

R C Q

Revista Colombiana de Química





VOL. 53 NÚM. 1 - 2024

Revista Colombiana de Química

Revista semestral del Departamento de Química
Facultad de Ciencias

© Universidad Nacional de Colombia, Bogotá

ISSN: 0120-2804

ISSN-e: 2357-3791

DOI: <http://dx.doi.org/10.15446/rev.colomb.quim>

Correo electrónico: rcolquim_fcbog@unal.edu.co

Indexada

Publindex - Índice Bibliográfico Nacional (categoría C)

Scielo Colombia

Scopus Q4 (SJR/2024: 0,109)

Redalyc

Chemical Abstracts Service (CAS) Source Index

Latindex

Directory of Open Access Journals (DOAJ)

BIBLAT

Dialnet

Consulta Open Access

Todos los ejemplares de la Revista Colombiana de Química se encuentran disponibles en estos sitios web:

<https://revistas.unal.edu.co/index.php/rcolquim/index>

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_serial&pid=0120-2804

<http://www.redalyc.org/revista.oe?id=3090>

El contenido se encuentra bajo una licencia de Creative Commons tipo Atribución Internacional (CC BY 4.0) que permite el acceso abierto con cualquier fin, siempre que se de el reconocimiento apropiado

Director de la revista

Carlos Eduardo Narváez Cuenca, Ph. D
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá

Asistentes editoriales

Angie Carolina Guevara
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá
Carolina Gómez Pulido
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá

Comité editorial y científico

Sonia Moreno Guaquetá
Universidad Nacional de Colombia, Colombia
Hector Fabio Zuluaga Corrales
Universidad del Valle, Colombia
Juscelino Tovar
Lund University, Suecia
Leonardo Castellanos Hernández
Universidad Nacional de Colombia, Colombia
Francisco Carrasco Marín
Universidad de Granada, España
Cristian Ochoa Puentes
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Preparación editorial

Corrección de estilo:
Angie Carolina Guevara y Carolina Gómez Pulido
Diseño y maquetación:
Carolina Gómez Pulido
Diseño de cubierta:
Damian Medina Crofort
Fotografía de la cubierta:
Divulgación y Medios - Fac. Ciencias



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Química Orgánica y Bioquímica

Integración de la química verde en el currículo educativo: un enfoque sostenible

3-12

Integrating green chemistry into the educational curriculum: A sustainable approach
Integrando a química verde no currículo educacional: uma abordagem sustentável
Lipselotte de Jesús Infante Rivera, Miriam Vilca Arana, Ruth Katherine Mendivel Gerónimo, David Raúl Hurtado Tiza y Edwin Huamán Gómez

Educación química para la sostenibilidad en áreas residenciales: mitigación de desechos peligrosos y promoción de un entorno ambientalmente seguro

13-20

Chemical education for sustainability in residential areas: hazardous waste mitigation and promotion of an safe environment
Educação química para a sustentabilidade em áreas residenciais: mitigação de resíduos perigosos e promoção de um ambiente seguro
Rosario Mercedes Chuquillanqui Galarza, Elsy Sara Carhuachuco Rojas, José Luis Medina Aliaga, Glenda Judy Vela Urbina y Giovana Olivera Zurita

Promoviendo la educación sobre sustancias químicas y su impacto en el ambiente: un enfoque para la salud humana

21-28

Promoting education about chemicals and their impact on the environment: An approach to human health
Promover a educação sobre os produtos químicos e o seu impacto no ambiente: uma abordagem a saúde humana
Elsy Sara Carhuachuco Rojas, Eva Arenales López, Dulio Oseda Gago, Giovana Olivera Zurita y Glenda Judy Vela Urbina

Fisicoquímica y Química Inorgánica

Simulation of electronic structure and excited states of a chlorophyll-A system

29-36

Simulación de estructura electrónica y estados excitados del sistema molecular clorofila-A
Simulação da estrutura eletrônica e estados excitados do sistema molecular da clorofila-A
Daniel Alejandro Rivas Velásquez y Anton Shurygin Vladimirovich

Metrostat: desarrollo de potenciostato asequible con Arduino para experimentos electroquímicos

37-44

Metrostat: Development of an affordable potentiostat with Arduino for electrochemical experiments
Metrostat: Desenvolvimento de potenciostato acessível com Arduino para experimentos eletroquímicos
Jean Carlos Calderon Araujo, José Manuel Barriola Damborenea, Nancy Confortti de Pérez, Rosa Maria Rodriguez Bengoechea, Roberto Réquiz Cordero y Miguel Manuel Pérez Hernández

Química Aplicada y Analítica

Analysis of the presence of microplastics in different brands of bottled water in region 6 - Ecuador

45-49

Análisis de la presencia de microplásticos en diferentes marcas de agua embotellada en la región 6 - Ecuador
Análise da presença de microplásticos em diferentes marcas de água engarrafada na região 6 - Equador
Pablo Wilson Arévalo Moscoso, Ximena Jamileth Cajamarca Rivadeneira, Karen Gabriela Orozco Gualoto, Jenniffer Eliana Flores Calle and Paula Gabriela Brito Lopez



¹Universidad Adventista de Chile. Universidad Continental. Huancayo, Perú. linfante@continental.edu.pe

²Universidad Nacional San Luis Gonzaga. Ica, Perú. miriam.vilca@unica.edu.pe

³Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú. rmendivelg@unmsm.edu.pe

⁴Universidad Nacional Autónoma Altoandina de Tarma. Tarma, Perú. dhurtado@unaat.edu.pe

⁵Universidad Nacional Intercultural de la Amazonia. Pucallpa, Perú. ehuamang@unia.edu.pe

*Autor para correspondencia: linfante@continental.edu.pe

Recibido: 11/06/2024. Última revisión: 09/10/2024. Aceptado: 21/10/2024.

Integración de la química verde en el currículo educativo: un enfoque sostenible

Resumen

La educación es uno de los principales Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para avanzar en los cambios que requiere la humanidad. El objetivo del presente artículo es estudiar la integración de la química verde en el currículo educativo como un mecanismo para avanzar en el desarrollo sostenible. Metodológicamente, el estudio consistió en una revisión teórica de diversas fuentes bibliográficas que abordan la importancia de cambiar el diseño curricular en los diferentes niveles educativos de las naciones. Los hallazgos apuntaron a que existe una necesidad de realizar transformaciones educativas para fortalecer el desarrollo de los principios de la química verde que contribuyan al cuidado del ambiente y a generar una conciencia social para dar respuesta a los desafíos de la sostenibilidad. Entre las conclusiones más importantes se encuentra que la química verde se ha venido integrando en diversos campos universitarios; sin embargo, se requiere aumentar su difusión y aplicación en otros niveles educativos para fortalecer el enfoque de la sostenibilidad en el desarrollo de una sociedad comprometida con el bienestar de las generaciones futuras.

Palabras clave: currículo educativo; enfoque sostenible; química verde.

Integrating green chemistry into the educational curriculum: A sustainable approach

Abstract

Education is one of the main Sustainable Development Goals (SDG) to advance in the changes required by humanity. The objective of this article is to study the integration of green chemistry in the educational curriculum as a mechanism for the development of the sustainable approach. Methodologically, the study consists of a theoretical review of various bibliographic sources in which the importance of changes in the curricular design of educational levels in nations is highlighted. The findings pointed out that there is a need to insert educational transformations to advance in the development of the principles of green chemistry, contributing to the care of the environment and social awareness to respond to the challenges of sustainability. Among the most important conclusions we highlight that integration has been developing in various university fields. However, it is necessary to increase its dissemination and application in other educational levels to strengthen the focus of sustainability in the development of a society committed to the well-being of future generations.

Keywords: Educational curriculum; sustainable approach; green chemistry.

Integrando a química verde no currículo educacional: uma abordagem sustentável

Resumo

A educação é um dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) para avançar nessas mudanças que a humanidade exige. O objetivo deste artigo é estudar a integração da química verde no currículo educacional como mecanismo para promover o desenvolvimento sustentável. Metodologicamente, o estudo consiste em uma revisão teórica de diversas fontes eletrônicas que destacam a importância de mudanças no desenho curricular dos níveis educacionais nas nações. Os achados indicaram que há necessidade de inserir transformações educacionais para avançar no desenvolvimento dos princípios da química verde, contribuindo para o cuidado com o meio ambiente e a consciência social para responder aos desafios da sustentabilidade. Entre as conclusões mais importantes está que a integração tem vindo a desenvolver-se em vários campos universitários, no entanto, é necessário aumentar a sua divulgação e aplicação noutros níveis educativos, para reforçar o foco na sustentabilidade no desenvolvimento de uma sociedade comprometida com o bem-estar das futuras gerações.

