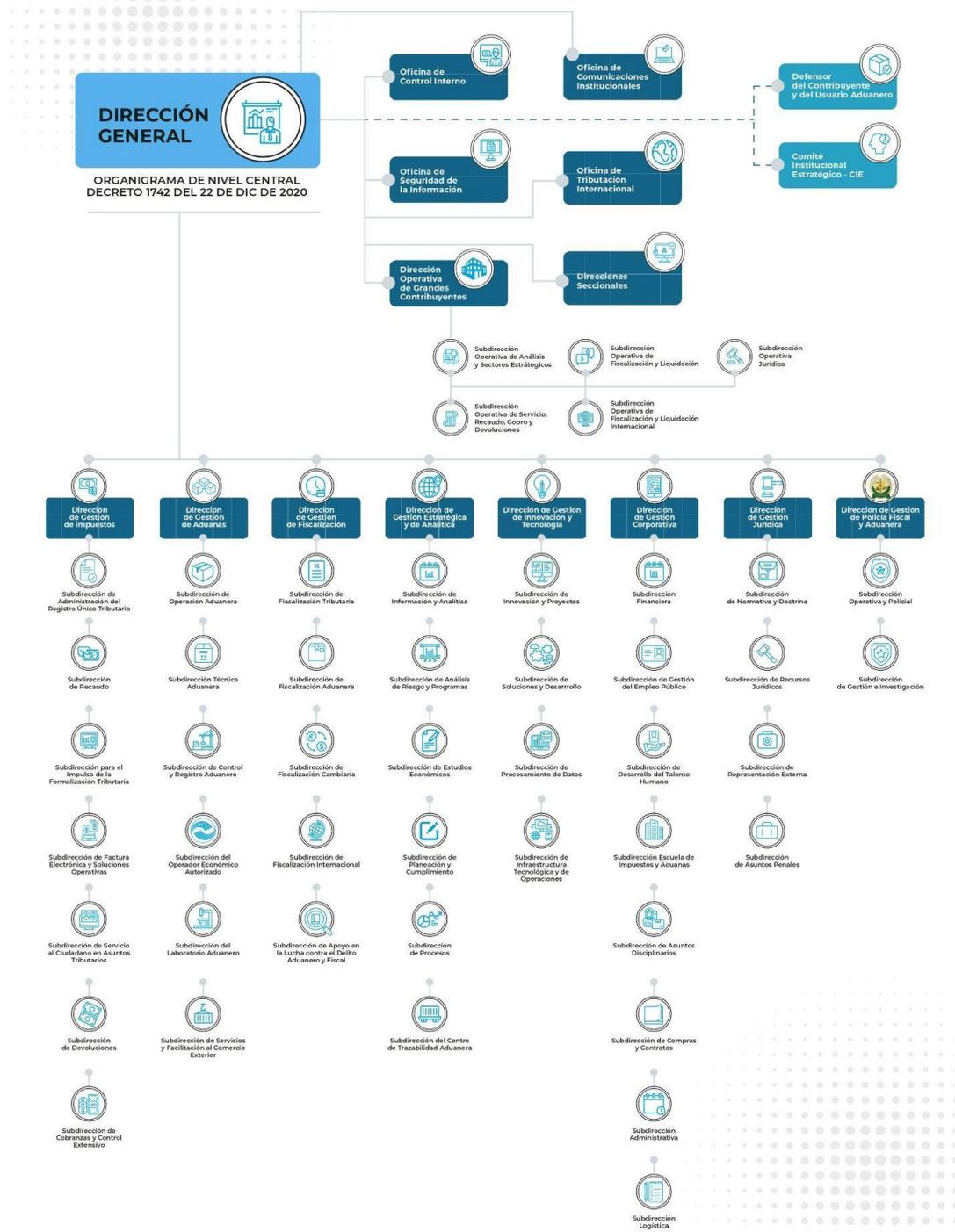
A lo largo de la historia, la DIAN ha experimentado cambios y reestructuraciones para adaptarse a las necesidades y retos del entorno tanto económico, como fiscal [3]. Estas reestructuraciones han buscado mejorar la eficiencia y la calidad de los servicios que brinda la entidad.

En la actualidad, el representante legal de la entidad es el Director General Luis Carlos Reyes, quien puede delegar sus funciones de acuerdo con las normas legales vigentes [2]; y quien fue designado por el Presidente de la República Gustavo Petro Urrego [2].

También es importante mencionar que la Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales U.A.E DIAN está organizada en diferentes oficinas, la defensoría del contribuyente y del usuario aduanero, el comité institucional estratégico, la dirección de grandes contribuyentes y las direcciones seccionales y de gestión, que a su vez se estructuran en diferentes subdirecciones [2] como se evidencia en el organigrama presentado en la *figura 1*. Cada una de estas tiene responsabilidades específicas en cuanto a la administración y el control de los impuestos, así como la gestión tributaria y aduanera del país [2].

Figura 1.

Organigrama actual de la U.A.E DIAN



Nota. La figura muestra el organigrama de la U.A.E DIAN. Tomada de: Organigrama de la U.A.E DIAN. (2022). Disponible en: <https://www.dian.gov.co/dian/entidad/Paginas/Organigrama.aspx>.

En la Dirección de Gestión de Aduanas se encuentra ubicada la Subdirección del Laboratorio Aduanero, lugar donde se llevó a cabo el desarrollo de la presente pasantía como opción de trabajo de grado. En este laboratorio se realizan diferentes actividades relacionadas con el análisis y la evaluación de las mercancías que ingresan al país. Las mencionadas actividades y/o funciones se encuentran estipuladas en el Artículo 26 del Decreto 1742 de 2020 [5], entre estas se destacan apoyar los procedimientos relacionados con el análisis técnico y científico de muestras de productos enviadas por diferentes áreas de la entidad para verificar el cumplimiento de la legislación aduanera y tributaria [5], organizar las actividades que impliquen la realización de los análisis técnico-científicos de muestras, con el objetivo de validar el cumplimiento de la normatividad aduanera, para asegurar así el control y la trazabilidad de las mencionadas muestras [5], ejecutar nuevas metodologías que permitan calificar las muestras de mercancías recibidas en el laboratorio [5] y coordinar la disposición final que se le debe otorgar a las muestras, remanentes y residuos de análisis, teniendo en cuenta la normatividad ambiental [5], entre otras.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Antecedentes

Actualmente el manejo de residuos en la U.A.E DIAN (Unidad Administrativa Especial de la Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales) se rige por las normativas y regulaciones establecidas por las autoridades ambientales competentes en el país [2]. La DIAN al ser una entidad pública, tiene la responsabilidad de cumplir con las disposiciones legales relacionadas con el manejo adecuado de residuos tales como la Ley 99 de 1993, el Decreto 1076 de 2015, la Resolución 0631 de 2015, la Resolución 1486 de 2017 y la Resolución 909 de 2008, las cuales se profundizan en el marco legal del presente proyecto [2].

Por otro lado, es importante mencionar que no existe un documento publicado de acuerdo con los antecedentes específicos sobre el manejo de residuos peligrosos en la DIAN, puesto que la entidad cuenta con sus propias políticas internas y procedimientos para dicho manejo, basados en las regulaciones y normativas ambientales en el país [5].

Sin embargo, para el desarrollo del presente proyecto se tiene en cuenta la revisión bibliográfica presentada a continuación por medio de diversos materiales investigativos, tanto nacionales, como internacionales, donde diversas entidades o autores proporcionan información sobre el manejo de los residuos peligrosos, así como la implementación de planes de gestión ambiental para diversas entidades, empresas y/o laboratorios tanto públicos, como privados.

En Colombia, el manejo adecuado de los residuos peligrosos es un tema de gran importancia para proteger la salud humana y el medio ambiente. En 2005, el Ministerio de Ambiente (Minambiente) anunció la Política ambiental para la gestión integral de residuos o desechos peligrosos en Colombia [6]. El objetivo de la política es prevenir la generación de residuos peligrosos y promover su manejo ambiental adecuado, con el fin de minimizar los riesgos para la salud humana y el ambiente [6].

Así mismo, en Colombia en el año 2017 se estableció el Informe Nacional de Residuos o Desechos Peligrosos, el cual proporciona información sobre la generación y manejo de residuos

peligrosos. Este informe fue elaborado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) [7]. La importancia de este informe radica en que proporciona información actualizada sobre la generación y manejo de residuos peligrosos en el país, lo cual es fundamental para la toma de decisiones en política pública y la formulación de estrategias de gestión ambiental. Además, contribuye al cumplimiento de compromisos ambientales internacionales, como el reporte anual de información técnica ante el Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación [7]. De igual forma, se establece la Guía Práctica para la Elaboración e Implementación de los Planes de Gestión Integral de Residuos en los Laboratorios, la cual proporciona información detallada sobre cómo gestionar adecuadamente los residuos en el ámbito laboral [8]. Además, contiene información sobre la identificación de los residuos, su clasificación, almacenamiento, transporte, tratamiento y disposición final. También se incluyen aspectos importantes como la capacitación del personal, la implementación de programas de seguridad industrial y de contingencia, así como la elaboración de informes y registros [8].

Adicionalmente, el Instituto Nacional de Salud de Colombia estableció el Manual de Gestión Integral de Residuos, como guía completa para la gestión adecuada de residuos en el ámbito de la salud ocupacional y ambiental. Este manual contiene información sobre el marco legal, objetivos, alcance y estrategias para una gestión efectiva de residuos. La importancia de este manual se aplica en la necesidad de una gestión adecuada de residuos en el ámbito de la salud, para proteger la salud ocupacional y ambiental de los trabajadores y la comunidad en general [9]. Paralelamente, en México se instauró el Informe de la Situación del Medio Ambiente, el cual se enfoca en los temas de los residuos y su impacto en la población y el ambiente. Con este, a través de la gestión integral de los residuos, se busca reducir su generación y lograr su adecuada disposición final, lo que a su vez puede disminuir la extracción de recursos, el uso de energía y agua, así como las emisiones de gases de efecto invernadero [10].

Finalmente, en respuesta a los desafíos actuales relacionados con los residuos peligrosos, el Ministerio de Ambiente llevó a cabo un proceso de actualización de la política y un plan de acción. Este documento de actualización de la Política ambiental para la gestión integral de residuos peligrosos y su plan de acción 2022-2030 fue aprobado el 21 de abril de 2022; en el cual

se establecen cinco objetivos específicos y prioriza 11 líneas estratégicas de trabajo, que se desglosan en 47 acciones en el mencionado Plan de acción 2022-2030 [6].

1.2 Formulación del problema de investigación

La Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales – U.A.E DIAN cuenta con una Subdirección de Laboratorio Aduanero, ubicada en Bogotá; ésta se divide en cuatro áreas específicas que son los laboratorios de metales, textiles, alimentos y orgánicos; allí se ejecutan diferentes actividades para realizar los análisis técnico – científicos de diversas muestras de mercancías que deben ser sometidas a un control aduanero y/o tributario, con el objetivo de verificar el cumplimiento de los requisitos técnicos que sean competencia de la mencionada entidad [5]. Las áreas del laboratorio aduanero de la DIAN generaron en el año 2021 una cantidad de residuos peligrosos provenientes de los análisis muestrales de aproximadamente 244 kg (*anexo 1*). Así mismo, en el año 2022 se produjo una cantidad de 371 kg de residuos (*anexo 2*) y en el año 2023, hasta el mes de septiembre se presentó una cantidad de 304 kg (*anexo 3*) de desechos peligrosos (cantidades de residuos estipuladas en las actas que dan cumplimiento a los contratos 00-102-2021, 00-125-2022 y 00-126-2023 respectivamente, que tienen por objeto de servicio la destrucción e incineración o disposición final de los residuos de laboratorio de la Subdirección del Laboratorio Aduanero); los cuales se entregaron a las empresas a las que se les adjudicó el contrato para la disposición final de los mencionados residuos en la vigencia del año de cada uno de estos contratos.

La entidad también cuenta con un plan de gestión integral para residuos peligrosos “Plan de Gestión integral de Residuos Peligrosos en los Laboratorios de Aduanas” – PGIRESPEL (CT-COA-0036) [5]. Sin embargo, este plan de gestión integral de residuos es utilizado para todas las seccionales de aduanas del país, sin tener en cuenta que la Subdirección del Laboratorio Aduanero de Bogotá es el laboratorio principal en la entidad, por lo tanto, recibe las mercancías que no pueden ser procesadas por las seccionales que no cuentan con un laboratorio o que no disponen de los recursos necesarios para realizar el análisis muestral; es por esto, que la cantidad de muestras y los análisis que se realizan es superior si se compara con los demás laboratorios. Adicionalmente, no se cuenta con un plan de aprovechamiento y/o disminución de los residuos producidos en los

distintos procesos físico - químicos que se llevan a cabo en las mencionadas áreas del laboratorio [5].

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, es necesario realizar una evaluación del proceso de generación de residuos peligrosos, con base en los históricos de datos de la cantidad de residuos producidos en las diferentes áreas del laboratorio aduanero desde enero del 2021, hasta septiembre de 2023. Todo esto con la finalidad de determinar la viabilidad y/o oportunidad de mejorar la productividad de los procesos, lograr un mejor aprovechamiento de los recursos y disminuir tanto los residuos, como los costos operativos para las áreas mencionadas con sus respectivos procesos o técnicas de análisis empleadas que generen residuos (cromatografía, volumetría, gravimetría, destilación, técnicas espectroscópicas, calorimetría, termogravimetría, espectrometría, reometría, técnicas bromatológicas, viscosimetría, polarimetría, determinación de densidad, entre otras) [5]. Además de identificar si se le puede proporcionar un segundo uso a estos residuos peligrosos.

En caso de no ejecutar la mencionada evaluación del proceso de generación de residuos, la Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales podría generar mayor cantidad de costos operativos, así como un incremento en la cantidad de residuos peligrosos producidos, ocasionando así un aumento del impacto ambiental negativo en la contaminación del suelo, el aire, el agua y la biodiversidad durante la disposición final de dichos residuos.

1.2.1 Pregunta principal de investigación

¿Qué tipo de procedimiento experimental se puede implementar en la Subdirección del Laboratorio Aduanero para la disminución de residuos peligrosos generados en los procesos analíticos llevados a cabo por el mismo, que permita que la U.A.E. DIAN logre un mejor aprovechamiento de los recursos y una disminución tanto de los residuos peligrosos, como de los costos operativos?

1.2.2 Preguntas específicas de investigación

¿Cuál es el área específica de la Subdirección del Laboratorio Aduanero de la U.A.E DIAN, que más residuos peligrosos generó en el periodo establecido de enero de 2021 a septiembre de 2023?

¿Cuál es el proceso analítico en el que se produce mayor cantidad de residuos peligrosos en el Laboratorio Aduanero para el periodo establecido de enero de 2021 a septiembre de 2023?