Palavras-chave: currículo educacional; abordagem sustentável; química verde.



Introducción

En el campo de la química, las prácticas educativas que insisten en la protección del ambiente cada día se hacen más apremiantes. La química verde ha sido un área de estudio cuyas bases y principios se han incorporado al campo educativo de un modo interdisciplinario, que cambia según los avances del conocimiento y según las normativas y acuerdos internacionales. Por ejemplo, el enfoque sostenible implica un cambio en la visión de las prácticas para el desarrollo de una química verde responsable y conectada con una nueva conciencia social. De tal modo, a través de la química verde se fortalece el desarrollo humano porque, sin dejar de lado la búsqueda de un crecimiento económico equitativo para las grandes mayorías, se pretende alcanzar niveles satisfactorios de bienestar, salud y educación sin lesionar o vulnerar al medio ambiente.

Las necesidades formativas basadas en la implementación de los contenidos de la química verde y la generación de experiencias productivas constituyen un reto para cada nación. Además, son una oportunidad para desarrollar nuevos conocimientos que tengan en cuenta la conservación de recursos y la protección del entorno que nos rodea. Esto se debe a que, al integrar principios de la química verde en la educación, se promueve un aprendizaje activo y contextualizado que conecta la teoría y la práctica. Los estudiantes no sólo adquieren habilidades y competencias científicas, también desarrollan un sentido de responsabilidad ética con el medio ambiente. Alcanzar la integración de la química verde en el currículo educativo no sólo proporciona a los estudiantes conocimientos técnicos sobre prácticas químicas sostenibles, sino que también fomenta un pensamiento crítico sobre el uso de recursos y la gestión de residuos. Este enfoque educativo puede transformar la manera en que las futuras generaciones perciben y abordan los problemas ambientales.

La química ha sido fundamental al introducir numerosos productos esenciales para la humanidad. No obstante, para mejorar la calidad de vida presente y futura, es urgente desarrollar nuevas metodologías [1]. En la actualidad, uno de los principales desafíos para los químicos es satisfacer las demandas de la sociedad y disminuir el impacto ambiental que tiene el desarrollo de nuevos productos. Por lo tanto, el propósito fundamental de la química verde o sostenible es establecer los principios para la síntesis y aplicación de productos y procesos químicos que reduzcan o eliminen completamente el uso y producción de materiales que vulneren al medioambiente. Los 12 principios de la química verde son fundamentales para promover una educación sostenible y un futuro más ecológico. Estos principios, desarrollados por Paul Anastas y John Warner, buscan minimizar el impacto ambiental de los procesos químicos y pueden integrarse en la enseñanza de la química.

Tal como lo afirman Prado [2] y Oliveira y da Silva [3], los principios de la química verde promueven un desarrollo continuo en los ámbitos científico, tecnológico y social que minimiza el impacto ambiental. Esto implica adoptar nuevas prácticas químicas que optimicen los procesos, que busquen reducir la generación de residuos y efluentes tóxicos, que eviten el uso de disolventes nocivos, que empleen materias primas biodegradables y que disminuyan la emisión de gases perjudiciales para el medio ambiente. El objetivo del presente trabajo es estudiar la integración de la química verde en el currículo educativo como un mecanismo para fortalecer la sostenibilidad.

Materiales y métodos

La metodología aplicada para el desarrollo investigativo sobre la integración de la química verde en el currículo educativo se estructuró en dos fases claramente definidas. En la primera fase se llevó a cabo una búsqueda exhaustiva de publicaciones en plataformas digitales especializadas en química verde y sus principios. Esta búsqueda incluyó artículos científicos, libros, informes internacionales y artí-

culos de prensa en idioma español. La revisión se limitó a los documentos con una antigüedad no mayor a seis años a partir del 2024 y nos aseguramos de que las fuentes fueran relevantes y estuvieran actualizadas. Sin embargo, se seleccionaron tres artículos por fuera de este periodo porque se consideró que contenían información relevante y vigente sobre el tema de investigación.

En la segunda fase se vincularon las publicaciones recopiladas relacionadas con el tema de currículo educativo. Se descartaron aquellas que no estuvieran relacionadas con iniciativas de formación y planificación en química y sostenibilidad. En la **tabla 1** se presenta la metodología utilizada para identificar cada paso del recorrido investigativo. Se incluye el método utilizado, el proceso de búsqueda de información y las fases empleadas. A partir de este proceso, se seleccionaron 30 referencias que permitieron un análisis detallado de los hallazgos relacionados con la integración de la química verde en el currículo educativo desde una perspectiva sostenible.

Tabla 1. Presentación de la metodología. Elaboración propia.

Pasos de la investigación	Descripción
Método	Se utilizó un enfoque cualitativo y se realizó un análisis temático para extraer patrones o esquemas que permitieran comprender la orientación de las publicaciones consultadas.
	Se realizó un análisis de contenido y una revisión sistemática de las referencias seleccionadas.
Proceso de búsqueda de información	Bases de datos utilizadas en la búsqueda: Scopus, Web of Science, Google Scholar y Latindex.
	Los términos de búsqueda utilizados fueron “química verde”, “currículo educativo”, “sostenibilidad”, “Objetivos de Desarrollo Sostenible” y “enfoque sostenible”. Se utilizaron los operadores booleanos “AND” y “OR” para facilitar la búsqueda.
Fases	Búsqueda inicial: se realizó una búsqueda exhaustiva en bases de datos académicas y plataformas digitales a partir de términos relacionados con “química verde”, “currículo educativo” y “sostenibilidad”. Esta búsqueda se limitó a publicaciones del periodo 2018-2024 para asegurar la relevancia y actualidad de la información. Sin embargo, se seleccionaron tres artículos por fuera de este periodo porque se consideró que contenían información relevante y vigente sobre el tema de investigación.
	Criterios de inclusión: se consideraron artículos revisados por pares, libros académicos, informes internacionales y artículos de prensa que abordaran la química verde y su integración en la educación.
	Criterios de exclusión: se descartaron publicaciones que no estuvieran directamente relacionadas con el currículo educativo o que no presentaran iniciativas claras sobre la formación en química y sostenibilidad.
	Revisión crítica: las publicaciones seleccionadas fueron sometidas a una revisión crítica para evaluar su calidad, relevancia y contribución al tema.
	Selección final: de las publicaciones revisadas, se eligieron 30 referencias que ofrecían una visión integral sobre la inclusión de la química verde en el currículo educativo desde un enfoque sostenible.

Para el proceso de selección de las referencias de la investigación, se realizó una evaluación del contenido a 67 fuentes relacionadas con el tema de la integración de la química verde en el currículo educativo. Se evaluaron aspectos como la variedad, relevancia y científicidad de los documentos. Los criterios utilizados para evaluar cada referencia incluyen la autoridad del autor y la credibilidad de la publicación, es decir, que se encontraran en revistas académicas

indexadas en bases de datos reconocidas por su científicidad y que contribuyeran al tema de investigación. Además, se evaluaron aspectos como la exactitud del contenido, es decir, que las afirmaciones de las fuentes estuvieran respaldadas por datos verificables y que existieran citas adecuadas para sustentar los argumentos presentados. A partir de lo anterior, se eligieron las 30 fuentes más representativas que se exponen a continuación en la **tabla 2**:

Tabla 2. Evaluación de la calidad de las fuentes seleccionadas. Elaboración propia.