¿Qué acciones o cambios se pueden ejecutar para disminuir los residuos peligrosos del proceso analítico en el que se genera la mayor cantidad de éstos?

¿Qué tipo de aprovechamiento se le podría otorgar a estos residuos peligrosos?

1.3 Justificación

La U.A.E DIAN es una entidad pública que anualmente recibe una gran cantidad de muestras para analizar, las cuales son sometidas a diferentes procesos fisicoquímicos que generan una cuantía considerable de residuos peligrosos; sin embargo, no se dispone de un plan de aprovechamiento y/o disminución de dichos residuos producidos en los distintos procesos analíticos que se llevan a cabo en las diferentes áreas del laboratorio aduanero. Además, la entidad busca disminuir el riesgo de incurrir en faltas ambientales respecto a la cantidad producida de residuos en los procesos analíticos llevados a cabo por el laboratorio, con base en los límites máximos permisibles, definidos por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en la Resolución No. 0631 del 17 de marzo de 2015 [11], y evitar así multas y/o sanciones que podrían costar gran cantidad de dinero al territorio colombiano, en conjunto con las afectaciones de la productividad de la entidad.

Para la Subdirección del Laboratorio Aduanero de la Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales U.A.E DIAN, es conveniente que se ejecute este proyecto con la finalidad de que no se vea perjudicada su imagen corporativa [5], puesto que constantemente se presentan auditorías ambientales, con las que se inspeccionan y revisan que se cumplan los diversos objetivos establecidos por el sistema de gestión medioambiental de la organización.

Por ende, es fundamental establecer un procedimiento experimental para la Subdirección del Laboratorio Aduanero de la U.A.E. DIAN, con la finalidad de disminuir los residuos peligrosos generados en los distintos procesos analíticos que se llevan a cabo en dicho laboratorio, instaurando así una solución a la problemática mencionada anteriormente. La realización de este procedimiento experimental garantizará una correcta operación de las actividades y procesos analíticos, por medio de la optimización de estos, representando una ventaja para el laboratorio en cuanto a competitividad y gestión ambiental.

Adicionalmente, este proyecto brinda un aporte importante desde la Ingeniería Química, beneficiando a los sectores aduaneros y arancelarios, con la finalidad de mejorar el nivel de competitividad de los procesos llevados a cabo en los laboratorios de aduanas y más específicamente, en el análisis muestral ejecutado por estos; además de su importancia en la gestión ambiental de los análisis fisicoquímicos realizados, en la mitigación del impacto ambiental para proteger la salud humana, prevenir la contaminación, conservar los recursos naturales, cumplir con la legislación ambiental y promover la responsabilidad social, por medio de la reducción en la fuente de producción, el aprovechamiento y valorización de los residuos, la disposición final que se debe llevar a cabo con base en la normatividad colombiana vigente, y el seguimiento o certificación de dichas disposiciones finales [17].

1.4 Hipótesis

La implementación del procedimiento experimental para la disminución de los residuos peligrosos generados en los procesos analíticos llevados a cabo por el laboratorio, permiten que la Subdirección del Laboratorio Aduanero de la Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales - U.A.E. DIAN logre un mejor aprovechamiento de los recursos y disminución tanto de los mencionados residuos, como de los costos operativos.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Establecer un procedimiento para la Subdirección del Laboratorio Aduanero de la U.A.E. DIAN que permita disminuir los residuos peligrosos generados en los procesos analíticos que se realizan en el laboratorio.

1.5.2 Objetivos específicos

Determinar el área específica de la Subdirección del Laboratorio Aduanero de la U.A.E DIAN que genera mayor cantidad de residuos peligrosos en el periodo establecido de enero de 2021 a septiembre de 2023.

Analizar el proceso físico - químico en el que se produce mayor cantidad de residuos peligrosos en el Laboratorio Aduanero para el periodo establecido de enero de 2021 a septiembre de 2023.

Diseñar un plan de acción para disminuir los residuos peligrosos del proceso analítico en el que se genera la mayor cantidad de residuos peligrosos.

Identificar el tipo y proceso de aprovechamiento que se le podría otorgar a estos residuos peligrosos por medio de revisión bibliográfica.

1.6 Alcance

El presente proyecto consiste en evaluar el proceso actual de generación de residuos peligrosos llevado a cabo por el laboratorio, con el objetivo de diseñar una propuesta para el manejo de estos en la Subdirección del Laboratorio Aduanero de la Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales - U.A.E DIAN.

Gran parte del avance de este proyecto se llevará a cabo de forma experimental debido a que es importante establecer un procedimiento con el que se puedan disminuir los residuos peligrosos generados en la ejecución de los análisis fisicoquímicos que se desarrollan en el laboratorio aduanero. Sin embargo, también se realizará una parte de forma no experimental, en los procesos que así lo requieran (en su mayoría, referencias metodológicas, recolección y análisis

de datos, entre otros). Por otro lado, si se logra identificar una segunda oportunidad de uso de los residuos peligrosos definidos, esta no se desarrollará, únicamente se describirá el proceso por medio de diagramas de flujo. Se va a realizar el desarrollo del proyecto como se establece en la metodología pero no se implementará, puesto que eso es decisión de la mencionada entidad. Así mismo, dicho proyecto se desarrollará en las instalaciones de la Subdirección del Laboratorio Aduanero, por lo tanto, no habrá ningún tipo de implicación de costos adicionales, debido a que la entidad asumirá dichos costos referentes a los procesos y/o procedimientos que se necesiten para la ejecución del proyecto.

La finalidad de efectuar este proyecto se fundamenta en mejorar la productividad de los procesos y lograr un mejor aprovechamiento de los recursos, en conjunto con la disminución de los costos operativos y la reducción del impacto ambiental. Para llevar a cabo este proyecto, se contempla un tiempo estimado de 4 meses (desde agosto hasta noviembre de 2023).

2. MARCO REFERENCIAL

2.1 Marco teórico

2.1.1 Residuos peligrosos (RESPEL)

Los residuos peligrosos – RESPEL son un tipo específico de residuos que cuentan con propiedades peligrosas tanto para las personas, como para los ecosistemas [12]. Estos se pueden clasificar en residuos explosivos, que están constituidos por desechos pirotécnicos o autorreactivos que comúnmente emiten gases tóxicos inflamables; que adicionalmente tienen la capacidad de generar una reacción explosiva a condiciones de temperatura y presión determinadas; también se pueden clasificar en residuos comburentes que son aquellos que aceleran la combustión u otras sustancias inflamables por medio de la generación de oxígeno. Asimismo, están los residuos inflamables, los cuales tienden a generar combustión en presencia de alguna fuente de calor, incendiándose con facilidad, por otro lado, están los residuos corrosivos, que pueden corroer materiales o tejidos, y en su mayoría son ácidos o bases fuertes. También están los residuos tóxicos, que pueden llegar a provocar la muerte y/o efectos nocivos en la salud de la población, de la fauna y de la flora; y los residuos ecotóxicos que al ser liberados en el medio ambiente, afectan no solamente la salud de los organismos vivos, sino también a los ecosistemas [12]. Estos residuos pueden identificarse por medio de pictogramas del sistema ONU (transporte de mercancías peligrosas) y el sistema SGA según su clasificación correspondiente, como se evidencia en la *tabla 1*.

Tabla 1.

Pictogramas de peligrosidad

Pictograma		Clasificación	
SGA	Reglamentación ONU	Categoría de peligro	Clase de peligro
	Transporte no permitido	Explosivo inestable	Explosivos

Pictograma		Clasificación	
SGA	Reglamentación ONU	Categoría de peligro	Clase de peligro
		División 1.1	Explosivos
		División 1.2	
		División 1.3	
		División 1.4	
Sin pictograma		División 1.5	
Sin pictograma		División 1.6	
		1	
Sin pictograma	No se requiere	2	
Sin pictograma adicional	No se requiere	A (gases químicamente inestables)	
Sin pictograma adicional	No se requiere	B (gases químicamente inestables)	

Pictograma		Clasificación	
SGA	Reglamentación ONU	Categoría de peligro	Clase de peligro
		1	Aerosoles
		2	
Sin pictograma		3	
		1	Gases comburentes
		Gas comprimido	Gases a presión
		Gas licuado	
		Gas licuado refrigerado	
		Gas disuelto	
		1	Líquidos inflamables

Pictograma		Clasificación	
SGA	Reglamentación ONU	Categoría de peligro	Clase de peligro
		2	Líquidos inflamables
		3	
Sin pictograma	No se requiere	4	
		1	Sólidos inflamables
		2	
	Transporte no permitido	Tipo A	Sustancias y mezclas que reaccionan espontáneamente
		Tipo B	
		Tipos C y D	
		Tipos D y F	
Sin pictograma	No se requiere	Tipo G	

Pictograma		Clasificación	
SGA	Reglamentación ONU	Categoría de peligro	Clase de peligro
		1	Líquidos pirofóricos
		1	Sólidos pirofóricos
		1	Sustancias y mezclas que experimentan calentamiento espontáneo
		2	
		1	Sustancias y mezclas que, en contacto con el agua, desprenden gases inflamables
		2	
		3	
		1	Líquidos comburentes
		2	

Pictograma		Clasificación	
SGA	Reglamentación ONU	Categoría de peligro	Clase de peligro
		3	Líquidos comburentes
		1	Sólidos comburentes
		2	
		3	
	Transporte no permitido	Tipo A	
		Tipo B	
		Tipos C y D	
		Tipos D y F	
Sin pictograma	No se requiere	Tipo G	

Pictograma		Clasificación	
SGA	Reglamentación ONU	Categoría de peligro	Clase de peligro
		1	Sustancias y mezclas corrosivas para los metales
		1	Toxicidad aguda
		2	
		3	
	No se requiere	4	
Sin pictograma	No se requiere	5	
		1	
	No se requiere	2	
Sin pictograma	No se requiere	3	
	No se requiere	1	Lesiones oculares graves/irritación ocular

Pictograma		Clasificación	
SGA	Reglamentación ONU	Categoría de peligro	Clase de peligro
	No se requiere	2 ^a	Lesiones oculares graves/irritación ocular
Sin pictograma	No se requiere	2B	
	No se requiere	1	Sensibilización respiratoria
	No se requiere	1 ^a	
	No se requiere	2B	
	No se requiere	1	Sensibilización cutánea
	No se requiere	1 ^a	
	No se requiere	2B	
	No se requiere	1	Mutagenicidad en células germinales

Pictograma		Clasificación	
SGA	Reglamentación ONU	Categoría de peligro	Clase de peligro
	No se requiere	2	Mutagenicidad en células germinales
	No se requiere	1	Carcinogenicidad
	No se requiere	2	
	No se requiere	1	
	No se requiere	2	Toxicidad para la reproducción
Sin pictograma	No se requiere	Con efectos sobre la lactancia	
	No se requiere	1	Toxicidad sistémica específica de órganos tras una exposición única
	No se requiere	2	
	No se requiere	3	

Pictograma		Clasificación	
SGA	Reglamentación ONU	Categoría de peligro	Clase de peligro
	No se requiere	1	Toxicidad sistémica específica de órganos tras exposiciones repetidas
	No se requiere	2	
	No se requiere	1	Peligro por aspiración
	No se requiere	2	
		Agudo 1	Peligro a corto plazo (agudo) para el medio ambiente acuático
Sin pictograma	No se requiere	Agudo 2	
Sin pictograma	No se requiere	Agudo 3	
		Crónico 1	Peligro a largo plazo (crónico) para el medio ambiente acuático
		Crónico 2	
Sin pictograma	No se requiere	Crónico 3	
Sin pictograma	No se requiere	Crónico 4	

Pictograma		Clasificación	
SGA	Reglamentación ONU	Categoría de peligro	Clase de peligro
	No se requiere	1	Peligro para la capa de ozono

Nota. La tabla muestra los pictogramas de peligrosidad de acuerdo con la reglamentación ONU y el sistema SGA. Tomada de: Anexo 1. Tablas resumen de clasificación y etiquetado. Naciones Unidas. https://unece.org/DAM/trans/danger/publi/ghs/ghs_rev05/Spanish/05sp_Annex1.pdf.

Actualmente en la Subdirección del Laboratorio Aduanero de la U.A.E. DIAN se generan diferentes residuos peligrosos provenientes de los análisis de laboratorio, que son aquellos desechos que están compuestos mayoritariamente por muestras analizadas en compañía de reactivos que cuentan con características peligrosas tanto para el medio ambiente, como para la salud. Es importante mencionar que el laboratorio conserva estos residuos por un máximo de un (1) año; después de esta fecha un tercero efectúa la disposición final de dichos residuos peligrosos, dependiendo de su tipo de clasificación.

Como se mencionó anteriormente, el nivel de peligrosidad de los residuos se identifica por medio de pictogramas; pero esta no es la única forma de clasificarlos. De acuerdo con el Decreto 4741 de 2005, que se encarga de regular de forma parcial el manejo y la prevención de los residuos peligrosos con el objetivo de proteger la salud humana y el medio ambiente, este tipo de residuos se puede clasificar por procesos o actividades (*tabla 2*) y por corrientes de desecho (*tabla 3*).

Tabla 2.