Referencia	Año	Calidad	Relevancia	Observaciones
[1]	2024	Alta	Alta	Aborda cómo las calconas pueden ser utilizadas en la enseñanza experimental y, de esa manera, promover prácticas sostenibles en química orgánica.
[2]	2003	Alta	Alta	Analiza los desafíos de la química verde y enfatiza la necesidad de un cambio significativo en la práctica química para abordar problemas ambientales críticos. Uno de los principales desafíos es la conciencia y aceptación de tecnologías limpias en lugar de los métodos tradicionales que generan residuos tóxicos y contaminantes. Otro desafío importante es la implementación de principios de sostenibilidad en la industria química.
[3]	2003	Alta	Alta	Introduce el concepto de economía atómica y explica cómo su uso fomenta la innovación en el desarrollo de nuevos métodos y tecnologías que sean más sostenibles. De esta forma, se prepara a los estudiantes para enfrentar los desafíos actuales y futuros en la industria química y promueve prácticas que benefician tanto al medio ambiente como a la sociedad.
[4]	2020	Alta	Alta	Proporciona un enfoque sistémico sobre la química verde, ideal para integrar en el currículo educativo.
[5]	2019	Alta	Alta	Explora las concepciones sobre química verde entre futuros profesores, esencial para entender su implementación educativa.
[6]	2023	Alta	Alta	Presenta estrategias para integrar principios de química verde en laboratorios universitarios, muy relevante para su implementación en la educación superior.
[7]	2023	Media	Media	Ofrece información general sobre la importancia de la química verde en la industria. Es útil, pero tiende a ser más descriptivo y orientado a la práctica que analítico. Se centra en información general sobre los beneficios y aplicaciones de la química verde, pero no profundiza en teorías.
[8]	2020	Alta	Alta	Proporciona un marco teórico sobre diseño curricular que puede ser aplicado para la enseñanza de la química verde.
[9]	2019	Alta	Alta	Presenta métodos para enseñar conceptos de química verde sin disolventes y promueve prácticas sostenibles en el laboratorio.
[10]	2024	Alta	Alta	Analiza cómo se incorpora la educación para el desarrollo sostenible en los currículos educativos actuales.
[11]	2024	Alta	Alta	Explica qué es la química verde. Resulta útil para el público general.
[12]	2023	Alta	Alta	Aborda la ambientalización curricular desde una perspectiva crítica, esencial para entender su integración educativa.
[13]	2020	Alta	Alta	Proporciona directrices globales sobre educación para el desarrollo sostenible, es fundamental para contextualizar el estudio.
[14]	2023	Alta	Alta	Examina cómo los docentes apropian el concepto de desarrollo sostenible, es relevante para entender su implementación educativa.
[15]	2020	Alta	Alta	Informe clave sobre los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Proporciona un marco global que respalda la importancia de integrar la sostenibilidad en la educación.
[16]	2019	Alta	Alta	Relaciona los ODS con acciones sociales y ambientales, es importante para contextualizar iniciativas educativas sostenibles.
[17]	2024	Alta	Media	Artículo de opinión que introduce técnicas como la eliminación de disolventes. Se alinea con el principio de prevención de residuos, la eficiencia energética de la química verde, las reacciones a temperatura ambiente, el uso de catalizadores selectivos, la reducción en el consumo de energía y la minimización de subproductos tóxicos. Tiene un enfoque que está en línea con el principio de economía atómica.
[18]	2023	Media	Media	Proporciona la definición básica de qué es un currículo. Aporta contenido generalizado sobre química verde y sostenibilidad educativa.

Referencia	Año	Calidad	Relevancia	Observaciones
[19]	2020	Alta	Alta	Aborda algunos problemas presentes en los currículos universitarios peruanos.
[20]	2020	Alta	Alta	Muestra una investigación-acción cooperativa que involucra a docentes. Es relevante para las prácticas educativas efectivas en sostenibilidad.
[21]	2020	Media	Alta	Es un artículo informativo sobre un evento en el que se consideraron temas importantes para la química verde tales como la educación ambiental, las innovaciones sostenibles y la formación de ciudadanos responsables que pueden ser agentes de cambio, lo cual es uno de los objetivos de la química verde.
[22]	2023	Alta	Alta	Define lo que es un currículo verde. Es esencial para establecer un marco conceptual claro en el estudio.
[23]	2023	Alta	Alta	Examina la dimensión ambiental en educación superior, es crucial para entender cómo se puede integrar sostenibilidad en currículos actuales.
[24]	2021	Alta	Media-Alta	Analiza propuestas curriculares chilenas. Aporta una perspectiva regional interesante, en la cual se busca incluir los 12 principios de la química verde que fomentan la reducción de residuos, el uso de materias primas renovables y la minimización de la toxicidad en los procesos químicos; sin embargo, la experiencia no es generalizable a otros contextos educativos.
[25]	2019	Media-Alta	Media-Alta	Contextualiza la sostenibilidad en universidades españolas, donde se promueve una conciencia ambiental y se integra la sostenibilidad en el entorno educativo. Buscan incorporar principios de sostenibilidad en sus currículos, lo que es fundamental para formar a futuros químicos que entiendan y apliquen los conceptos de la química verde.
[26]	2022	Alta	Alta	Presenta perspectivas docentes sobre sostenibilidad en educación superior. Es esencial para entender barreras e impulsores para su implementación.
[27]	2023	Media	Media	Columna de opinión que ofrece una visión sobre sostenibilidad.
[28]	2020	Media-Alta	Media-Alta	Estudio sobre currículos centrados en sostenibilidad. Es relevante, aunque podría incluir más ejemplos prácticos o estudios comparativos actuales.
[29]	2011	Alta	Alta	Aunque es un texto teórico, es importante porque aporta temas de interés para el estudio. El autor analiza los 12 principios de la química verde, que son directrices esenciales para el diseño de procesos químicos más sostenibles.
[30]	2017	Baja	Alta	Estudio específico que aborda temas relevantes para la química verde como la contribución que tiene a la educación. Enfatiza en la necesidad de incorporar conceptos relacionados a la química y la sostenibilidad. También se encuentra el tema de la aplicación de los principios de la química verde para prevenir los residuos y el uso de materias primas renovables.

Química verde

La química tradicional se ha caracterizado por ser muy invasiva y peligrosa para los entornos naturales y el bienestar humano. La química verde, también conocida como sostenible u orgánica, busca hallar novedosas maneras de sintetizar sustancias para generar una química más inocua, benigna y amigable con la salud y el medio ambiente. Es relevante resaltar que Paul Anastas es considerado el padre fundador de la química verde porque la definió hacia fines del siglo XX como “el diseño, desarrollo e implementación de productos y procesos que reducen o eliminan el uso y generación de sustancias peligrosas para la salud humana o el medio ambiente” [4]. Su propósito central fue evitar posibles inconvenientes, relacionados con afectaciones a la salud humana y al medio ambiente, con antelación para no tener que buscarles una solución después. Este criterio sugiere una actitud previsiva que requiere menor inversión financiera, de tiempo y de esfuerzo, y que busca reducir o extinguir el empleo y producción de sustancias tóxicas.

En otro estudio académico se definió la química verde como un campo que busca la reducción de contaminantes, desde cationes y aniones hasta pesticidas y colorantes, que son dañinos para el ambiente, pues desde fines del siglo XIX se busca tener un equilibrio adecuado entre el ser humano y su entorno [2]. Esta postura busca revertir la opinión sesgada que se maneja a nivel social sobre la química, sus procesos y el impacto medio ambiental que genera en el

espacio industrial y en la cotidianidad. Además, este enfoque está dispuesto para maximizar el aprovechamiento de los recursos naturales renovables y proteger su existencia para asegurar el progreso equilibrado entre el medio ambiente y la humanidad. Así pues, la educación, la ciencia y la tecnología son necesarias para la construcción del conocimiento y la difusión de los valores éticos necesarios que reclaman los nuevos tiempos, en los que los criterios sostenibles y la conciencia medioambiental son aspectos predominantes.

En tal sentido, la química verde, desde la perspectiva planteada, constituye un proyecto innovador que permitirá economizar y preservar de un modo más racional y equilibrado los recursos medioambientales. En ese sentido, “los principios de la química verde son un conjunto de recomendaciones/sugerencias/reglas a implementar con el fin de reducir el impacto ambiental causado por actividades humanas. Su aplicación a nivel de laboratorio permite reducir el consumo de recursos (agua, energía, reactivos), los riesgos inherentes a las prácticas y la generación de residuos” [3]. Este proyecto reclama, sin lugar a dudas, un cambio en el currículo educativo que permita posicionar la nueva y revolucionaria visión de la química desde un enfoque sostenible, debido a que la educación representa un mecanismo para la transformación actitudinal y el cambio científico y tecnológico.

No obstante, existe cierto grado de renuencia al cambio que genera esta transformación porque se trata de una conversión paradigmá-

tica que implica la modificación de la lógica prevaleciente, tanto en los agentes sociales como en los actores del sector económico y académico. La nueva visión se basa en que “la química eleva nuestro nivel de vida de varias maneras, desde proporcionar fertilizantes y agroquímicos para aumentar nuestro suministro de alimentos y facilitar una mejor nutrición, hasta permitir una mayor limpieza y una gran cantidad de tratamientos que aumentan la esperanza y la calidad de vida” [4]. Esta visión trastoca el sector productivo (economía), el estilo de vida, los patrones de consumo, la ciencia, la tecnología, la educación, los modos de relacionamientos entre las personas y entre ellas y el entorno natural.

En el ámbito industrial se desconfiaba de la posibilidad de la química verde para lograr mejoras en los procesos, por lo que tomó cierto tiempo comprender y asimilar “la implicancia de esta innovadora propuesta, así como diferenciar el término verde de los movimientos políticos ecologistas, para comprender que las ventajas económicas, sociales y medioambientales podían lograrse simultáneamente” [1].

A propósito de la química verde, Paul Anastas y Jhon Warner establecieron en 1998 unos postulados que sirvieron de pauta para la aplicación práctica de la química verde o sostenible [5] ante el inocultable e inminente daño que provoca la química tradicional al medio ambiente y a la salud humana. Para una mejor comprensión de esta investigación, estos postulados se han resumido de la siguiente manera:

Principio 1. Prevención en lugar de tratamiento

Este postulado es el más importante de todos los que se mencionarán a continuación, debido a que el incumplimiento de este principio ha causado una gran cantidad de daños, desequilibrios ecológicos y perjuicios a la sanidad humana. A propósito, es más beneficioso, económico e inteligente prevenir la generación de sustancias peligrosas que tratar sus efectos una vez que ya han causado perjuicios.

Principio 2. Economía atómica

El postulado central de este principio es que los procesos económicos deben formularse de un modo en el que en el producto final se maximice la incorporación de todos los materiales utilizados durante el proceso. Del mismo modo que el principio de prevención, la economía atómica, como precepto, aprecia el desarrollo de una reacción química por su eficiencia y no por criterios de rendimiento, los cuales regularmente no tienen en cuenta ni la utilización ni la producción de sustancias indeseables que se originan en cualquier reacción de síntesis.

Principio 3. Síntesis de toxicidad reducida

Los métodos de síntesis deben emplearse para producir componentes químicos que contengan escasa o ninguna toxicidad para el ser humano y para el entorno natural. Desde la perspectiva de la química verde o sostenible es fundamental suprimir, o al menos disminuir, la probabilidad de que ocurran daños derivados de la exposición a productos químicos o a la liberación de contaminantes en el medio ambiente. Estos daños pueden afectar la flora y fauna, así como la calidad del aire, agua y suelo. Si se tiene en cuenta el principio de la prevención, esto es algo que se debe tener en cuenta desde el comienzo de los procesos de producción de componentes.

Principio 4. Productos seguros

Con este principio se toma en cuenta otra etapa del ciclo de vida de un producto: el momento cuando es utilizado. Los productos deben ser diseñados de manera que conserven su eficacia y, a la vez, sea mínima su toxicidad. Este postulado demanda evaluar el impacto a largo plazo de las sustancias químicas sobre la sociedad y el medio ambiente. Para tal fin, son necesarios abordajes multidisciplinarios desde el comienzo del diseño molecular que disminuyan la posibilidad de que ocurra un daño a futuro.

Principio 5. Reducción de sustancias auxiliares

Las sustancias auxiliares, sobre todo los solventes, son fundamentales para los procesos químicos debido a que, si se prescindiera de estas, serían inejecutables muchos procedimientos vinculados con la producción de sustancias químicas. Cabe destacar que muchos de estos solventes son conocidos por sus efectos perniciosos para la salud y el ecosistema, por lo que sólo deberán emplearse en las operaciones donde son estrictamente imprescindibles.

Principio 6. Eficiencia energética

Como bien se conoce, los procesos industriales o de transformación tienen costos económicos y ambientales muy elevados. Por lo tanto, con el objetivo de evaluar su impacto en el entorno natural, se debe considerar tanto la energía utilizada en la producción como su origen. La eficiencia energética debe estimar y aminorar sus impactos económicos y medioambientales.

Principio 7. Materias primas y energías renovables

El uso irracional de los recursos naturales como materia prima no podrá sustentarse en el futuro inmediato, sobre todo si se considera la imposibilidad de reposición inmediata de los mismos. Además de ocasionar un elevado costo ambiental para las actuales generaciones, el consumo desmedido e irracional de los recursos naturales pone en riesgo su disponibilidad para las generaciones futuras. En este sentido, siempre que exista la posibilidad se deben emplear materias primas renovables. Para ello, y para optimizar la sostenibilidad en la química verde, es necesario considerar particularidades relacionadas con la agroindustria y la agricultura tales como la selección de cultivos adecuados, la implementación de tecnologías sostenibles, el análisis de los mercados para asegurar una demanda viable y la evaluación de los costos y beneficios económicos asociados a estas prácticas.

Principio 8. Reducción de derivados

Los derivados son agentes químicos o sustancias que se utilizan para proteger la parte sensible de una molécula con el fin de que un producto químico adquiera una propiedad determinada o sea formulado de una forma definida. Dichos derivados son conocidos también como grupos de bloqueo, protección o agentes de modificación temporal de procesos físico-químicos.

Principio 9. Potenciación de la catálisis

De acuerdo con este postulado, es necesario el uso de catalizadores que puedan ser reutilizables en lugar de los reactivos estequiométricos que se aplican comúnmente de manera desproporcionada, en una sola oportunidad y que, además, generan residuos. En cambio, un catalizador no altera la estabilidad química y no es consumido por las reacciones que cataliza; además, son muy selectivos, se pueden utilizar en pequeñas cantidades y son susceptibles de ser reutilizados.

Principio 10. Productos biodegradables

La biodegradabilidad es una característica de algunos compuestos que los hace proclives a ser degradados por microorganismos. Según esta propuesta, los productos químicos, al momento de diseñarse, deben considerar cómo van a ser dispuestos una vez que hayan sido utilizados y desechados. En tal sentido, lo esencial es diseñar productos químicos biodegradables e inocuos tanto para el medio ambiente como para la sanidad humana.

Principio 11. Monitoreo en tiempo real

Este principio implica el control meticuloso de los procedimientos químicos en tiempo real. Esto es fundamental para una acción segura, eficiente y con un mínimo de residuos. Para la concreción de este propósito se requiere de una participación multidisciplinaria de químicos, ingenieros, ambientalistas y otros profesionales que

comparten el objetivo común de optimizar y emplear las técnicas y tecnologías disponibles. En este sentido, el monitoreo en tiempo real se orienta a producir sustancias químicas de forma segura y, de tal modo, resguardar al entorno natural y a las personas de los riesgos propios de la producción y de las condiciones físicas en las que las sustancias químicas son empleadas. Además, este tipo de control evita la producción de residuos, permite utilizar de modo eficiente el agua y la energía, garantiza la calidad del producto y elimina costos adicionales.

Principio 12. Prevención de accidentes

Es de suma importancia el conocimiento y la capacitación, tanto de los operarios de la industria química como de la sociedad en general, acerca de los riesgos particulares de cada sustancia química, de cómo actuar en caso de accidente y toda aquella información que al respecto resulte importante. Por esta razón, es mejor evitar el uso o la generación de compuestos que potencialmente evolucionen con violencia, causen quemaduras o cualquier otro tipo de infortunios en la industria. En tal sentido, se estima que la concientización, la capacitación y el conocimiento sean estrategias provisorias que contribuyan al cumplimiento de este principio de la química sostenible.

Una vez esbozados y analizados estos principios de la química verde u orgánica, se puede afirmar que estos giran en torno a la prevención. Por lo tanto, la educación, la cual se vincula con el conocimiento, la concientización y la capacitación del individuo en la sociedad, cumple un papel trascendental para alcanzar la sostenibilidad. En este sentido, la química sostenible, expresada a través de estos doce principios, aparte de afianzar el pensamiento de su fundador, vaticina un cambio sustancial en la forma como la ciencia viene enunciando “los nuevos planteamientos químicos y las innovadoras rutas de síntesis de las sustancias: implicando el diseño, transformación y aplicación de los procesos implicados en su producción para la disminución o eliminación del empleo o emisión de sustancias tóxicas” [6]. Es por ello que se afirma que la química verde es una conversión, una transformación y un cambio filosófico y cultural.

Enfoque sostenible

La sostenibilidad es un movimiento a nivel mundial que se ha trazado metas bien definidas para garantizar la vida de las generaciones futuras. Por ejemplo, “la Educación para el Desarrollo Sostenible (EDS) es una meta a alcanzar para la próxima Agenda 2030. El logro de los 17 ODS será por medio de la educación. Las políticas educativas y el desarrollo curricular serán quienes respondan a esta necesidad definiendo en sus principios nuevas prácticas y actitudes que encaminen hacia sociedades más sostenibles” [7]. Asumir un enfoque sostenible requiere considerar la Agenda 2030 sobre los ODS, aprobada por la Asamblea General de las Naciones Unidas.