Categoría Y - Residuos o desechos peligrosos por procesos o actividades

CORRIENTE	DESCRIPCIÓN DE LA CORRIENTE
Y1	Desechos clínicos resultantes de la atención médica prestada en hospitales, centros médicos y clínicas

CORRIENTE	DESCRIPCIÓN DE LA CORRIENTE
Y2	Desechos resultantes de la producción y preparación de productos farmacéuticos
Y3	Desechos de medicamentos y productos farmacéuticos
Y4	Desechos resultantes de la producción, la preparación y la utilización de biocidas y productos fitofarmacéuticos
Y5	Desechos resultantes de la fabricación, preparación y utilización de productos químicos para la preservación de la madera
Y6	Desechos resultantes de la producción, la preparación y la utilización de disolventes orgánicos
Y7	Desechos, que contengan cianuros, resultantes del tratamiento térmico y las operaciones de temple
Y8	Desechos de aceites minerales no aptos para el uso a que estaban destinados
Y9	Mezclas y emulsiones de desechos de aceite y agua o de hidrocarburos y agua
Y10	Sustancias y artículos de desecho que contengan, o estén contaminados por, bifenilos policlorados (PCB), terfenilos policlorados (PCT) o bifenilos polibromados (PBB)
Y11	Residuos alquitranados resultantes de la refinación, destilación o cualquier otro tratamiento pirolítico
Y12	Desechos resultantes de la producción, preparación y utilización de tintas, colorantes, pigmentos, pinturas, lacas o barnices
Y13	Desechos resultantes de la producción, preparación y utilización de resinas, látex, plastificantes o colas y adhesivos
Y14	Sustancias químicas de desecho, no identificadas o nuevas, resultantes de la investigación y el desarrollo o de las actividades de enseñanza y cuyos efectos en el ser humano o el medio ambiente no se conozcan
Y15	Desechos de carácter explosivo que no estén sometidos a una legislación diferente

CORRIENTE	DESCRIPCIÓN DE LA CORRIENTE
Y16	Desechos resultantes de la producción; preparación y utilización de productos químicos y materiales para fines fotográficos
Y17	Desechos resultantes del tratamiento de superficie de metales y plásticos
Y18	Residuos resultantes de las operaciones de eliminación de desechos industriales
Y19	Desechos que tengan como constituyentes: Metales carbonilos
Y20	Desechos que tengan como constituyentes: Berilio, compuestos de berilio
Y21	Desechos que tengan como constituyentes: Compuestos de cromo hexavalente
Y22	Desechos que tengan como constituyentes: Compuestos de cobre
Y23	Desechos que tengan como constituyentes: Compuestos de zinc
Y24	Desechos que tengan como constituyentes: Arsénico, compuestos de arsénico
Y25	Desechos que tengan como constituyentes: Selenio, compuestos de selenio
Y26	Desechos que tengan como constituyentes: Cadmio, compuestos de cadmio
Y27	Desechos que tengan como constituyentes: Antimonio, compuestos de antimonio
Y28	Desechos que tengan como constituyentes: Telurio, compuestos de telurio
Y29	Desechos que tengan como constituyentes: Mercurio, compuestos de mercurio
Y30	Desechos que tengan como constituyentes: Talio, compuestos de talio
Y31	Desechos que tengan como constituyentes: Plomo, compuestos de plomo
Y32	Desechos que tengan como constituyentes: Compuestos inorgánicos de flúor, con exclusión del fluoruro cálcico
Y33	Desechos que tengan como constituyentes: Cianuros inorgánicos
Y34	Desechos que tengan como constituyentes: Soluciones ácidas o ácidos en forma sólida
Y35	Desechos que tengan como constituyentes: Soluciones básicas o bases en forma sólida
Y36	Desechos que tengan como constituyentes: Asbesto (polvo y fibras)

CORRIENTE	DESCRIPCIÓN DE LA CORRIENTE
Y37	Desechos que tengan como constituyentes: Compuestos orgánicos de fósforo
Y38	Desechos que tengan como constituyentes: Cianuros orgánicos
Y39	Desechos que tengan como constituyentes: Fenoles, compuestos fenólicos, con inclusión de cloro fenoles
Y40	Desechos que tengan como constituyentes: Éteres
Y41	Desechos que tengan como constituyentes: Solventes orgánicos halogenados
Y42	Desechos que tengan como constituyentes: Disolventes orgánicos, con exclusión de disolventes halogenados
Y43	Desechos que tengan como constituyentes: Cualquier sustancia del grupo de los dibenzofuranos policlorados
Y44	Desechos que tengan como constituyentes: Cualquier sustancia del grupo de las dibenzoparadioxinas policloradas
Y45	Desechos que tengan como constituyentes: Compuestos organohalogenados, que no sean las sustancias mencionadas en el presente anexo

Nota. La tabla muestra la categoría Y - Residuos o desechos peligrosos por procesos o actividades. Tomada de: Decreto 4741 de 2005 - Gestor normativo. (s. f.). Función Pública. Recuperado de: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=18718>.

Tabla 3.

Lista A - Residuos o desechos peligrosos por corrientes de residuos

COMPONENTE	CORRIENTE	DESCRIPCIÓN DE LA CORRIENTE
A1 Desechos metálicos o que contengan metales	A1010	Desechos metálicos y desechos que contengan aleaciones de cualquiera de las sustancias siguientes: Antimonio, Arsénico, Berilio, Cadmio, Plomo, Mercurio, Selenio, Telurio, Talio

COMPONENTE	CORRIENTE	DESCRIPCIÓN DE LA CORRIENTE
A1 Desechos metálicos o que contengan metales	A1020	Desechos que tengan como constituyentes o contaminantes, excluidos los desechos de metal en forma masiva, cualquiera de las sustancias siguientes: Antimonio; compuestos de antimonio Berilio; compuestos de berilio Cadmio; compuestos de cadmio Plomo; compuestos de plomo Selenio; compuestos de selenio Telurio; compuestos de telurio
	A1030	Desechos que tengan como constituyentes o contaminantes cualquiera de las sustancias siguientes: Arsénico; compuestos de arsénico Mercurio; compuestos de mercurio Talio; compuestos de talio
	A1040	Desechos que tengan como constituyentes: Carbonilos de metal Compuestos de cromo hexavalente
	A1050	Lodos galvánicos
	A1060	Líquidos de desecho del decapado de metales
	A1070	Residuos de lixiviación del tratamiento del zinc, polvos y lodos como jarosita, hematites, etc.
	A1080	Residuos de desechos de zinc no incluidos en la lista B, que contengan plomo y cadmio en concentraciones tales que presenten características del anexo III
	A1090	Cenizas de la incineración de cables de cobre recubiertos

COMPONENTE	CORRIENTE	DESCRIPCIÓN DE LA CORRIENTE
A1 Desechos metálicos o que contengan metales	A1100	Polvos y residuos de los sistemas de depuración de gases de las fundiciones de cobre
	A1110	Soluciones electrolíticas usadas de las operaciones de refinación y extracción electrolítica del cobre
	A1120	Lodos residuales, excluidos los fangos anódicos, de los sistemas de depuración electrolítica de las operaciones de refinación y extracción electrolítica del cobre
	A1130	Soluciones de ácidos para grabar usadas que contengan cobre disuelto
	A1140	Desechos de catalizadores de cloruro cúprico y cianuro de cobre
	A1150	Cenizas de metales preciosos procedentes de la incineración de circuitos impresos no incluidos en la lista B
	A1160	Acumuladores de plomo de desecho, enteros o triturados
	A1170	Acumuladores de desecho sin seleccionar excluidas mezclas de acumuladores sólo de la lista B. Los acumuladores de desecho no incluidos en la lista B que contengan constituyentes del anexo I en tal grado que los conviertan en peligrosos
A1180	Montajes eléctricos y electrónicos de desecho o restos de éstos que contengan componentes como acumuladores y otros baterías incluidos en la lista A, interruptores de mercurio, vidrios de tubos de rayos catódicos y otros vidrios activados y capacitadores de PCB, o contaminados con constituyentes del anexo I	

COMPONENTE	CORRIENTE	DESCRIPCIÓN DE LA CORRIENTE
A2 Desechos que contengan principalmente constituyentes inorgánicos, que puedan contener metales o materia orgánica	A2010	Desechos de vidrio de tubos de rayos catódicos y otros vidrios activados
	A2020	Desechos de compuestos inorgánicos de flúor en forma de líquidos o lodos, pero excluidos los desechos de ese tipo especificados en la lista B
	A2030	Desechos de catalizadores, pero excluidos los desechos de este tipo especificados en la lista B
	A2040	Yeso de desecho procedente de procesos de la industria química, si contiene constituyentes del anexo I en tal grado que presenten una característica peligrosa del anexo III (véase la entrada correspondiente en la lista B B2080)
	A2050	Desechos de amianto (polvo y fibras)
	A2060	Cenizas volantes de centrales eléctricas de carbón que contengan sustancias del anexo I en concentraciones tales que presenten características del anexo III (véase la entrada correspondiente en la lista B B2050)
A3 Desechos que contengan principalmente constituyentes orgánicos, que puedan contener metales y materia inorgánica	A3010	Desechos resultantes de la producción o el tratamiento de coque de petróleo y asfalto
	A3020	Aceites minerales de desecho no aptos para el uso al que estaban destinados
	A3030	Desechos que contengan, estén integrados o estén contaminados por lodos de compuestos antidetonantes con plomo
	A3040	Desechos de líquidos térmicos (transferencia de calor)

COMPONENTE	CORRIENTE	DESCRIPCIÓN DE LA CORRIENTE
A3 Desechos que contengan principalmente constituyentes orgánicos, que puedan contener metales y materia inorgánica	A3050	Desechos resultantes de la producción, preparación y utilización de resinas, látex, plastificantes o colas/adhesivos excepto los desechos especificados en la lista B
	A3060	Nitrocelulosa de desecho
	A3070	Desechos de fenoles, compuestos fenólicos, incluido el cloro fenol en forma de líquido o de lodo
	A3080	Desechos de éteres excepto los especificados en la lista B
	A3090	Desechos de cuero en forma de polvo, cenizas, Iodos y harinas que contengan compuestos de plomo hexavalente o biocidas (véase el apartado correspondiente en la lista B B3100)
	A3100	Raeduras y otros desechos del cuero o de cuero regenerado que no sirvan para la fabricación de artículos de cuero, que contengan compuestos de cromo hexavalente o biocidas
	A3110	Desechos del curtido de pieles que contengan compuestos de cromo hexavalente o biocidas o sustancias infecciosas (véase el apartado correspondiente en la lista B B3110)
	A3120	Pelusas - fragmentos ligeros resultantes del desmenuzamiento
	A3130	Desechos de compuestos de fósforo orgánicos
	A3140	Desechos de disolventes orgánicos no halogenados pero con exclusión de los desechos especificados en la lista B
A3150	Desechos de disolventes orgánicos halogenados	

COMPONENTE	CORRIENTE	DESCRIPCIÓN DE LA CORRIENTE
	A3160	Desechos resultantes de residuos no acuosos de destilación halogenados o no halogenados derivados de operaciones de recuperación de disolventes orgánicos
A3 Desechos que contengan principalmente constituyentes orgánicos, que puedan contener metales y materia inorgánica	A3170	Desechos resultantes de la producción de hidrocarburos halogenados alifáticos
	A3180	Desechos, sustancias y artículos que contienen, consisten o están contaminados con bifenilo policlorado (PCB), terfenilos policlorados (PCT), naftaleno policlorado (PCN) o bifenilo polibromado (PBB), o cualquier otro compuesto polibromado análogo, con una concentración de igual o superior a 50 mg/kg
	A3190	Desechos de residuos alquitranados (con exclusión de los cementos asfálticos) resultantes de la refinación, destilación o cualquier otro tratamiento pirolítico de materiales orgánicos
	A3200	Material bituminoso (desechos de asfalto) con contenido de alquitrán resultantes de la construcción y el mantenimiento de carreteras
A4 Desechos que pueden contener constituyentes inorgánicos u orgánicos	A4010	Desechos resultantes de la producción, preparación y utilización de productos farmacéuticos, pero con exclusión de los desechos especificados en la lista B
	A4020	Desechos clínicos y afines; es decir desechos resultantes de prácticas médicas, de enfermería, dentales, veterinarias o actividades similares, y desechos generados en hospitales u otras instalaciones durante actividades de investigación o el tratamiento de pacientes, o de proyectos de investigación

COMPONENTE	CORRIENTE	DESCRIPCIÓN DE LA CORRIENTE
A4 Desechos que pueden contener constituyentes inorgánicos u orgánicos	A4030	Desechos resultantes de la producción, la preparación y la utilización de biocidas y productos fitofarmacéuticos, con inclusión de desechos de plaguicidas y herbicidas que no respondan a las especificaciones, caducados, en desuso o no aptos para el uso previsto originalmente
	A4040	Desechos resultantes de la fabricación, preparación y utilización de productos químicos para la preservación de la madera
	A4050	Desechos que contienen, consisten o están contaminados con algunos de los productos siguientes: Cianuros inorgánicos, con excepción de residuos que contienen metales preciosos, en forma sólida, con trazas de cianuros inorgánicos
	A4060	Desechos de mezclas y emulsiones de aceite y agua o de hidrocarburos y agua
	A4070	Desechos resultantes de la producción, preparación y utilización de tintas, colorantes, pigmentos, pinturas, lacas o barnices, con exclusión de los desechos especificados en la lista B
	A4080	Desechos de carácter explosivo
	A4090	Desechos de soluciones ácidas o básicas, distintas de las especificadas en el apartado correspondiente de la lista B
	A4100	Desechos resultantes de la utilización de dispositivos de control de la contaminación industrial para la depuración de los gases industriales, pero con exclusión de los desechos especificados en la lista B

COMPONENTE	CORRIENTE	DESCRIPCIÓN DE LA CORRIENTE
A4 Desechos que pueden contener constituyentes inorgánicos u orgánicos	A4110	Desechos que contienen, consisten o, están contaminados con algunos de los productos siguientes: - Cualquier sustancia del grupo de los dibenzofuranos policlorados - Cualquier sustancia del grupo de las dibenzodioxinas policloradas
	A4120	Desechos que contienen, consisten o están contaminados con peróxidos
	A4130	Envases y contenedores de desechos que contienen sustancias incluidas en el anexo I, en concentraciones suficientes como para mostrar las características peligrosas del anexo III
	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 III
	A4150	Sustancias químicas de desecho, no identificadas o nuevas, resultantes de la investigación y el desarrollo o de las actividades de enseñanza y cuyos efectos en el ser humano o el medio ambiente no se conozcan
	A4160	Carbono activado consumido no incluido en la lista B (véase el correspondiente apartado de la lista B B2060).

Nota. La tabla muestra la lista A de los residuos o desechos peligrosos por corrientes de residuos. Tomada de: Decreto 4741 de 2005 - Gestor normativo. (s. f.). Función Pública. Recuperado de: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=18718>.

Adicionalmente, teniendo en cuenta el CRETIB (clasificación, recolección, empaquetado, transporte, tratamiento, disposición final y aprovechamiento de los residuos peligrosos) mencionado en el mismo decreto [33], este tipo de residuos también tiene unas características que atribuyen peligrosidad, tal como se evidencia a continuación:

- (a) Característica que hace a un residuo o desecho peligroso ser corrosivo: Son aquellos residuos resultantes de la acción química que causan graves daños a los tejidos vivos con los que entran en contacto, estos son acuosos y tienen un pH menor o igual a 2 o mayor o igual a 12.5, además de ser líquidos que corroen el acero a una tasa de más de 6.35 mm por año, a una temperatura de prueba de 55°C [33].
- (b) Característica que hace a un residuo o desecho peligroso ser reactivo: Son aquellos residuos que al mezclarse o unirse con otros compuestos, sustancias o elementos pueden producir vapores o gases que en cantidad considerables pueden generar daños a la salud humana o al medio ambiente; así mismo, estos residuos son capaces de originar una reacción explosiva, bajo una fuente de ignición [33].
- (c) Característica que hace a un residuo o desecho peligroso ser explosivo: Son aquellos residuos en estado líquido o sólido, que de forma espontánea o por reacción química pueden producir gases a una temperatura, presión y/o velocidades específicas, generando así daños a la salud humana y al medio ambiente [33]; también, estos pueden formar mezclas explosivas con el agua y son capaces de ocasionar una reacción o detonación explosiva a una temperatura de 25°C, con una presión de 1 atm [33]. Adicionalmente, puede ser una sustancia elaborada con el fin de originar una explosión o efecto pirotécnico [33].
- (d) Característica que hace a un residuo o desecho peligroso ser inflamable: Son aquellos residuos que en presencia de una fuente de ignición pueden arder a una temperatura de 20°C y 1 atm de presión, estos pueden ser líquidos con un punto de inflamación menor a 60°C, o sólidos que pueden producir fuego por absorción de humedad, quema o fricción [33].

- (e) Característica que hace a un residuo o desecho peligroso ser infeccioso: Son aquellos residuos que contienen agentes patógenos como microorganismos (bacterias, parásitos, virus, hongos, entre otros), los cuales, en concentraciones suficientes pueden causar enfermedades en los seres humanos o animales [33].
- (f) Característica que hace a un residuo peligroso ser radiactivo: Son aquellos residuos que contienen elementos o compuestos con una actividad radiactiva superior a 70 K Bq/Kg o 2nCi/g, capaces de emitir de forma directa o indirecta radiaciones ionizantes o electromagnéticas alterando así la radiación natural de medio ambiente [33].
- (g) Característica que hace a un residuo o desecho peligroso ser tóxico: Son aquellos residuos que tienen la capacidad de generar daños y/o efectos biológicos adversos en la salud humana y el medio ambiente, este tipo de desechos pueden ser agudos, retardados o crónicos y eco tóxicos. Así mismo, estos residuos contienen un alto potencial de irritación ocular, respiratoria y cutánea, además de producir carcinogenicidad, mutagenicidad, teratogenicidad, entre otros efectos adversos [33].

2.1.2 PGIRESPEL

PGIRESPEL es un plan de gestión integral de residuos peligrosos que busca regular la gestión de los residuos peligrosos en el país. Dicho plan es obligatorio en todas y cada una de las empresas tanto del sector público, como del sector privado que generen residuos peligrosos, con el objetivo de definir diferentes medidas para su disposición final de forma segura y amigable con el medio ambiente. [16]

Actualmente, el Plan de Gestión Integral de Residuos Peligrosos – PGIRESPEL, se aplica en los procesos o técnicas de análisis empleadas en la Subdirección del Laboratorio Aduanero que generen residuos peligrosos; entre estas se destacan la cromatografía, volumetría, gravimetría, destilación, técnicas espectroscópicas, calorimetría, termogravimetría, espectrometría, reometría, técnicas bromatológicas, viscosimetría, polarimetría, determinación de densidad, entre otras. [5]

Con la finalidad de realizar una correcta gestión de residuos peligrosos, se establece el esquema jerárquico de la *figura 2*, para definir un proceso específico a seguir. Teniendo en cuenta la jerarquización presentada, el primer paso es la reducción en la fuente de producción, donde se deben disminuir o tratar de eliminar los diferentes residuos peligrosos que pudieron haberse producido; el segundo paso es el aprovechamiento y valorización de estos residuos, que va ligado con el tercer paso de tratamiento y transformación, para determinar si estos se pueden aprovechar nuevamente en el procesos de producción, por medio de transformaciones físicas, químicas o biológicas. El cuarto paso es la disposición final que se debe llevar a cabo con base en la normatividad colombiana vigente, y por último, el quinto paso es el seguimiento y certificación de estas disposiciones finales, después de haber evaluado todas las alternativas y verificar que no se puede obtener ningún beneficio productivo o económico de estos. [17]

Figura 2.

Pirámide de proceso jerárquico para la gestión de residuos.



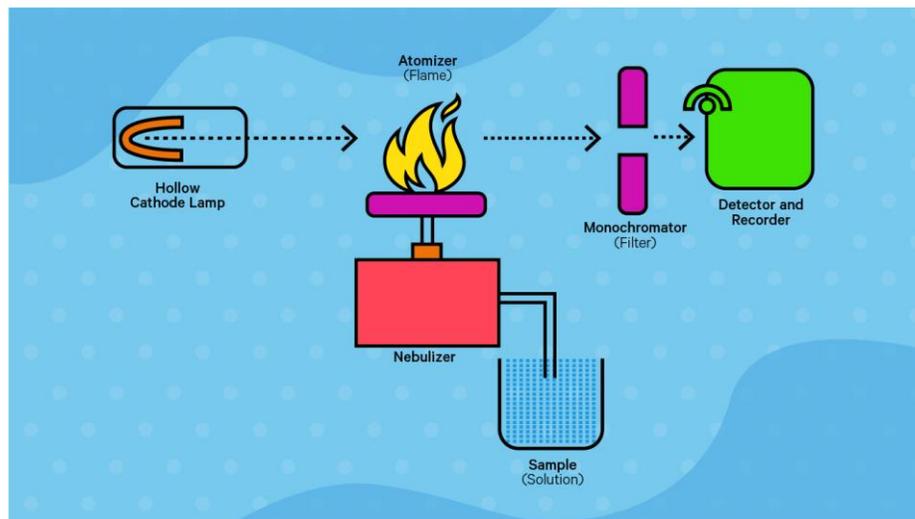
Nota. La imagen muestra la pirámide del proceso jerárquico para la gestión de residuos. Tomada de: Umaña Villalba, M. P. (2017). Formulación e implementación del Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) y el Plan de Gestión Integral de Residuos Peligrosos (PGIRESPEL) para la Empresa Duquesa SA.

2.1.3 Espectrometría de absorción atómica por atomización de llama

La espectrometría de absorción atómica por atomización de llama es una técnica analítica que fue establecida a principios del siglo XIX por los científicos Robert Wilhelm y Gustav Robert Kirchhoff, la cual se emplea para determinar la concentración de elementos químicos en una muestra específica [23]. Así mismo, esta técnica se fundamenta en el principio de que los átomos de un elemento en particular pueden absorber la radiación electromagnética con una longitud de onda característica [23].

Figura 3.

Diagrama esquemático de un espectrómetro de absorción atómica



Nota. La figura muestra el diagrama esquemático de un espectrómetro de absorción atómica. Tomada de: Vesser, Deon. *Espectroscopia de absorción atómica, principios y aplicaciones*. (2021, 16 diciembre). Análisis y separaciones. [Acceso: oct. 19, 2023].

El funcionamiento de la espectroscopía de absorción atómica por atomización de llama se basa en cuatro pasos [25]. El primero es la atomización, donde la muestra se introduce en una llama (por lo general de acetileno y óxido nítrico) para descomponerse en átomos individuales; el segundo paso es la excitación, donde los átomos del elemento son activados por estados de energía más altos mediante la radiación emitida por una lámpara de cátodo hueco [25]. Conjuntamente, el

tercer paso es la absorción, donde los átomos excitados vuelven a su estado original, liberando energía en forma de radiación electromagnética; finalmente, el cuarto paso es la detección, donde la radiación transmitida por medio de la llama se envía hacia un detector, que registra la cantidad de radiación que fue absorbida [25]. A continuación, en la *figura 3* se muestra el diagrama esquemático del funcionamiento de un espectrómetro de absorción atómica.

Esta técnica se aplica con frecuencia para examinar la cantidad de elementos metálicos presentes en muestras de diversos tipos como alimentos, productos químicos, aleaciones, entre otros [24].

2.2 Marco legal

2.2.1 Ley 99 de 1993

Decreta los objetivos y principios de la política de conservación del medio ambiente y los recursos naturales del país, en conjunto con las responsabilidades y obligaciones de las entidades u organizaciones tanto públicas, como privadas en cuanto a materia ambiental, incluyendo la gestión de los residuos peligrosos. [18]

2.2.2 Decreto 1076 de 2015

Regula los requisitos y/o procedimientos para la gestión y control ambiental de los proyectos, actividades y obras en el país, en unión con las directrices y normas técnicas para la disposición adecuada de los residuos tanto sólidos, como líquidos, que se identifiquen y clasifiquen como residuos peligrosos. [19]

2.2.3 Resolución 0631 de 2015

Establece las directrices técnicas para la implementación del Plan Nacional para la gestión integral de residuos (PGIR) por medio de los requisitos y condiciones para el manejo de residuos peligrosos en las distintas entidades u organizaciones del país. [20]

2.2.4 Resolución 1486 de 2017

Instituye las diferentes normativas y regulaciones para el manejo, transporte, almacenamiento y disposición final de los residuos peligrosos, por medio de las diferentes clasificaciones de éstos, en unión con los diversos criterios de identificación, etiquetado y/o empaquetado, con la finalidad de controlar y regular el manejo de los residuos, minimizando los riesgos asociados a su manipulación. [21]

2.2.5 Resolución 909 de 2008

Constituye las normas, estándares y/o límites máximos de emisión de contaminantes en la atmósfera generados por el sector industrial, estableciendo los procedimientos para el seguimiento de la calidad del aire y las obligaciones de las empresas o entidades que realicen diversas actividades que produzcan emisiones atmosféricas. [22]

3. METODOLOGÍA

3.1 Plan de acción

Con el objetivo de diseñar un plan de acción para disminuir los residuos peligrosos del proceso analítico en el que se genera la mayor cantidad de residuos peligrosos en la Subdirección del Laboratorio Aduanero de la U.A.E DIAN es necesario desarrollar una serie de actividades tales como el registro de residuos peligrosos generados en los procesos de análisis muestral, así como una verificación y evaluación de los mismos para determinar si es posible disminuir la cantidad de dichos desechos producidos, así como de otorgarles un aprovechamiento para ser integrados nuevamente en la cadena de valor. Además, después de implementar los mencionados procedimientos para la disminución y el aprovechamiento de los residuos, es importante monitorear o controlar las actividades que se llevaron a cabo para la ejecución del plan de acción para verificar su cumplimiento y determinar las posibles acciones futuras a poner en práctica. Cada uno de los componentes realizados para desarrollar el plan de acción se exponen a continuación.

3.1.1 Diagnóstico y clasificación de los residuos peligrosos

En la etapa inicial del proyecto se realizó un diagnóstico y registro de los residuos peligrosos producidos desde enero de 2021, hasta septiembre de 2023 en los diferentes procesos de análisis muestral llevados a cabo por el laboratorio aduanero; además, se estableció una clasificación de los diferentes residuos, de acuerdo a su nivel de peligrosidad y su correspondiente corriente de desecho.

Consecuentemente, en esta etapa se realizaron diferentes actividades como la recolección de datos donde se evidencian las cantidades de residuos peligrosos que se generaron teniendo en cuenta las actas que dan cumplimiento a los contratos de disposición de los residuos peligrosos con la respectiva empresa que obtuvo la licitación (estos valores se encuentran en los anexos 1, 2 y 3 para los años 2021, 2022 y 2023, respectivamente), de acuerdo con su clasificación correspondiente como residuos peligrosos generados en los análisis muestrales del laboratorio; en conjunto con un procesamiento y análisis de los datos, con los que se determinó que los laboratorios

de metales, alimentos y textiles fueron las áreas donde más residuos peligrosos se produjeron en el periodo establecido, mediante el proceso de análisis muestral de espectrometría de absorción atómica.

Es importante mencionar que el diagnóstico o cuantificación de la cantidad de residuos peligrosos generados por el laboratorio para el periodo en estudio (enero de 2021 a septiembre de 2023) se llevó a cabo registrando y comparando en un Excel los valores de los desechos producidos para cada uno de estos años teniendo en cuenta los datos reportados en los anexos 1, 2 y 3 del presente documento, para posteriormente identificar que el residuo que más se produjo en este periodo de tiempo fue el ácido clorhídrico, como se muestra en la *tabla 8*. De igual forma, en cuanto a su clasificación por corriente de desecho para poder determinar el tipo de aprovechamiento a aplicarse, se tuvieron en cuenta los mismos anexos mencionados anteriormente (esta corriente de desecho fue definida en su momento, por los expertos técnicos del área donde se generaron cada uno de estos residuos).

3.1.2 Procedimiento de determinación de micronutrientes por espectrometría de absorción atómica por atomización de llama utilizando curvas de calibración preparadas con soluciones multielementales

En cuanto a la etapa media del proyecto, se analizó el proceso físico - químico en el que se generó la mayor cantidad de residuos peligrosos en el periodo establecido y se identificaron los cambios que deben llevarse a cabo en esta técnica aplicada por el laboratorio, con la finalidad de establecer una alternativa de disminución del ácido clorhídrico como parte del plan de acción para optimizar el procedimiento de determinación de micronutrientes por espectrometría de absorción atómica por atomización de llama.

3.1.2. a. Medidas de seguridad. Durante el desarrollo del presente método se requirió el manejo de sustancias químicas, por lo que fue necesario usar los elementos de protección personal adecuados (máscara con filtro para vapores ácidos, guantes de nitrilo, gafas de seguridad y bata de laboratorio), junto con las hojas de seguridad de los reactivos; estos reactivos fueron manipulados en la cabina de extracción. Adicionalmente, se siguieron las indicaciones para el

manejo y las precauciones suministradas por los instructivos de operación de los equipos que fueron utilizados.

3.1.2.b. Materiales. Los materiales empleados en el desarrollo de este procedimiento fueron tubos falcón de 50 mL y 15 mL, frascos de PE o PP de 100 mL a 200 mL, recipientes de teflón para digestión asistida por microondas, micropipetas y un desecador.

3.1.2.c. Reactivos. En cuanto a los reactivos, se usaron agua tipo I, ácido nítrico (HNO_3) al 65% (p/p), ácido clorhídrico (HCl) al 37% (p/p), soluciones calibrantes de Mn y Fe de aproximadamente 1000 mg/L, acetileno con pureza del 99,5% o mayor y diluyente (1L): 90 mL HNO_3 65% + 30 mL HCl 37% + 880 mL H_2O tipo I.

3.1.2.d. Equipos. Los equipos dispuestos para el desarrollo de esta técnica fueron una balanza analítica Sartorius, un digestor de microondas Milestone Ethos Up con rotor SK-15eT, un espectrómetro de absorción atómica HR-CS-AAS ContraAA 800, una cabina de extracción y un sistema de purificación de agua tipo I.

3.1.2.e. Conservación de la muestra. Sobre la conservación de la muestra, se verificó que estuviera dispuesta de forma adecuada para que no se expusiera a condiciones que afectaran sus características fisicoquímicas.