Esta perspectiva, de un modo general, está orientada a garantizar “las necesidades del presente sin comprometer las necesidades de las generaciones futuras, siempre sin renunciar a la protección del medio ambiente, el crecimiento económico y el desarrollo social” [8]. La postura de este enfoque sostenible, entre otras cosas, modifica radicalmente la lógica del pensamiento dominante actual porque replantea los hábitos de vida, la forma como la sociedad concibe el progreso y cómo se vincula con sus semejantes y con el medio ambiente. De acuerdo con esto, “así se ve la sustentabilidad como un nuevo modo de comprender la realidad, donde no exista una ruptura entre la naturaleza y la sociedad, considerando el manejo y cuidado de los recursos conscientes de que son finitos la ética ambiental como norma para una sociedad sustentable” [9]. En tal sentido, la sostenibilidad como punto de vista es un cambio cultural que permite a las sociedades guiar y promover cambios en las maneras de conducir o gestionar el área social, el área económica y el área medioambiental.

El ascenso del paradigma sostenible es una invitación a reflexionar acerca de la forma en que se viene desarrollando la vida misma con sus dinámicas, modos de producción y hábitos de consumo. La sostenibilidad considera ajustar el comportamiento y el quehacer diario a los ritmos y límites que impone el planeta Tierra. La educación desde un enfoque sostenible “implica un proceso de aprendizaje permanente y una parte integral de la educación de calidad que mejora las condiciones cognitivas, socioemocionales y conductuales del aprendizaje” [10]. Las afirmaciones anteriores permiten constatar que “la educación para el desarrollo sostenible (EDS) constituye un medio esencial para lograr mejor calidad de vida, se ratifica la importancia de incorporarla en todos los niveles y campos de la educación, la formación y el aprendizaje” [11], especialmente desde la formación en el campo de la química verde.

Según lo expuesto por Ruiz [8], la sostenibilidad puede clasificarse en:

- **Sostenibilidad ambiental:** implica la gestión eficiente de los recursos naturales en la actividad productiva, lo cual permitirá su preservación para la satisfacción de las necesidades de las futuras generaciones. Es necesario acotar que este género de sostenibilidad está orientado a la preservación de la biodiversidad sin menoscabar el desarrollo económico y social.
- **Sostenibilidad económica:** reclama el uso de prácticas económicamente rentables y responsables, tanto desde el punto de vista social como del medioambiental. En tal sentido, se interpreta que debe prevalecer un criterio de equilibrio en dicho ejercicio al momento de satisfacer las distintas necesidades.
- **Sostenibilidad social:** está orientada a fortalecer la cohesión y la estabilidad de las poblaciones y su desarrollo vital. Pretende adoptar valores colectivos que permitan generar una identidad compartida, unos comportamientos favorables hacia el medio ambiente, educación, concienciación y capacitación.

Ahora bien, para el alcance y desarrollo de la sostenibilidad, las Naciones Unidas, en el año 2015, diseñaron y aprobaron los ODS, los cuales son diecisiete en total: 1) Pobreza; 2) Hambre cero; 3) Salud y bienestar; 4) Educación; 5) Igualdad de género; 6) Agua; 7) Energía asequible y no contaminante; 8) Trabajo decente; 9) Industria, Innovación e infraestructura; 10) Reducción de las desigualdades; 11) Ciudades y comunidades sostenibles; 12) Consumo responsable; 13) Acción por el clima (cambio climático); 14) Vida marina; 15) Ecosistemas terrestres; 16) Paz, justicia e instituciones sólidas; y 17) Alianzas [12]. Dichas metas están configuradas para ofrecer a los países un marco referencial para la actuación y la intervención social y ambiental.

De este modo, la sostenibilidad y su despliegue requieren “el impulso de movimientos sociales, la organización de las instituciones, la elaboración de la ciencia y la tecnología y la negociación de compromisos entre quienes se preocupan por el medio ambiente, la economía y los aspectos sociales” [13]. Es precisamente en este contexto de la sostenibilidad donde se genera la integración de la química verde en el currículo educativo, puesto que este género de química transversaliza de modo importante los ODS. De manera que “la química verde se ha convertido en una disciplina clave para abordar los desafíos ambientales y promover la sostenibilidad en la industria química y múltiples actividades productivas a través del uso de procesos y productos más amigables con el medio ambiente” [14]. Esto impacta en el bienestar, la salud, la educación, la innovación, el agua, la energía limpia, la industria, la infraestructura, el consumo responsable, la vida marina, el cambio climático, los ecosistemas y muchos otros aspectos.

Currículo educativo

La definición del currículo permite comprender su alcance y dimensión para introducirnos en la temática del currículo educativo desde un enfoque sostenible. De acuerdo con el Diccionario de la Lengua Española de la Real Academia Española, el término “currículo” proviene del latín *curriculum*, que significa “carrera”, y lo define como “plan de estudios” y como el “conjunto de estudios y prácticas destinadas a que el alumno desarrolle plenamente sus posibilidades” [15]. Por ejemplo, al hacer referencia al contexto educativo en Perú, “existen algunas fortalezas que podrían ser aprovechadas y potenciadas, entre ellas, la disposición de la gran mayoría de instituciones universitarias al cumplimiento de los marcos normativos y procedimentales que regulan el proceso de actualización del currículo y su reconocimiento en los estándares de acreditación nacional e internacional” [16]. Dicha actualización puede orientarse hacia la garantía de mantener desde el currículo una planificación educativa con un enfoque sostenible para promover la protección ambiental y las buenas prácticas en el área de la química.

Ahora bien, los cambios curriculares desde un enfoque sostenible exigen programas de formación, no sólo para los estudiantes sino también para el profesorado, con una institucionalidad proactiva. A su vez, “el apoyo y liderazgo institucional debe crear una comunidad de aprendizaje donde se identifiquen buenas prácticas existentes, se promueva el intercambio de recursos educativos y se disponga de apoyo y orientación por parte de expertos y facilitadores” [17]. Al respecto, “todo currículo debe responder a las exigencias de la época, así como el desarrollo integrado del conocimiento científico que lo caracteriza, y el impacto que estos cambios tienen en la sociedad” [5]. Las nuevas tendencias educativas exigen un currículo adaptado a los nuevos tiempos, que proteja los ecosistemas y que esté en beneficio de la salud humana.

Algunos investigadores han reportado que “los docentes y gestores académicos deben tomar conciencia de la necesidad de un modelaje completo de los nuevos egresados porque hasta el momento los estudiantes siguen viendo el área de sustentabilidad ambiental como aislada o independiente de otras áreas necesarias para el ejercicio profesional” [18]. La UNESCO ha formulado una terminología llamada “Currículos verdes”, la cual “integra la mitigación del cambio climático y la adaptación al mismo en la enseñanza y el aprendizaje desde los niveles preescolar, primario, secundario y superior, así como en la formación del profesorado. Hace hincapié en las interconexiones entre el medio ambiente, la economía y la sociedad, implicando a los estudiantes en todos los ámbitos cognitivos, socioemocionales y de comportamiento para inspirar la acción en favor de la sostenibilidad” [19]. En este sistema de interrelaciones, los contenidos manejados en el currículo se suman en favor de la sostenibilidad ambiental.

Las naciones, desde sus políticas educativas, deben promover una adaptación curricular donde converjan la protección de los derechos humanos y el cuidado ambiental. Es así que “el sistema educativo debe evolucionar estableciendo pedagogías participativas y una transformación de los objetivos y contenidos de aprendizaje que ayuden a la ciudadanía a tomar conciencia de los desafíos a nivel global y local, reflexionando y actuando bajo los principios de la sostenibilidad” [7]. El desarrollo de competencias básicas orientadas hacia el desarrollo sostenible debe preparar a las nuevas generaciones.

Es necesaria una sociedad global para proteger el ambiente desde el fortalecimiento de un currículo sostenible en áreas como la química verde. Además, “para generar un saber ambiental hay que tener en cuenta una interpretación sistemática de la realidad bajo un enfoque interdisciplinar” [20]. Esto exige una reforma educativa, con demandas sociales beneficiosas para consolidar prácticas sostenibles en la formación básica y profesional. Con respecto a esto, “la recon-

textualización de los objetivos y metas de la Agenda 2030 para el desarrollo sostenible a la realidad del país se revela como una prioridad para alcanzar competencias democráticas que permitan a la futura ciudadanía participar, activamente, en la toma de decisiones de este plan de Naciones Unidas” [21]. Este currículo debe abordar las dimensiones del desarrollo sostenible de la mano con los contenidos de la química verde y con otras disciplinas que puedan fortalecer estos componentes curriculares. A propósito, se resalta una transformación impulsada desde la sostenibilidad. En dicha transformación, “la educación es la encargada de proporcionar herramientas a los educandos para poder dar respuesta a estos nuevos desafíos sociales. El sistema educativo debe evolucionar estableciendo pedagogías participativas y transformadoras que favorezcan a la ciudadanía a tomar conciencia de los retos que se presentan a nivel global y local y actuando bajo los principios de la sostenibilidad” [7]. Esta evaluación debe estar centrada en los valores del ser humano y su compromiso con el planeta.