3.1.2.f. Preparación de la muestra. Para la preparación de la muestra se encendió el sistema de extracción del digestor de microondas y se verificó que los recipientes del rotor del microondas se encontraran limpios y secos. Seguido de esto, se consultó el resultado de cenizas del ítem de ensayo, previo a la ejecución del método, con el objetivo de establecer la cantidad de muestra a digerir y se pesó $1,000 \text{ g} \pm 0,10 \text{ g}$ de la muestra, asegurándose de la homogeneidad de las porciones para evitar la adherencia de material a las paredes de los recipientes. Después se trasladaron los recipientes a una cabina de extracción de ácidos, donde se adicionó con micropipeta a cada recipiente $9,0 \text{ mL} \pm 0,2 \text{ mL}$ de HNO_3 65% y $3,0 \text{ mL} \pm 0,2 \text{ mL}$ de HCl 37%. También se preparó un blanco de reactivos adicionando en un recipiente $9,0 \text{ mL} \pm 0,2 \text{ mL}$ de HNO_3 65% y $3,0 \text{ mL} \pm 0,2 \text{ mL}$ HCl 35%; se taparon los recipientes y se dejaron en reposo durante 20 minutos en la

cabina de extracción, posteriormente se sellaron adecuadamente y se ubicaron en la cámara del digestor. Así mismo, se seleccionó el tipo de muestra en el menú del equipo que cuenta con las condiciones de calentamiento presentes en la *tabla 4*.

Tabla 4.

Condiciones de digestión para el método de ensayo

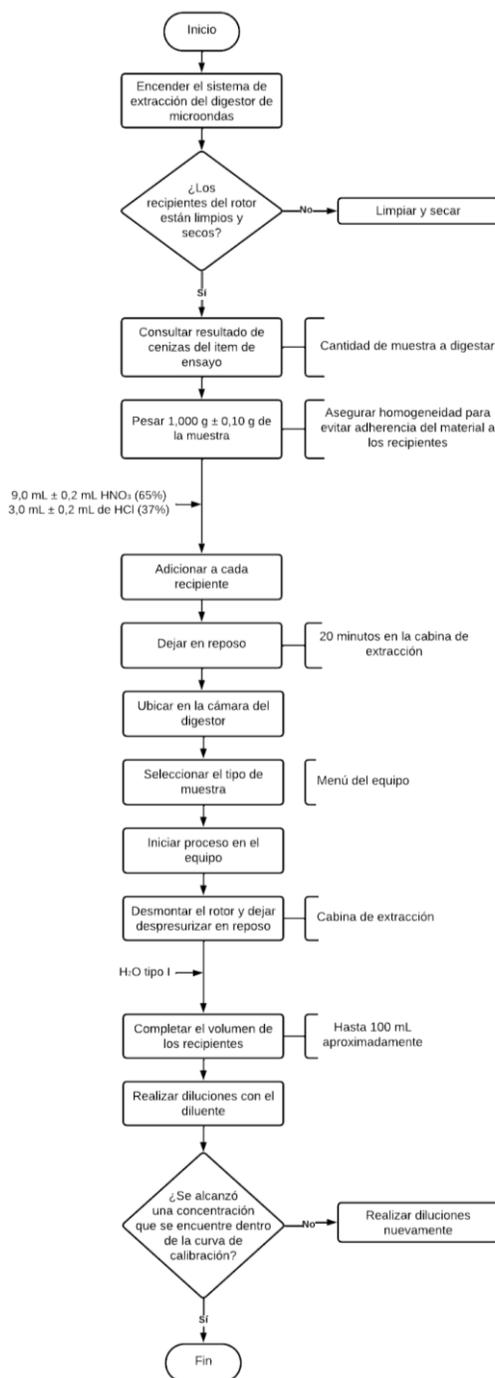
Paso	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
1	$T_{amb} - 200$	15
2	200	20
3	$200 - T_{amb}$	20

Nota. La tabla muestra las condiciones de digestión para el método de ensayo.

Se inició el proceso en el equipo ingresando en el número de viales que se encontraban en el rotor, seguido de esto se desmontó el rotor cuando terminó el proceso de digestión y se ubicó dentro de la cabina de extracción para dejar despresurizar en reposo. Luego se abrieron cuidadosamente los recipientes para realizar la transferencia cuantitativa de los extractos de digestión en los frascos correspondientes que se pesaron previamente y se completó el volumen final, hasta aproximadamente 100 mL con agua tipo I. Finalmente se realizaron las diluciones necesarias de los extractos de digestión con el diluyente, para alcanzar una concentración que se encuentre dentro de la curva de calibración.

Figura 4.

Diagrama de flujo de la preparación de la muestra



Nota. La figura muestra el diagrama de flujo de la preparación de la muestra.

3.1.2.g. Preparación de las curvas de calibración. Para la realización de esta técnica de ensayo, los intervalos de concentración de los elementos utilizados se expresan en la *tabla 5*; con base en dichos intervalos se preparó en un tubo falcón de 50 mL una solución multielemental de Mn y Fe (cada elemento con un peso aproximado de 1 g) a partir de las soluciones calibrantes y se llevó a una masa final de aproximadamente 50 g con el diluyente.

Tabla 5.

Intervalos de concentración de cada elemento

Elemento	Intervalo (mg/kg)
Mn	0,1 - 1,5
Fe	0,1 - 2,0

Nota. La tabla muestra los intervalos de concentración de cada elemento.

Con la solución anterior se prepararon los niveles de las curvas de calibración pesando las alícuotas que se indican en la *tabla 6*; luego se completó la masa final establecida con el diluyente, usando tubos falcón de 50 mL para cada nivel.

Tabla 6.

Masas para la preparación de las curvas de calibración

Nivel	Masa alícuota (g)	Masa final (g)	Concentración (mg/kg)
1	0,15	30	0,10
2	0,45	30	0,30
3	0,75	30	0,50
4	1,35	30	0,90
5	1,65	30	1,10
6	1,95	30	1,30

Nivel	Masa alícuota (g)	Masa final (g)	Concentración (mg/kg)
7	2,25	30	1,50
8	2,70	30	1,80
9	3,00	30	2,00

Nota. La tabla muestra las masas para la preparación de las curvas de calibración.

3.1.2.h. Medición. Referente a la medición, se verificó si había paso de aire y acetileno en el equipo; seguido de esto, se encendió el equipo y se establecieron los lineamientos evidenciados en la *tabla 7* para el correcto manejo del espectrómetro de absorción atómica ContrAA 800 con la técnica de atomización de llama.

Tabla 7.

Condiciones del método de corrida en el equipo ContrAA 800

Elemento	Longitud de onda (nm)	Tipo de llama
Mn	279,482	Aire/C ₂ H ₂
Fe	248,327	

Nota. La tabla muestra las condiciones del método de corrida en el equipo ContrAA 800.

Asimismo, se adecuó el equipo con una solución multielemental de optimización que se realizó pesando en un frasco aproximadamente 0,10 g de Mn y 0,25 g de Fe, después se llevó a una masa final de aproximadamente 30 g con el diluyente. Seguido de esto, se utilizó la solución de optimización para adecuar la llama y el quemador de acuerdo con los lineamientos para el correcto uso del espectrómetro de absorción atómica ContrAA 800. Finalmente se creó la secuencia colocando el blanco (diluyente), la curva de calibración y las muestras en las posiciones correspondientes del auto muestreador.

3.1.3 Aprovechamiento de los residuos peligrosos

De igual forma, en la etapa media del proyecto se identificó que el tipo de aprovechamiento que se le puede otorgar al residuo peligroso que tuvo las cifras más altas en el periodo de tiempo definido (ácido clorhídrico) es el intercambio iónico. Por medio de revisión bibliográfica se describió el proceso que se debe llevar a cabo para el aprovechamiento del mencionado residuo, el cual se profundiza en el análisis de resultados del presente documento.

3.1.4 Capacitación y divulgación

En la etapa final del proyecto se debe divulgar el procedimiento de determinación de micronutrientes utilizando curvas de calibración preparadas con soluciones multielementales descrito anteriormente y el experto técnico líder del área de absorción atómica debe capacitar al personal de dicha área, en el desarrollo de este método con el objetivo de poder llevar a cabo la implementación del mismo, para así reducir los costos operativos y disminuir el impacto ambiental negativo, con base en la contaminación del suelo, el aire, el agua y la biodiversidad.

Durante la realización de la mencionada capacitación, es importante asegurar que los expertos técnicos tengan acceso a los recursos necesarios y reciban el apoyo adecuado para la ejecución del presente procedimiento. Incluyendo la provisión de materiales para la capacitación y la programación de sesiones de seguimiento.

3.1.5 Monitoreo y mejora continua

En cuanto al monitoreo y la mejora continua, después de llevar a cabo la capacitación y divulgación del procedimiento, es importante evaluar los resultados para determinar su efectividad. En esta etapa se debe controlar y verificar la disminución del consumo del reactivo (ácido clorhídrico) mensualmente, así como realizar una recopilación de la retroalimentación de los expertos técnicos sobre el funcionamiento del método y ejecutar los cambios necesarios en el desempeño de dicho procedimiento para la determinación de micronutrientes en las diferentes muestras recibidas por el laboratorio, que necesiten ser sometidas a este tipo de análisis físico -

químico. Así mismo, si se evidencia un correcto funcionamiento de este procedimiento, se puede revisar qué otros métodos experimentales producen una cantidad de residuos peligrosos considerable y proponer diversas alternativas para la disminución de estos.

3.1.6 Cronograma de actividades

Finalmente, a continuación se define el cronograma de actividades necesario para llevar a cabo la ejecución y posible implementación del plan de acción para disminuir los residuos peligrosos de ácido clorhídrico en el procedimiento de análisis muestral de absorción atómica por atomización de llama.

Figura 5.

Cronograma de actividades para el desarrollo del plan de acción para la disminución de los residuos peligrosos en la Subdirección del Laboratorio Aduanero de la U.A.E DIAN

Actividad	Agosto				Septiembre				Octubre				Noviembre			
	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
Diagnóstico y clasificación de los residuos peligrosos																
Realización de base de datos y/o excel con los datos estipulados en las actas de disposición final del laboratorio																
Cuantificación y análisis de los datos																
Determinación del procedimiento para la disminución de los residuos peligrosos (ácido clorhídrico en este caso)																
Identificación del procedimiento para la reducción de los residuos por medio de revisión bibliográfica																
Experimentación del procedimiento identificado (determinación de micronutrientes por espectrometría de absorción atómica por atomización de llama utilizando curvas de calibración preparadas con soluciones multielementales en este caso)																
Verificación de los resultados para comprobar su efectividad en cuanto a la reducción de los residuos peligrosos (cálculo del porcentaje de disminución y de errores absoluto y relativo)																
Aprovechamiento de los residuos peligrosos (ácido clorhídrico en este caso)																
Identificación del procedimiento para el aprovechamiento de los residuos por medio de revisión bibliográfica																
Capacitación y divulgación del procedimiento																
Divulgación del procedimiento a los expertos técnicos del área específica (absorción atómica)																
Capacitación por parte del líder del área específica (absorción atómica), a los otros expertos técnicos																
Monitoreo y mejora continua																
Evaluación de la efectividad de los resultados del procedimiento																
Control y verificación de la disminución del consumo del reactivo (ácido clorhídrico)																
Revisión de los otros métodos experimentales aplicados en el laboratorio para identificar que otros residuos peligrosos que se generen en gran cantidad se pueden disminuir, buscando alternativas mediante revisión bibliográfica																

Nota. La figura muestra el cronograma de actividades para el desarrollo del plan de acción para la disminución de los residuos peligrosos en la Subdirección del Laboratorio Aduanero de la U.A.E DIAN.

4. RESULTADOS

4.1 Plan de acción

4.1.1 Diagnóstico y clasificación de los residuos peligrosos

Por medio del diagnóstico realizado en la etapa inicial del proceso, se llevó a cabo un histórico de datos de los residuos peligrosos producidos desde enero de 2021, hasta septiembre de 2023 en cada uno de los procesos de análisis muestral efectuados por el laboratorio aduanero, donde se evidencian las cantidades de residuos peligrosos que se generaron, de acuerdo con su respectiva clasificación como residuos provenientes de los análisis muestrales del laboratorio; en conjunto con un procesamiento y análisis de dichos datos.

Teniendo en cuenta las actividades de análisis muestral del laboratorio, en el periodo establecido, el residuo que se produjo en mayor cantidad fue el ácido clorhídrico con un peso total de 256.42 kg, como se evidencia en la *tabla 8*; este reactivo se utiliza en los laboratorios de metales, textiles y alimentos para el desarrollo del proceso de análisis fisicoquímico de absorción atómica.

Tabla 8.

Residuos peligrosos provenientes de análisis muestral de laboratorio

Nombre del residuo	Peso (kg)				Corriente
	2021	2022	2023	Total	
Acetona	2,18	3,26	3,04	8,48	Y42
Acetonitrilo-metanol-agua	4,12	13,78	4,50	22,40	Y42
Ácido acético glacial	-	1,94	-	1,94	Y34
Ácido clorhídrico	66,78	34,52	155,12	256,42	Y34
Ácido fluorhídrico	-	1,28	0,78	2,06	Y34
Ácido fórmico	5,18	7,30	1,04	13,52	Y34

Nombre del residuo	Peso (kg)				Corriente
	2021	2022	2023	Total	
Ácido nítrico	11,40	0,70	-	12,10	Y34
Ácido sulfúrico	33,90	27,44	22,84	84,18	Y34
Ácido tricloroacético - cloroformo	-	7,04	1,46	8,50	Y34
Benceno	-	0,76	-	0,76	Y42
Ciclohexano	-	38,08	-	38,08	Y42
Ciclohexanona	3,24	6,32	0,26	9,82	Y42
Ciclobenceno	-	0,50	0,36	0,86	Y41
Clorofenoles líquidos	-	1,42	-	1,42	Y39
Cloroformo	-	1,42	-	1,42	Y41
Cloruro de zinc	-	1,78	-	1,78	Y23
Cis-decahidronaftaleno	-	0,44	-	0,44	Y42
m – Cresol	2,72	0,82	-	3,54	Y42
Dicloroetano	-	-	0,56	0,56	Y42
Dimetilformamida	24,90	37,92	22,78	85,60	Y42
Éter dietílico	1,46	-	-	1,46	Y40
Gasóleo y combustibles	24,51	50,58	10,90	85,99	Y8
n-Hexano	2,50	0,60	-	3,10	Y42
Hidróxido de amonio	-	0,58	-	0,58	Y35
Hidróxido de sodio	31,70	32,46	42,50	106,66	Y35
Hipoclorito de sodio	2,28	0,68	0,82	3,78	A4140
Isoamilo acetato	-	0,36	-	0,36	Y42
Metanol	-	0,58	-	0,58	Y42
Nitrato de plata - ácido nítrico	-	10,92	4,36	15,28	Y34

Nombre del residuo	Peso (kg)				Corriente
	2021	2022	2023	Total	
Piridina	0,10	1,30	-	1,40	Y42
Solventes orgánicos	3,16	5,62	-	8,78	Y42
Tetrahidrofurano	4,10	4,52	2,28	10,90	Y42
Verde de malaquita	-	3,24	-	3,24	Y12
Xileno – Tolueno	1,72	1,06	-	2,78	Y42
Xileno - Tolueno - Combustibles - Heptanos	17,40	71,25	29,66	118,31	Y42
TOTAL	243,35	370,47	303,26	917,08	

Nota. La tabla muestra la cantidad de residuos peligrosos producidos en los análisis muestrales del laboratorio.

4.1.2 Procedimiento de determinación de micronutrientes por espectrometría de absorción atómica por atomización de llama utilizando curvas de calibración preparadas con soluciones multielementales

En cuanto a la etapa media del proyecto, con base en los resultados obtenidos anteriormente, se analizó el proceso físico - químico en el que se generó la mayor cantidad de residuos peligrosos en el periodo establecido y se desarrolló una alternativa para disminuir los posibles residuos generados en el procedimiento de determinación de micronutrientes por espectrometría de absorción atómica por atomización de llama.

En el desarrollo de este procedimiento que se encuentra descrito en la metodología del proyecto, se obtuvieron los resultados presentes en la *tabla 9* para el manganeso (Mn) y el hierro (Fe), en cuanto a niveles de concentración y la absorbancia de cada uno de estos; tanto para la solución elemental, como para la solución multielemental (solución que contiene los dos elementos); es importante mencionar que estos resultados fueron determinados utilizando el espectrómetro. En cuanto a los niveles 8 y 9 de medición para el Mn no se reportan datos, puesto

que el intervalo lineal de medición para este elemento alcanza únicamente hasta el nivel 7 (concentración de 1,523 mg/kg).

Tabla 9.

Resultados de comparación de respuesta instrumental

Elemento	Longitud de onda (nm)	Nivel	Concentración (mg/kg)	Absorbancia	
				Elemental	Multielemental
Manganeso (Mn)	279,482	1	0,099	0,02357	0,02360
		2	0,312	0,06927	0,06992
		3	0,497	0,11181	0,11186
		4	0,896	0,19264	0,19309
		5	1,103	0,23723	0,23621
		6	1,271	0,26515	0,26501
		7	1,523	0,31056	0,31057
		8	-	-	-
		9	-	-	-
Hierro (Fe)	248,327	1	0,0984	0,00924	0,00928
		2	0,3104	0,02758	0,02761
		3	0,4951	0,04117	0,04092
		4	0,8928	0,07482	0,07515
		5	1,0987	0,09123	0,09121

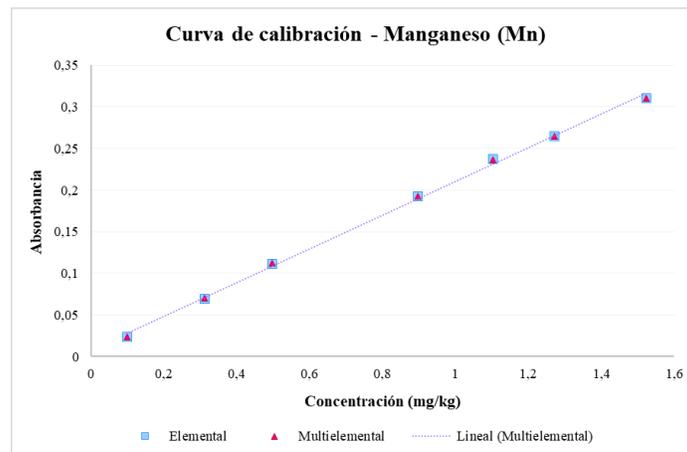
Elemento	Longitud de onda (nm)	Nivel	Concentración (mg/kg)	Absorbancia	
				Elemental	Elemental
Hierro (Fe)	248,327	6	1,2656	0,10490	0,10492
		7	1,5169	0,12216	0,12188
		8	1,7903	0,13850	0,13825
		9	1,9978	0,15231	0,15259

Nota. La tabla muestra los resultados de comparación de la respuesta instrumental.

Además, teniendo en cuenta los resultados de la tabla mencionada anteriormente, se realizaron las curvas de calibración para cada uno de los elementos en estudio (manganeso y hierro), las cuales se muestran en las *figuras 6 y 7* respectivamente.

Figura 6.

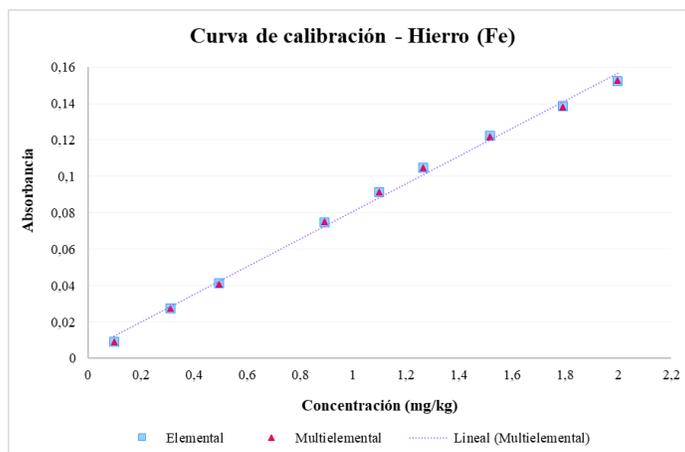
Curva de calibración para el Manganeso (Mn)



Nota. La figura muestra la curva de calibración para el manganeso, comparando las soluciones elementales y multielementales.

Figura 7.

Curva de calibración para el Hierro (Fe)



Nota. La figura muestra la curva de calibración para el hierro, comparando las soluciones elementales y multielementales.

4.1.3 Aprovechamiento de los residuos peligrosos

Finalmente, se analizaron todos los desechos producidos en el periodo evaluado con su respectivo peso, corriente, tratamiento y disposición final, con el objetivo de identificar que tipo de aprovechamiento se le puede otorgar a dichos residuos, por medio de revisiones bibliográficas.

Los residuos que más se generaron en el periodo de enero de 2021 a septiembre de 2023 fueron los pertenecientes a la corriente Y34 con un peso total de 394 kg, a los cuales se les realizó un tratamiento de desactivación química, para su disposición final en una celda de seguridad, como se muestra en la *tabla 10*.

Tabla 10.

Residuos del periodo evaluado (enero de 2021 - septiembre de 2023) con su respectivo tratamiento y disposición final

Nombre del residuo	Peso (kg)	Corriente	Tratamiento	Disposición final
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 III	3,78	A4140	Incineración	Celda de seguridad
Desechos de aceites minerales no aptos para el uso a que estaban destinados	85,99	Y8	Desactivación química	Celda de seguridad
Desechos resultantes de la producción, preparación y utilización de tintas, colorantes, pigmentos, pinturas, lacas o barnices	3,24	Y12	Desactivación química	Celda de seguridad
Desechos que tengan como constituyentes: Compuestos de zinc	1,78	Y23	Desactivación química	Celda de seguridad
Desechos que tengan como constituyentes: Soluciones ácidas o ácidos en forma sólida	394,00	Y34	Desactivación química	Celda de seguridad
Desechos que tengan como constituyentes: Soluciones básicas o bases en forma sólida	107,24	Y35	Desactivación química	Celda de seguridad
Desechos que tengan como constituyentes: Fenoles, compuestos fenólicos, con inclusión de clorofenoles	1,42	Y39	Desactivación química	Celda de seguridad
Desechos que tengan como constituyentes: Éteres	1,46	Y40	Desactivación química	Celda de seguridad
Desechos que tengan como constituyentes: Solventes orgánicos halogenados	2,28	Y41	Desactivación química	Celda de seguridad

Nombre del residuo	Peso (kg)	Corriente	Tratamiento	Disposición final
Desechos que tengan como constituyentes: Disolventes orgánicos, con exclusión de disolventes halogenados	315,89	Y42	Desactivación química	Celda de seguridad
TOTAL	917,08			

Nota. La tabla muestra los residuos del periodo evaluado (enero de 2021 - septiembre de 2023) con su respectivo tratamiento y disposición final.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

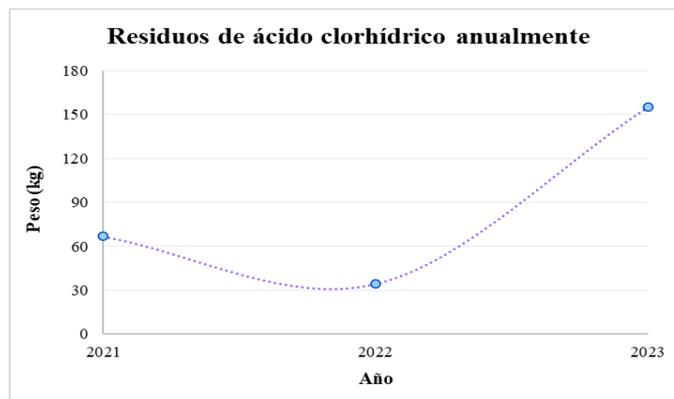
5.1 Plan de acción

5.1.1 Diagnóstico y clasificación de los residuos peligrosos

De acuerdo con los resultados presentes en la *tabla 8*, sobre los residuos peligrosos provenientes de las actividades del análisis muestral de laboratorio, se evidencia que en algunos años no se generan algunos residuos, mientras que en otros sí; esto se debe a dos motivos particulares; uno de los motivos es por el tipo de muestras que se reciben anualmente en el laboratorio puesto que es un sistema cíclico y el tipo de mercancía cambia constantemente, y el otro motivo es porque día a día las instalaciones del laboratorio van mejorando, y con estas, los equipos, tecnología y técnicas que se usan para el análisis de las muestras, por esto, la cantidad de residuos totales no tiene una tendencia lineal y cada año puede variar la generación de los mencionados desechos. Debido a que únicamente se reportan los valores anuales de la generación de los diferentes tipos de residuos, no es posible realizar un análisis estadístico para estos datos.

Figura 8.

Residuos generados de ácido clorhídrico en el periodo de tiempo establecido (enero de 2021 - septiembre de 2023)



Nota. La figura muestra los residuos generados de ácido clorhídrico en el periodo de tiempo establecido (enero de 2021 - septiembre de 2023).

En la *tabla 8*, correspondiente a los residuos peligrosos provenientes de las actividades del análisis muestral de laboratorio, se puede observar que el residuo que más se generó en el periodo de tiempo establecido fue el ácido clorhídrico (256.42 kg), el cual tuvo una disminución en el año 2022, con respecto al año 2021, pero aumentó exponencialmente en el año 2023, tal como se observa en la *figura 8*.

5.1.2 Procedimiento de determinación de micronutrientes por espectrometría de absorción atómica por atomización de llama utilizando curvas de calibración preparadas con soluciones elementales

Actualmente, el ácido clorhídrico es usado en el laboratorio para el proceso físico-químico de determinación de micronutrientes por espectrometría de absorción atómica por atomización de llama utilizando curvas de calibración con soluciones elementales; este procedimiento es una técnica analítica que se emplea para determinar la concentración de microelementos en una muestra por medio de la absorción de radiación electromagnética de átomos en fase gaseosa, que posteriormente utiliza una curva de calibración compuesta por soluciones elementales de concentraciones conocidas para establecer la concentración de oligoelementos en una muestra específica [27].

Esta técnica se realiza por medio de los siguientes pasos, en primer lugar se prepara la muestra por medio de digestión ácida para descomponerla en sus diferentes compuestos químicos con el objetivo de que los micronutrientes de interés estén dispuestos para el análisis [27]; en segundo lugar se genera la llama en un atomizador, comúnmente esta llama es de acetileno o de hidrógeno y se utiliza para convertir los elementos presentes de la muestra en átomos gaseosos [27]. En tercer lugar se introduce la muestra digerida en la llama para que sus compuestos químicos se conviertan en átomos individuales [27]; en cuarto lugar se utiliza una lámpara de cátodo hueco que emite radiación de una longitud de onda específica según el elemento utilizado, la cual es absorbida por los átomos de los elementos en la muestra (esta absorción es proporcional a la concentración de los elementos en la muestra) [27]. Finalmente, con el objetivo de cuantificar la concentración de los elementos, se preparan soluciones estándar con los elementos de interés en concentraciones conocidas, con estas soluciones se grafica una curva de calibración donde se

relaciona la absorción con la concentración de los elementos [27]; esta curva se usa para determinar la concentración de los elementos en la muestra.

Este procedimiento físico químico se utiliza en el laboratorio para analizar muestras tales como fertilizantes para suelos, alimentos y cualquier otro elemento que tenga algún tipo de trazas metálicas.

Para la realización del presente proyecto se llevó a cabo la técnica de determinación de absorción atómica por atomización de llama por medio de la curva de calibración preparada con soluciones elementales (proceso de análisis físico químico utilizado actualmente por el laboratorio) mediante el procedimiento establecido en la metodología del documento, donde cada una de las soluciones de los elementos se completó hasta el volumen final teniendo en cuenta la masa de alícuota pesada, como se evidencia en las *tablas 11 y 12*.

Tabla 11.

Masas para la preparación de las curvas de calibración con soluciones elementales de Hierro (Fe)

Elemento	Nivel	Masa alícuota (g)	Masa final (g)
Hierro (Fe)	1	0,17	30,27
	2	0,44	29,94
	3	0,71	29,62
	4	1,40	30,56
	5	1,72	30,79
	6	1,98	30,34
	7	2,17	29,23
	8	2,70	30,08

Elemento	Nivel	Masa alícuota (g)	Masa final (g)
Hierro (Fe)	9	3,04	30,45
Total (g)			271,28

Nota. La tabla muestra las masas para la preparación de las curvas de calibración con soluciones elementales de Hierro (Fe).

Tabla 12.

Masas para la preparación de las curvas de calibración con soluciones elementales de Manganeso (Mn)

Elemento	Nivel	Masa alícuota (g)	Masa final (g)
Manganeso (Mn)	1	0,12	29,72
	2	0,48	30,49
	3	0,73	30,26
	4	1,34	29,65
	5	1,69	29,97
	6	1,94	29,43
	7	2,22	30,32
	8	2,68	29,80
	9	2,99	29,54
Total (g)			269,18

Nota. La tabla muestra las masas para la preparación de las curvas de calibración con soluciones elementales de Manganeso (Mn).

Así mismo, con base en las masas finales de cada elemento, destinadas para la preparación de las curvas de calibración, se determinó que el consumo de reactivo total mediante el método actual utilizado en el laboratorio aduanero (determinación de absorción atómica por atomización de llama por medio de la curva de calibración preparada con soluciones elementales) fue de 540,46 g.

Tabla 13.

Consumo de reactivo

Elemento	Masa final (g)
Manganeso (Mn)	269,18
Hierro (Fe)	271,28
Total (g)	540,46

Nota. La tabla muestra el consumo de reactivo de la determinación de absorción atómica por atomización de llama, preparada con soluciones elementales.