Resultados

De acuerdo con la revisión sistemática realizada, se pudieron establecer los principales rasgos de la química verde:

- Su desarrollo desde la industria química procura aminorar o suprimir las sustancias peligrosas que impactan nocivamente la salud humana y el medio ambiente. Por consiguiente, está centrada en atenuar el peligro que implican estas sustancias durante su ciclo de vida.
- Se sustenta en las interrelaciones entre producción y sociedad o producción y medio ambiente. En este sentido, la generación de la química verde busca generar y establecer un equilibrio en su vinculación con el entorno natural y los grupos humanos.
- Hace uso de una perspectiva sistémica puesto que comprende las materias primas, el proceso productivo, el uso del producto y la disposición final de las sustancias una vez cumplen su ciclo.
- Si las sustancias y los procesos químicos son diseñados de una manera segura y benigna, serán necesarios menos controles para mitigar los riesgos.
- Tiene carácter preventivo debido a que se fija en el diseño de los procesos, las reacciones químicas, las condiciones de reacción y el análisis de la toxicidad para los seres vivos del producto generado.
- Posee un carácter multidisciplinario y se conecta con otros campos disciplinares como la ecología, toxicología, ciencias ambientales, la ingeniería, las ciencias sociales, la psicología ambiental, la comunicación, la educación y otros más.

Estos rasgos también permiten orientar los 12 principios sujetos a revisión propuestos por Anastas y Warner [5], que pueden verse en el esquema de la **figura 1**.

Es necesario promover una química verde comprometida con un enfoque sostenible y que pueda servir de referente para reestructurar los programas curriculares y educativos. Es posible aplicar los fundamentos de la química verde en la educación desde una transformación curricular que impulse el desarrollo sostenible en beneficio del medio ambiente y las generaciones futuras. Para ello, se requiere del compromiso de todos los involucrados en el cumplimiento de normativas nacionales e internacionales con el fin de alcanzar la transformación educativa en ámbitos y niveles específicos de todas las naciones.

Discusión

En primer lugar, Lopes, Carlos y Echavarría destacan la importancia de utilizar calconas, que son compuestos conocidos por su capacidad de cambiar de color en respuesta a cambios en el pH o en la concentración de ciertas sustancias, en la enseñanza experimental [1].

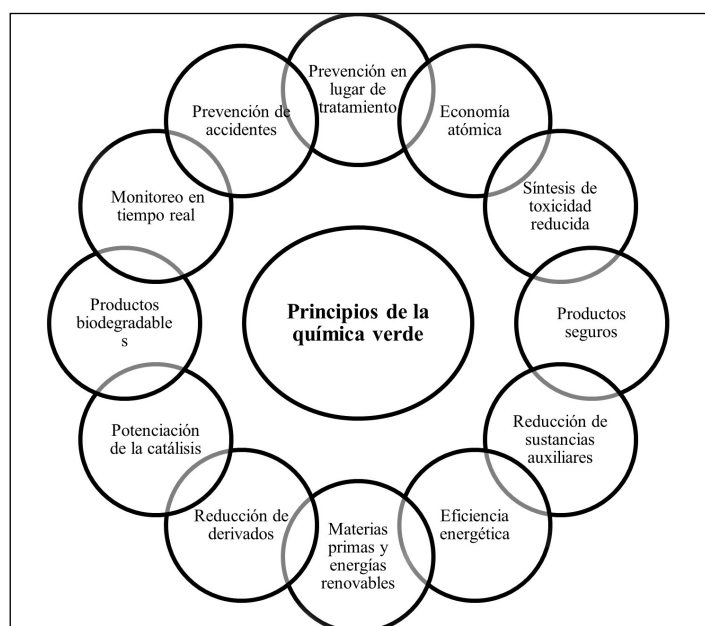


Figura 1. Principios de la química verde con base en los postulados de Anastas y Warner [5].

Esto promueve un enfoque práctico hacia la química verde y permite a los estudiantes experimentar con compuestos que reflejan los principios de sostenibilidad. Lo anterior se alinea con las observaciones de Franco, Reina y Riveros Toro, quienes analizan las concepciones de los futuros docentes sobre la química verde y sugieren que una formación sólida en este ámbito es fundamental para su implementación efectiva en el aula [5]. Ambas fuentes subrayan la necesidad de que los educadores estén bien informados y capacitados para transmitir estos conceptos a sus estudiantes. De acuerdo con esto, es posible crear un ciclo positivo de aprendizaje y aplicación.

Con respecto a esto, el trabajo de Delgadillo, Castellanos, Ramírez y Gómez sobre la ambientalización curricular refuerza esta perspectiva al señalar que la integración de principios de sostenibilidad en el currículo no debe ser superficial, sino que debe estar sustentada en un entendimiento profundo del impacto ambiental de las prácticas químicas [12]. La UNESCO, a través de su Declaración de Aichi-Nagoya sobre la EDS [13] y otros documentos recientes, enfatiza que la EDS es esencial para formar ciudadanos responsables y conscientes de su relación con el medio ambiente. Esto resuena con las ideas presentadas por Carvajal-Suárez y Moreno-Flores, quienes argumentan que la dimensión ambiental debe ser un componente central del currículo universitario. Lo anterior implica que los programas educativos deben evolucionar para incluir enfoques más sostenibles y responsables [23].

Asimismo, la química verde, como se visualiza dentro del currículo sostenible, debe contar con un área interdisciplinaria y en constante revisión de los avances y cambios en el saber científico, pues la realidad mundial vive en un constante dinamismo que exige adaptarse a él. Esto coincide con quienes exponen que “la química verde es la ciencia que busca desarrollar procesos y productos químicos que sean amigables con el medioambiente, promoviendo la eficiencia, la seguridad y la sostenibilidad” [8]. Las estadísticas indican que “hay 350.000 productos químicos en el mercado mundial. Sin la química, la vida sería imposible, pero superar los límites de su uso hará inviable el sistema terrestre” [8]. Esto supera los pronósticos establecidos y da cuenta de la necesidad de acelerar las acciones para aminorar el impacto de estas sustancias a partir de buenas prácticas. Como se visibiliza en diversos estudios, “la química está a nuestro alrededor y contribuye significativamente a casi todos los aspectos de la vida. Según el Chemical Industry Journal, el PIB del sector contribuye a la producción económica mundial por una suma de alrededor de 5,7 billones de dólares” [4]. A partir de lo anterior,

se puede notar su importancia y la atención prioritaria que merece en la economía global.

En el marco del desarrollo educativo a través de un enfoque sostenible, se resalta la necesidad de un cambio social. Esto puede comprobarse en estudios universitarios, entre los cuales se reafirma que “mientras las universidades avanzan creando estructuras transversales que facilitan la incorporación de la sostenibilidad en los campus, diseñan titulaciones con competencias específicas y establecen redes y alianzas interuniversitarias para la sostenibilidad, surge el reto de incorporar la sensibilidad y los principios de la sostenibilidad a toda la formación disciplinar” [22]. Se resaltan iniciativas a nivel mundial que acogen los principios de la química verde y socializan sus avances: “la industria química, los gobiernos, la academia y las organizaciones no gubernamentales han tomado diferentes medidas para enfrentar el reto de la interfase entre la química y la sustentabilidad” [31]. Entre ellas se encuentran diversas leyes y convenios internacionales encaminadas a la regulación de los productos y procesos químicos. Es decir, todos los esfuerzos van en concordancia con lo expuesto en los ODS.

Lograr la sensibilización ambiental y la formación de nuevos profesionales desde un currículo sostenible requiere de un cambio del paradigma social, lo cual coincide con lograr una nueva praxis educativa diferenciada del enfoque tradicional por competencias. “A diferencia de un enfoque competencial, se argumenta que los cursos específicos de sostenibilidad fragmentan la realidad, resultando en una base inapropiada para la toma de decisiones en temas sociales, económicos, medioambientales y culturales, de manera sistémica” [23]. Esto reitera la necesidad de una transformación educativa a nivel de políticas y programas educativos vigentes. La relevancia del tema se argumenta en esta y otras investigaciones: “no basta sólo que esta iniciativa académica esté en los planes de estudio de los diversos programas académicos y que exista una interrelación entre ellos con perspectiva interdisciplinar, se requiere del desarrollo de actividades en el día a día de la comunidad académica” [24]. Es decir, se trata de impulsar un cambio de conciencia en los formadores y la población capacitada en los espacios educativos formales.

El encuentro de saberes en diversas organizaciones emerge como un factor importante y recurrente. Es un elemento de cohesión en el campo educativo que supera los intereses del capital, lo cual es manifestado en investigaciones a través de hallazgos que afirman, por ejemplo, que “la innovación basada en la sostenibilidad se ha convertido en una prioridad para reducir la huella ecológica general de esos países” [25]. Esto se confirma como parte de la formación ciudadana y los cambios que exige la Agenda 2030 para el redimensionamiento educativo mundial.

Conclusiones

La investigación ha demostrado que la incorporación de la química verde en los planes de estudio no sólo es viable, sino que también es esencial para preparar a los estudiantes para enfrentar los desafíos ambientales actuales. Además, durante el estudio de la integración de la química verde en el currículo educativo como mecanismo para el desarrollo del enfoque sostenible, se puede concluir que la integración se ha venido desarrollando en diversos campos universitarios; sin embargo, se requiere aumentar su difusión y aplicación en otros niveles educativos para fortalecer el enfoque de la sostenibilidad en el desarrollo de una sociedad comprometida con el bienestar de las generaciones futuras.

Un área como la química, que representa un saber científico amplio, puede integrarse desde la interdisciplinariedad del saber científico, lo cual contribuye con el avance de los beneficios de la química verde en el desarrollo formativo para una nueva conciencia social. De tal modo, se necesita de una transformación que impacte significa-

tivamente las formas de pensar desde el acto educativo, orientado por un currículo basado en el interés de mejorar las actuales prácticas que, de manera reflexiva, buscan solucionar los problemas que surgen y afectan la vida del ser humano y su sistema de relaciones con el medio ambiente.

Finalmente, es importante destacar que los hallazgos encontrados en la investigación respaldan el objetivo planteado: la integración de la química verde en el currículo educativo es no sólo necesaria, sino también un paso esencial hacia el desarrollo sostenible en la educación. Se aporta evidencia importante que señala que las instituciones educativas tienen un papel fundamental en promover prácticas sostenibles y formar ciudadanos responsables. Estos enfoques convergen en la necesidad de una educación que no sólo imparta conocimientos teóricos, sino que también fomente habilidades prácticas y una conciencia crítica sobre el impacto ambiental de las actividades químicas.

Referencias

- [1] M. F. Lopes, P. Carlos y A. Echevarria, "Las calconas en la enseñanza de la química orgánica experimental en el contexto de la química verde", *Química Nova*, vol. 47, nro. 5, pp. 1-5, 2024. DOI: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20240007>
- [2] A. G. S. Prado, "Química verde, los desafíos de la química del nuevo milenio", *Química Nova*, vol. 26, nro. 5, pp. 738-744, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422003000500018>
- [3] L. M. Oliveira y R. A. da Silva, "Inclusión del concepto de economía atómica en el programa de un curso de química orgánica experimental", *Química Nova*, vol. 26, nro. 5, pp. 779-781, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422003000500025>
- [4] A. Pino, *Química Verde Enfoque Sistémico*, 1era Edición, Santa Fe, Ediciones UNL, 2020.
- [5] R. Franco, R. C. Reina y C. M. Riveros Toro, "Concepciones sobre química verde en profesores de química en formación inicial", *Revista Noria Investigación Educativa*, vol. 1, nro. 5, pp. 94-108, 2019. DOI: <https://doi.org/10.14483/25905791.16507>
- [6] D. Prato y R. Moreno, "Introducción de los principios de la química verde a los procesos de enseñanza en laboratorios universitarios", *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería EIEI ACOFI 2023*, Cartagena de Indias, 2023. DOI: <https://doi.org/10.26507/paper.2792>
- [7] CHEMWATCH, "Importancia de la química verde y sostenible en la industria química", 2023. [En línea]. Disponible en: <https://chemwatch.net/es/blog/importance-of-green-and-sustainable-chemistry-in-the-chemical-industry/> [Último acceso: 30/05/2024].
- [8] J. Ruiz, *Teoría del currículum: Diseño, desarrollo e innovación curricular*, Madrid, Editorial Universitas S. A., 7.º edición, 2020.
- [9] A. Losada, "Reacciones libres de disolventes como una forma de exponer los conceptos de química verde", tesis de pregrado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia — Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingenierías, Neiva-Huila, Colombia, 2019.
- [10] M. Guardado y L. Monsalve, "Educación para el desarrollo sostenible en el currículum de España e Irlanda", *Universidad y Sociedad*, vol. 16, nro. 1, pp. 30-44, 2024. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202024000100030
- [11] BBVA, "¿Qué es la química verde?: Un aliado para la seguridad del planeta", 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/la-quimica-verde-un-aliado-para-la-seguridad-del-planeta/>. [Último acceso: 01/06/2024].
- [12] A. Delgadillo, J. Castellanos, L. Ramírez y A. Gómez, "Ambientalización curricular: el concepto", *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 7, nro. 5, pp. 1760-1781, 2023. DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i5.7842
- [13] UNESCO, "Declaración de Aichi-Nagoya sobre la educación para el desarrollo sostenible", en *Conferencia Mundial Aichi-Nagoya*, Okayama, 2020.
- [14] I. Silvera, S. Guerra y J. Olivo-Franco, "Apropiación del concepto de desarrollo sostenible por parte del profesorado de una escuela normal", *Ciencias Ambientales*, vol. 57, nro. 1, 2023. DOI: <https://doi.org/10.15359/rca.57/1.5>
- [15] ONU, *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible*, Ginebra, 2020.
- [16] D. Rodrigo-Cano, M. Picó y G. Dimuro, "Los Objetivos de Desarrollo Sostenible como marco para la acción y la intervención social y ambiental", *Retos*, vol. 9, nro. 17, pp. 25-36, 2019. <https://doi.org/10.17163/ret.n17.2019.02>
- [17] K. Freund Ruf, "La química Verde 2. Un enfoque interesante es el uso de técnicas de síntesis en flujo continuo", *El comercio*, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.elcomercio.com/opinion/quimica-verde-kurt-freund-columnista-2.html>. [Último acceso: 26/12/2024].
- [18] Diccionario de la Lengua Española, "Currículo", 2023. [En línea]. Disponible en: <https://dle.rae.es/curr%C3%ADculo> [Último acceso: 02/06/2024].
- [19] E. Villalaz-Castro y P. Medina-Zuta, "El currículo universitario peruano: aspectos complejos", *Maestro y Sociedad*, nro. especial 1, pp. 121-136, 2020. <https://maestroysociedad.uo.edu.cu/index.php/MyS/article/view/5184>
- [20] G. Cebrián, "La educación para el desarrollo sostenible en el currículum universitario: una investigación-acción cooperativa con profesorado", *Revista iberoamericana de educación superior*, vol. 11, nro. 30, pp. 99-114, 2020. DOI: <https://doi.org/10.22201/iisue.20072872e.2020.30.590>
- [21] El Ucabista, "El desarrollo sostenible como elemento del currículo universitario se abordó en III Jornadas del CIDI", 2020. [En línea]. Disponible en: <https://elucabista.com/2020/07/14/el-desarrollo-sostenible-como-elemento-del-curriculo-universitario-se-abordo-en-iii-jornadas-del-cidi/> [Último acceso: 03/06/2024].
- [22] UNESCO, "¿Qué es un currículo verde?", 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.unesco.org/es/education-sustainable-development/greening-future/curriculum> [Último acceso: 02/06/2024].
- [23] F. A. Carvajal-Suárez y J. L. Moreno-Flores, "Dimensión ambiental y el desarrollo sostenible en el currículo de la educación superior", *Revista Multidisciplinaria Perspectivas Investigativas*, vol. 3, nro. 4, pp. 29-36, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.8428458>
- [24] A. Berríos-Villaroel, R. Orellana-Fernández y L. Bastías-Bastías, "Desarrollo sostenible y currículo chileno de enseñanza secundaria: ¿Qué proponen los programas escolares?", *Revista electrónica Educare*, vol. 25, nro. 1, pp. 1-23, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.15359/ree.25-1.18>
- [25] A. Gelly, L. Collazo y I. Mulà, "Contexto y evolución de la sostenibilidad en el currículum de la universidad española", *Educación Ambiental y Sostenibilidad*, vol. 1, nro. 1, pp. 1-18, 2019. DOI: https://doi.org/10.25267/Rev_educ_ambient_sostenibilidad.2019.v1.i1.1102
- [26] F. Vera, "La perspectiva de docentes sobre la infusión de la sostenibilidad en el currículo de la educación superior", *Revista electrónica Transformar*, vol. 3, nro. 2, pp. 17-37, 2022. <https://www.revistatransformar.cl/index.php/transformar/article/view/57>
- [27] H. Castilla, "Sostenibilidad en currículos y clases", 2023. [En línea]. Disponible en: <https://ascun.org.co/educacion-superior/columna-de-opinion-sostenibilidad-en-curriculos-y-clases/>. [Último acceso: 02/06/2024].
- [28] N. Young, "La prevalencia de los currículos centrados en la sostenibilidad en las instituciones de Enseñanza Superior", tesis de pregrado, Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales ICADE, Madrid, 2020.
- [29] M. F. Suárez, *Electroquímica física e interfacial: una aproximación teórica*, Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, 2011.