5.1.3 Procedimiento de determinación de micronutrientes por espectrometría de absorción atómica por atomización de llama utilizando curvas de calibración preparadas con soluciones multielementales

Con la finalidad de establecer una alternativa de disminución del ácido clorhídrico como parte del plan de acción para optimizar el procedimiento de absorción atómica por atomización de llama, se desarrolló el procedimiento descrito en la metodología sobre la determinación de micronutrientes por espectrometría de absorción atómica, por medio de atomización de llama utilizando curvas de calibración preparadas con soluciones multielementales; estos métodos analíticos se integraron en un solo procedimiento, puesto que la única forma de disminuir los residuos peligrosos de ácido clorhídrico en esta técnica es directamente en su preparación, debido a que, al unir los elementos que se quieren determinar en cada una de las soluciones de los respectivos niveles, se disminuye la cantidad de reactivo empleado, en comparación con las soluciones preparadas con cada oligoelemento por separado.

Para determinar la concentración de oligoelementos o micronutrientes en una muestra, es necesario utilizar una curva de calibración. Esta curva se construye graficando la absorbancia en función de la concentración conocida de micronutrientes en una solución de múltiples elementos [28]. Dicha curva se emplea para ser comparada con la absorbancia estándar de la muestra y poder definir así la concentración de ésta [28].

Este método tiene diferentes ventajas; entre estas se destacan la eficiencia en el análisis puesto que el uso de soluciones multielementales en las curvas de calibración permite analizar varios micronutrientes al mismo tiempo, agilizando así el proceso de determinación de estos [29]. Asimismo, al utilizar soluciones multielementales se reduce la necesidad de preparar y analizar muestras individuales para cada micronutriente, ahorrando así tiempo y recursos en comparación con las soluciones elementales [29]. Así mismo, la utilización de soluciones multielementales en las curvas de calibración puede mejorar la precisión y exactitud de los resultados, por lo que permite corregir posibles interferencias entre los diferentes elementos analizados [29]. Además, se requieren menos reactivos al preparar una solución multielemental comparado con las soluciones individuales para cada elemento [29].

Sin embargo, a pesar de sus ventajas, también cuenta con algunas desventajas tales como una mayor complejidad en la preparación de las soluciones de calibración puesto que la preparación de soluciones multielementales puede ser más compleja y requerir un mayor cuidado en comparación con las soluciones elementales, debido a que se debe tener en cuenta las concentraciones adecuadas de cada micronutriente [29] y también, al analizar varios micronutrientes al mismo tiempo, existe la posibilidad de que se produzcan interferencias entre los elementos, afectando así la precisión de los resultados [29]. Es importante aclarar que la adaptación del procedimiento de determinación de micronutrientes mediante espectrometría de absorción atómica, por atomización de llama utilizando curvas de calibración preparadas con soluciones multielementales no se había utilizado con anterioridad en el laboratorio, puesto que la cantidad de muestras que llegaban para ser analizadas por el método de absorción atómica era muy pequeña y por lo tanto no se gastaban tantos recursos; pero actualmente, debido a que esta cifra va en aumento, es necesario implementar este método para optimizar el tiempo de análisis muestral, ahorrar dichos recursos y disminuir la generación de residuos.

Tabla 14.

Masas para la preparación de las curvas de calibración con soluciones multielementales de hierro (Fe) y manganeso (Mn)

Nivel	Masa alícuota - Fe (g)	Masa alícuota - Mn (g)	Masa final (g)
1	0,16	0,13	29,98
2	0,43	0,49	30,22
3	0,70	0,74	29,94
4	1,39	1,35	30,11
5	1,71	1,70	30,38
6	1,97	1,95	29,89
7	2,16	2,23	29,78
8	2,69	2,69	29,97
9	3,03	3,01	29,99
Total (g)			270,26

Nota. La tabla muestra las masas para la preparación de las curvas de calibración con soluciones multielementales de hierro (Fe) y manganeso (Mn).

Tabla 15.

Masas para la preparación de las curvas de calibración con soluciones multielementales de hierro (Fe) y manganeso (Mn)

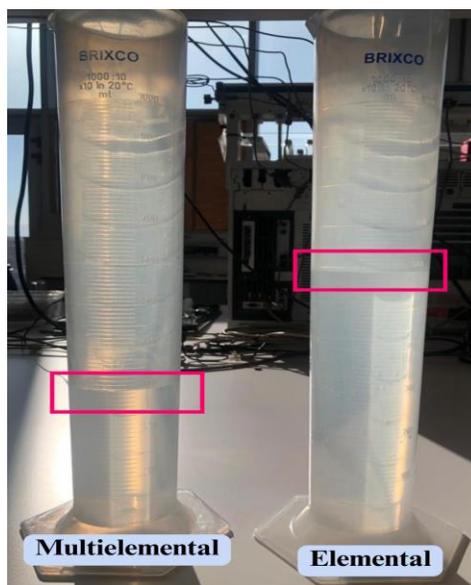
Método	Masa final de residuos producidos (g)
Procedimiento con soluciones elementales	540,46
Procedimiento con soluciones multielementales	270,26

Nota. La tabla muestra las masas para la preparación de las curvas de calibración con soluciones multielementales de hierro (Fe) y manganeso (Mn).

Del mismo modo, para la realización de este método se aplicó el procedimiento establecido en la metodología de este proyecto, donde cada una de las soluciones multielementales (compuestas por Mn y Fe) se completó hasta el volumen final teniendo en cuenta la masa de la alícuota que se pesó con anterioridad, como se evidencia en la *tabla 14*. El consumo de reactivo total mediante este método (determinación de micronutrientes mediante espectrometría de absorción atómica, por atomización de llama utilizando curvas de calibración preparadas con soluciones multielementales) fue de 270,26 g.

Figura 9.

Comparación de los residuos producidos en el desarrollo de ambos métodos



Nota. La figura muestra la comparación de los residuos producidos en el desarrollo de ambos métodos (curvas preparadas con soluciones elementales y multielementales).

Con base en los datos extraídos de la masa final de residuos obtenidos de las *tablas 11,12 y 14*, se estableció una comparación entre los residuos totales generados por ambos métodos (*tabla 15*) mediante una regla de tres; y se determinó que aplicando el procedimiento de determinación de micronutrientes mediante espectrometría de absorción atómica por atomización de llama utilizando curvas de calibración preparadas con soluciones multielementales, se reduce la cantidad de residuos producida en un 50,01%, como se evidencia en la *figura 9*.

$$\frac{270,26 \text{ g} \times 100}{540,46 \text{ g}} = 50,01\%$$

Es importante mencionar que no se puede cuantificar la cantidad de residuos totales que se redujeron, puesto que en la Subdirección del Laboratorio Aduanero de la U.A.E DIAN únicamente se tiene un control anual de los residuos producidos en cada una de las áreas del laboratorio. Es por esto que con el plan de acción se quiere implementar un monitoreo y registro mensual de dichos residuos, para poder tener un control sobre la generación y/o disminución de los mismos. Sin embargo, de acuerdo con el porcentaje de reducción de los residuos obtenido anteriormente, se espera una reducción anual de más de la mitad de los desechos generados en la técnica de absorción atómica.

El objetivo de usar este método analítico (determinación de micronutrientes mediante espectrometría de absorción atómica por atomización de llama) es precisar la concentración de micronutrientes en diferentes tipos de muestras, como suelos, agua y alimentos; pero para poder determinar esto, es necesario emplear curvas de calibración con el objetivo de relacionar la intensidad de la absorción de la radiación con la concentración de los elementos de interés (hierro y manganeso) en la muestra.

Las curvas de calibración son necesarias en la determinación de micronutrientes mediante espectrometría de absorción atómica por atomización de llama puesto que permiten establecer una relación cuantitativa entre la concentración de un elemento en particular y la absorción determinada por el espectrómetro [30]. Estas curvas se grafican utilizando soluciones estándar de las concentraciones conocidas del elemento, mediante la cuales se obtiene una serie de puntos que

se utilizan para trazar dicha curva de calibración [30]. Esta curva se utiliza posteriormente para determinar la concentración desconocida del elemento (Mn y Fe en este caso) en una muestra, al comparar la absorción definida con la de la curva de calibración establecida; es por esto que los valores deben ser bastante precisos.

Por tal motivo, es importante determinar el sesgo absoluto (*ecuación 1*) y relativo (*ecuación 2*) de los valores obtenidos de la absorbancia para cada uno de los niveles definidos, teniendo en cuenta las mediciones ejecutadas con las soluciones multielementales, en comparación con los valores obtenidos de las mediciones realizadas con las soluciones elementales.

Tabla 16.

Sesgos relativos y absolutos de las absorbancias determinadas por medio de soluciones elementales y multielementales

Elemento	Nivel	Absorbancia		Sesgo absoluto	Sesgo relativo (%)
		Elemental	Multielemental		
Manganeso (Mn)	1	0,02357	0,02360	0,00003	0,127
	2	0,06927	0,06992	0,00065	0,938
	3	0,11181	0,11186	0,00005	0,045
	4	0,19264	0,19309	0,00045	0,234
	5	0,23723	0,23621	0,00102	0,430
	6	0,26515	0,26501	0,00014	0,053
	7	0,31056	0,31057	0,00001	0,003
	8	-	-	-	-
	9	-	-	-	-

Elemento	Nivel	Absorbancia		Sesgo absoluto	Sesgo relativo (%)
		Elemental	Elemental		
Hierro (Fe)	1	0,00924	0,00928	0,00004	0,433
	2	0,02758	0,02761	0,00003	0,109
	3	0,04117	0,04092	0,00025	0,607
	4	0,07482	0,07515	0,00033	0,441
	5	0,09123	0,09121	0,00002	0,022
	6	0,10490	0,10492	0,00002	0,019
	7	0,12216	0,12188	0,00028	0,229
	8	0,13850	0,13825	0,00025	0,181
	9	0,15231	0,15259	0,00028	0,184

Nota. La tabla muestra los sesgos relativos y absolutos de las absorbancias determinadas por medio de soluciones elementales y multielementales.

Ecuación 1.

Sesgo absoluto

$$\text{Sesgo abs.} = |\text{Valor medido con sol. multielementales} - \text{valor medido con sol. elementales}|$$

Nota. La ecuación denota la fórmula para calcular el sesgo absoluto.

Ecuación 2.

Sesgo relativo

$$\text{Sesgo rel.} = \frac{|\text{Valor medido con sol. multielementales} - \text{valor medido con sol. elementales}|}{\text{Valor medido con sol. elementales}}$$

Nota. La ecuación denota la fórmula para calcular el sesgo relativo

Los valores obtenidos de los sesgos absolutos y relativos se encuentran reportados en la *tabla 16*. Con base en estos valores se determina que por ser cifras menores al 1%, el porcentaje de error relativo es mínimo y por lo tanto, aplicar el procedimiento de determinación de micronutrientes mediante espectrometría de absorción atómica, por atomización de llama utilizando curvas de calibración preparadas con soluciones multielementales como plan de acción es una alternativa viable para disminuir los residuos producidos en los análisis muestrales de absorción atómica (proceso que mayor cantidad de residuos generó en el periodo establecido de enero 2021 a septiembre de 2023).

5.1.4 Capacitación y divulgación

Como parte del diseño del presente plan de acción para disminuir los residuos peligrosos de ácido clorhídrico generados en el proceso analítico de espectrometría de absorción atómica por atomización de llama, es necesario divulgar el procedimiento de determinación de micronutrientes utilizando curvas de calibración preparadas con soluciones multielementales y capacitar al personal en el desarrollo de este método con el objetivo de poder llevar a cabo la implementación de este.

En esta etapa del plan de acción se deben realizar evaluaciones sobre el conocimiento aplicado al uso de curvas de calibración elaboradas a partir de soluciones multielementales, y las habilidades existentes que tienen los expertos técnicos que pertenecen al área de absorción atómica sobre la ejecución de este método. Así mismo, se deben desarrollar campañas de concientización sobre la importancia que tiene la disminución de estos residuos en las actividades ejecutadas por el laboratorio en cuanto a la reducción de los costos operativos y la disminución del impacto ambiental negativo, con base en la contaminación del suelo, el aire, el agua y la biodiversidad.

Además, durante la realización de la mencionada capacitación, es importante asegurarse que los expertos técnicos tengan acceso a los recursos necesarios y reciban el apoyo adecuado para la ejecución del presente procedimiento. Esto puede incluir la asignación de personal capacitado, la provisión de materiales para la capacitación y la programación de sesiones de seguimiento.

5.1.5 Monitoreo y mejora continua

En cuanto al monitoreo y la mejora continua, después de llevar a cabo la capacitación y divulgación del procedimiento, es importante evaluar los resultados para determinar su efectividad. En esta etapa se debe controlar y verificar la disminución del consumo del reactivo (ácido clorhídrico) mensualmente, así como realizar una recopilación de la retroalimentación de los expertos técnicos sobre el funcionamiento del método y ejecutar los cambios necesarios en el desempeño de dicho procedimiento para la determinación de micronutrientes en las diferentes muestras recibidas por el laboratorio, que necesiten ser sometidas a este tipo de análisis físico - químico.

Finalmente, si se evidencia un correcto funcionamiento y disminución, mediante este procedimiento, se puede revisar qué otros métodos experimentales producen una cantidad de reactivo cercana y proponer diversas alternativas para la disminución de estos.

5.1.6 Aprovechamiento de los residuos peligrosos

Para concluir, los residuos que más se generaron en el periodo de enero de 2021 a septiembre de 2023 fueron los pertenecientes a las corriente Y34 con un peso total de 394 kg, a los cuales se les realizó un tratamiento de desactivación química, para su posterior disposición final en una celda de seguridad, según lo especificado en los certificados de disposición que dan cumplimiento a cada uno de los contratos anuales mencionados anteriormente, otorgados por las empresas encargadas de la recolección de estos residuos.

Por tal motivo se seleccionó el ácido clorhídrico, perteneciente a la corriente de desecho Y34, para plantear un proceso de aprovechamiento, con el objetivo de completar el plan de acción con base en el desarrollo del procedimiento de determinación de micronutrientes mediante espectrometría de absorción atómica por atomización de llama, utilizando curvas de calibración multielementales.

Actualmente, existen dos métodos funcionales para eliminar las trazas metálicas del ácido clorhídrico, el intercambio iónico mediante el uso de resinas y un tratamiento con ácido nítrico. El intercambio iónico mediante el uso de resinas es un procedimiento que comprende la aplicación de polímeros (resinas aniónicas y catiónicas) para el intercambio iónico entre un líquido y un sólido [31]. Estas resinas tienen una amplia variedad de usos tales como la purificación del agua, la eliminación de durezas, la desalcalinización, la desmineralización y la desionización, entre otras [31]. En cuanto a el tratamiento con ácido nítrico, este consiste en usar el ácido mencionado anteriormente para desionizar de forma rápida las posibles trazas metálicas que se encuentran en los residuos de ácido clorhídrico [32].

Debido a que el tratamiento con ácido nítrico se utiliza únicamente para muestras pequeñas y que al mezclarse con el ácido clorhídrico puede cambiar su composición [32]. Por lo tanto, el método más adecuado para ser utilizado es el intercambio iónico, puesto que al ser un proceso que implica el intercambio de iones entre un sólido y un líquido, no ocurre un cambio estructural en ninguno de estos, conservando así la composición adecuada del ácido clorhídrico [31]. El proceso de intercambio iónico para eliminar las mencionadas trazas metálicas del ácido clorhídrico se evidencia en el diagrama de flujo de la *figura 10*. A continuación se especifica el proceso para llevar a cabo este método.

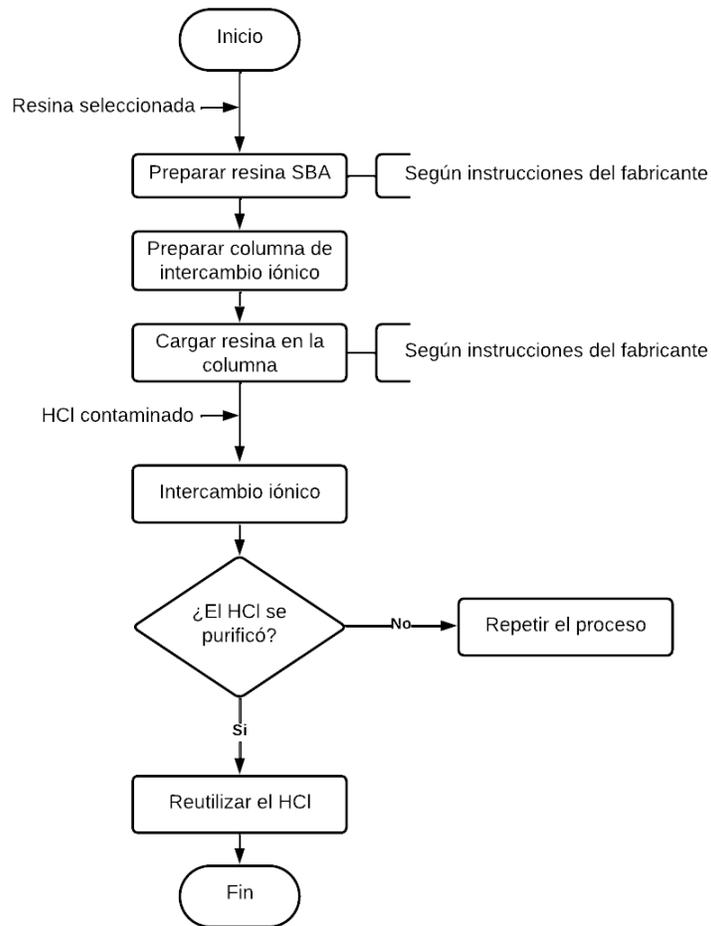
El primer paso es preparar la resina para llevar a cabo el intercambio iónico, para esto se utiliza una resina que tenga afinidad con los metales disueltos en el ácido. En el caso del ácido clorhídrico es necesario utilizar una resina de anión base fuerte SBA, entre las que se destacan el poliestireno gel tipo I, el poliestireno macro poroso tipo I, el poliestireno gel tipo II, el poliacrílico gel y el poliacrílico gel de funcionalidad doble, entre otros (el tipo de resina se selecciona dependiendo los metales que se quieran eliminar); la resina se debe preparar según las instrucciones del fabricante. Así mismo, se debe preparar una columna de intercambio iónico donde se colocará la resina. Esta columna puede ser de vidrio y debe tener una entrada para el ácido clorhídrico contaminado y una salida para el ácido clorhídrico purificado. Seguido de esto, la resina seleccionada para realizar el intercambio iónico se carga en la columna. La carga de la resina en la columna se puede hacer siguiendo las indicaciones del fabricante de la resina.

Continuando con el proceso, el ácido clorhídrico que contiene trazas metálicas se hace pasar a través de la columna de intercambio iónico. A medida que el ácido clorhídrico fluye a través de la resina, los iones metálicos presentes en el ácido clorhídrico se intercambian por los iones Cl⁻ de la resina. Finalmente, el ácido clorhídrico purificado, libre de trazas metálicas, se recoge en la salida de la columna de intercambio iónico para poder ser aprovechado nuevamente. En el caso del laboratorio aduanero, se puede reutilizar en el lavado del material puesto que, este ácido también se utiliza para limpiar el material que se emplea en los ensayos muestrales de espectrometría de absorción atómica para solubilizar los posibles rastros de metales que hayan podido permanecer en el material.

Es importante destacar que las estrategias de producción más limpia son un factor fundamental para reducir el impacto ambiental, promover la sostenibilidad y mejorar la eficiencia en el uso de recursos por parte de la Subdirección del Laboratorio Aduanero de la U.A.E DIAN. Es por esto que al llevar a cabo el intercambio iónico para la eliminación de trazas metálicas en el ácido clorhídrico, para posteriormente ser reintegrado en la técnica de absorción atómica para realizar el lavado del material, se estaría haciendo uso eficiente de la producción más limpia, reduciendo así considerablemente la cantidad de desechos y/o contaminantes generados en dicho análisis muestral, lo que contribuye a su vez a la protección y conservación del medio ambiente. Además, con esta producción más limpia se puede mejorar la gestión ambiental en la entidad, conllevando así a una mejora en la competitividad en cuanto a sostenibilidad ambiental.

Figura 10.

Diagrama de flujo del proceso de intercambio iónico.



Nota. La figura muestra el diagrama de flujo del proceso de intercambio iónico.

6. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados del presente proyecto, se estableció el procedimiento de determinación de micronutrientes utilizando curvas de calibración preparadas con soluciones multielementales para disminuir los residuos peligrosos generados en el proceso de espectrometría de absorción atómica, por atomización de llama, ejecutado por la Subdirección del Laboratorio Aduanero de la U.A.E. DIAN, para el análisis muestral de alimentos, aleaciones metálicas y textiles, entre otros.

Así mismo, se determinó que los laboratorios de metales, alimentos y textiles fueron las áreas específicas de la Subdirección del Laboratorio Aduanero de la U.A.E DIAN en las que se generaron mayor cantidad de residuos peligrosos en el periodo de tiempo definido de enero de 2021 a septiembre de 2023, mediante el proceso de espectrometría de absorción atómica.

Teniendo en cuenta los datos reportados sobre los residuos producidos, se analizó el proceso de espectrometría de absorción atómica por atomización de llama, puesto que fue el método en el que se generó mayor cantidad de residuos peligrosos en el Laboratorio Aduanero para el periodo de tiempo delimitado (enero de 2021 a septiembre de 2023).

Tal y como se comprobó en el análisis de resultados, se diseñó un plan de acción con el que se decrecieron los residuos peligrosos del proceso de espectrometría de absorción atómica un 50,01% (proceso en el cual se produjo la mayor cantidad de residuos peligrosos en el periodo de tiempo establecido), aplicando el procedimiento de determinación de micronutrientes por medio de curvas de calibración preparadas con soluciones multielementales; el cual tuvo un sesgo relativo menor al 1%, representando así una alternativa viable para la disminución de los mencionados residuos.

Finalmente se identificó y describió por medio de revisión bibliográfica el proceso de intercambio iónico, como alternativa para el aprovechamiento de los residuos de ácido clorhídrico con trazas metálicas, para su posterior uso en el lavado del material empleado en los análisis muestrales de espectrometría de absorción atómica.

REFERENCIAS

- [1] Brochure DIAN - NAF. (2019, julio). www.dian.gov.co. Recuperado el 24 de septiembre de: <https://www.dian.gov.co/atencionciudadano/Naf/InformacionGeneral/Documents/Brochure%20DIAN-NAF%20-%20feb%202019.pdf>.
- [2] Presentación. La Entidad. (s. f.). Recuperado el 24 de septiembre de 2023 de: <https://www.dian.gov.co/dian/entidad/Paginas/Presentacion.aspx>.
- [3] Giraldo Tuberquia, E. F. (2021). Definición de parámetros para la creación de un archivo fotográfico en la Unidad Administrativa Especial Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales–UAE-DIAN-Medellín.
- [4] Organigrama de la U.A.E DIAN. (s. f.). Recuperado el 24 de septiembre de 2023 de: <https://www.dian.gov.co/dian/entidad/Paginas/Organigrama.aspx>.
- [5] Decreto 1742 de 2020 - Gestor normativo. (s. f.). Función Pública. Recuperado el 24 de septiembre de 2023.
- [6] Residuos peligrosos - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022, 2 junio). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Recuperado el 24 de septiembre de 2023 de: <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/residuos-peligrosos/>.
- [7] Informe Nacional de Residuos o Desechos Peligrosos en Colombia. (s. f.). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM . Recuperado el 24 de septiembre de 2023.
- [8] Guía Práctica para la Elaboración e Implementación de Planes de Gestión Integral de Residuos en el Laboratorio. (s. f.). Instituto Nacional de Salud, Ministerio de Salud. (2013). Recuperado el 24 de septiembre de 2023.

- [9] Manual de Gestión Integral de Residuos. (s. f.). Instituto Nacional de Salud. Ministerio de Ambiente. (2010). Recuperado el 24 de septiembre de 2023.
- [10] Riojas-Rodríguez, H., Schilman, A., López-Carrillo, L., & Finkelman, J. (2013). La salud ambiental en México: situación actual y perspectivas futuras. *Salud pública de México*, 55(6), 638-649. Recuperado el 24 de septiembre de 2023.
- [11] Resolución 631 de 2015 - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021, 8 noviembre). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Recuperado el 24 de septiembre de 2023.
- [12] Zúñiga-Lemus, O., Sánchez-Meraz, J. A., González-Montiel, L., & González-González, J. S. (2015). Conocimiento sobre el manejo de residuos peligrosos biológico e infecciosos en la Universidad de la Cañada. *Revista Salud y Administración*, 2(4), 37-45.
- [13] UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA, S de G. 2016. Control de Gestión 110816. [Sitio web]. Chile. Sec. Publicaciones. (2016). Archivo pdf. Recuperado el 24 de septiembre de 2023.
- [14] Residuos peligrosos - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022, 2 junio). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Recuperado el 24 de septiembre de 2023 de: <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-yurbana/residuospeligrosos/>.
- [15] Moreno Bacca, G. M., & Moran Delgado, V. A. (2015). Formulación del plan de gestión integral de residuos o desechos peligrosos en el departamento de Nariño.
- [16] Ministerio del Interior de Colombia. (2022). Guía para la elaboración del plan de gestión integral de residuos peligrosos 2020-2024 [PDF]. Recuperado el 24 de septiembre de 2023 de: https://www.mininterior.gov.co/wpcontent/uploads/2022/09/guia_plan_de_gestion_integral_de_residuos_peligrosos_20202024.pdf.

- [17] Umaña Villalba, M. P. (2017). Formulación e implementación del Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) y el Plan de Gestión Integral de Residuos Peligrosos (PGIRESPEL) para la Empresa Duquesa SA.
- [18] DE BOGOTÁ, Cámara de Comercio, et al. Ley 99 de 1993 Sobre Licencias Ambientales. 2010. Recuperado el 22 de septiembre de 2023.
- [19] Sostenible, S. A. (2015). Decreto 1076 de 2015. Recuperado el 21 de mayo de 2023.
- [20] Camacho, J. C. E., & Sánchez, J. C. (2016). Publicación de cartilla sobre Resolución 0631 de 2015 acerca de vertimientos. Boletín El Palmicultor.
- [21] Resolución 1486 de 2017 - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021, 9 noviembre). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Recuperado el 21 de mayo de 2023.
- [22] Resolución 909 del 2008 - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021, 27 diciembre). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Recuperado el 21 de mayo de 2023.
- [23] Gallegos, W., Vega, M., & Noriega, P. (2012). Espectroscopía de absorción atómica con llama y su aplicación para la determinación de plomo y control de productos cosméticos. La Granja, 15(1), 19-29. Recuperado el 19 de octubre de 2023.
- [24] Martínez Guijarro, M. (2020). Análisis Instrumental. Espectrometría de Absorción Atómica (EAA). Recuperado el 19 de octubre de 2023.
- [25] Morand, E. E., Giménez, M. C., Benitez, M. E., & Garro, O. A. Determinación de arsénico en agua por espectrometría de absorción atómica con generación de hidruro (HG-AAS). Reunión de Comunicaciones Científicas y Tecnológicas UNNE. Recuperado el 19 de octubre de 2023.

- [26] Vesser, Deon. *Espectroscopia de absorción atómica, principios y aplicaciones*. (2021, 16 diciembre). Análisis y separaciones. Recuperado el 19 de octubre de 2023.
- [27] Bustos Forero, D. E. (2022). Análisis por dilución estándar automatizado (SDA) para la determinación de Li, Cr y Ni utilizando espectrometría de absorción atómica de llama de fuente continua de alta resolución (HR-CS-FAAS). Recuperado el 27 de octubre de 2023.
- [28] Chávez Carrillo, F. E. Determinación multielemental de macro y micronutrientes catiónicos en suelos por espectroscopía de emisión por acoplamiento de plasma inductivo y detección óptica de ICP-OES (Bachelor 's thesis, Quito/PUCE). Recuperado el 5 de noviembre de 2023.
- [29] Cacuango Pumisacho, L. H. Determinación multielemental de macro y micronutrientes catiónicos en tejidos vegetales de banano, palma y rosas, por espectroscopía de emisión por acoplamiento de plasma inductivo y detección óptica (ICP-OES) (Bachelor's thesis, PUCE). Recuperado el 11 de noviembre de 2023.
- [30] Sabino Ramos, A. Determinación de fierro y cobre en alimentos: maca (*lepidium peruvianum*), muña (*minthostachys mollis*) y cañihua (*chenopodium pallidicaule*) por espectroscopía de absorción atómica a la llama. Recuperado el 16 de noviembre de 2023.
- [31] Cortijo-Herrera, D. Des alcalinización del agua mediante intercambio iónico. *Ingeniería Industrial*, (031), 221-238.
- [32] Martínez, M. T., Callejas, M. A., Benito, A. M., Cochet, M., Seeger, T., Anson, A., ... & Máster, W. K. Cambios inducidos en nanotubos de carbono de capa única durante los procesos de purificación. *BOLETÍN-SOCIEDAD ESPAÑOLA DE CERÁMICA Y VIDRIO*, 43(2), 524-526.
- [33] Decreto 4741 de 2005 - Gestor normativo. (s. f.). Función Pública. Recuperado de: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=18718>.

[34] Anexo 1. Tablas resumen de clasificación y etiquetado. Naciones Unidas ONU. Recuperado de: https://unece.org/DAM/trans/danger/publi/ghs/ghs_rev05/Spanish/05sp_Annex1.pdf.