[30] F. Amaya García *et al.*, “Dolabellane diterpenes from the Caribbean soft corals *Eunicea laciniata* and *Eunicea asperula* and determination of their anti HSV-1 activity”, *Rev. Colomb. Quím.*, vol. 46, nro. 1, pp. 5–12, 2017. DOI: <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v46n1.62830>

[31] M. del C. Doria Serrano, “Química verde: un nuevo enfoque para el cuidado del medio ambiente”, *Educ. quim.*, vol. 20, nro. 4, pp. 412–420, 2009. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0187-893X\(18\)30044-2](https://doi.org/10.1016/S0187-893X(18)30044-2)

Citación del artículo:

L. de J. Infante Rivera, M. Vilca Arana, R. K. Mendivel Gerónimo, D. R. Hurtado Tiza y E. Huamán Gómez, “Integración de la química verde en el currículo educativo: un enfoque sostenible”, *Rev. Colomb. Quím.*, vol. 53, nro. 1, pp. 3–12, 2024. DOI: <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v53n1.114986>



¹ Universidad Privada de Huancayo Franklin Roosevelt. Huancayo, Perú. huancayo.rchuquillanqui@uroosevelt.edu.pe.
² Universidad Nacional de Huancavelica. Huncavelica, Perú. huancavelica.elsy.carhuachucho@unh.edu.pe.
³ Universidad Nacional de Cañete. San Luis de Cañete, Perú. lima.jmedinaa@undc.edu.pe.
⁴ Universidad Nacional de Trujillo. Trujillo, Perú. trujillo.gvela@unitru.edu.pe.
⁵ Universidad Peruana los Andes. Huancayo, Perú. huancayo.d.golivera@upla.edu.pe.
***Autor para correspondencia:** huancayo.rchuquillanqui@uroosevelt.edu.pe.

Recibido: 05/06/2024. Última revisión: 03/07/2024 Aceptado: 04/10/2024.

Educación química para la sostenibilidad en áreas residenciales: mitigación de desechos peligrosos y promoción de un entorno ambientalmente seguro

Resumen

El principal propósito de esta investigación fue estudiar la importancia de la educación química para la sostenibilidad en áreas residenciales, donde es necesario generar menos desechos peligrosos para promover un entorno ambientalmente seguro. La metodología utilizada fue una revisión sistemática mediante la búsqueda actualizada en Dialnet y Google Académico de artículos científicos en idioma español, asociados a los descriptores de la investigación. En los resultados se resalta la importancia de la educación química para la sostenibilidad en la consecución de un entorno ambientalmente seguro, también se logran reconocer compuestos químicos que se generan en las áreas residenciales y los desechos peligrosos que surten efectos nocivos en las poblaciones urbanas. En las conclusiones se destaca la necesidad de promover una educación en el campo de la química bajo los objetivos del desarrollo sostenible (ODS) 3 y 4 que proponen la protección de la salud y el ambiente en las áreas residenciales, así como la educación de calidad para lograrlo. Las prácticas de identificación y manejo adecuado de desechos químicos peligrosos, siendo eficientes, inciden en la calidad de vida de los ciudadanos, garantizando áreas residenciales ambientalmente seguras.

Palabras clave: educación química para la sostenibilidad; desechos peligrosos; entorno ambiental seguro.

Chemical education for sustainability in residential areas: hazardous waste mitigation and promotion of an safe environment

Abstract

The main purpose of this research was to study the importance of chemical education for sustainability in residential areas, where it is necessary to generate less hazardous waste to promote a safe environment. The methodology used was a systematic review through an updated search in Dialnet and Google Scholar of scientific articles in Spanish, associated with the research descriptors. The results highlight the importance of chemical education for sustainability in achieving a safe environment, an also recognize chemical compounds that are generated in residential areas and hazardous waste that have harmful effects on urban populations. The conclusions highlight the need to promote education in the field of chemistry under the Sustainable Development Goals (SDG) 3 and 4 that propose the protection of health and the environment in residential areas, as well as quality education to achieve this. The practices of identification and proper management of hazardous chemical waste, being efficient, impact the quality of life of citizens, guaranteeing environmentally safe residential areas.

Keywords: chemical education for sustainability; hazardous waste; safe environment.

Educação química para a sustentabilidade em áreas residenciais: mitigação de resíduos perigosos e promoção de um ambiente seguro

Resumo

O principal objetivo desta pesquisa foi estudar a importância da educação química para a sustentabilidade em áreas residenciais, onde é necessário gerar menos resíduos perigosos para promover um ambiente seguro. A metodologia utilizada foi uma revisão sistemática por meio de busca atualizada no Dialnet e Google Acadêmico de artigos científicos em espanhol, associados aos descritores de pesquisa. Os resultados destacam a importância da educação química para a sustentabilidade na obtenção de um ambiente seguro. Eles também identificam compostos químicos gerados em áreas residenciais e resíduos perigosos que têm efeitos nocivos em populações urbanas. As conclusões destacam a necessidade de promover a educação na área da química no âmbito dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 3 e 4, que propõem a proteção da saúde e do meio ambiente em áreas residenciais, bem como uma educação de qualidade para atingir esse objetivo. Práticas eficientes para identificar e gerenciar adequadamente resíduos químicos perigosos impactam a qualidade de vida dos cidadãos ao garantir áreas residenciais ambientalmente seguras.

Palavras-chave: educação química para a sustentabilidade; resíduos perigosos; ambiente seguro.



Introducción

En el marco de una sociedad global orientada hacia el desarrollo sostenible, es importante propiciar cambios en los comportamientos arraigados de los grupos poblacionales que interactúan constantemente con sustancias químicas peligrosas y conviven con estos elementos desconociendo sus propiedades contaminantes. En los centros urbanos, y específicamente en las áreas residenciales, existe un sistema de relaciones y prestaciones de servicios que genera miles de desechos cuyo tratamiento y disposición final, la mayoría de las veces, pone en riesgo la salud de los habitantes y el medio que les rodea. Por lo que resulta necesario desarrollar una educación que permita un manejo de los componentes químicos de los desechos con mayor pertinencia social, orientada a educar ciudadanos con un criterio ecológico, sustentable y autárquico. Rasgos que necesariamente tendrán que prevalecer si se desea realmente impulsar, desde los procesos educativos asociados a la química verde, una sociedad global más equilibrada, armónica y justa.

Para la ONU “una parte fundamental de cómo la química nos puede ayudar, además de la investigación, está en la educación de las futuras generaciones” [1]. Promover una educación que impacte la calidad de vida como objetivo en las comunidades urbanas, especialmente dentro de las áreas residenciales cada día más saturadas ambientalmente, constituye no solo una aspiración de cada nación, sino que es uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Por lo tanto, se considera importante que el compromiso social requerido de todas las partes involucradas inicie en la conexión de los procesos de educación, organización y convivencia, los cuales constituyen condiciones indiscutibles para el alcance de un ambiente seguro.

En la actualidad, la dinámica de las áreas residenciales y la generación de desechos poco controlados demanda soluciones que impacten la conciencia y promuevan la reducción de desechos peligrosos, cuya composición química, la mayoría de las veces, es desconocida por los habitantes en estas zonas urbanas. Pero hay que tener en cuenta que la cotidianidad está impregnada de la química, “desde la alimentación y la medicina, hasta la tecnología y la sostenibilidad. Su relevancia es innegable y su comprensión es fundamental para tomar decisiones informadas en un mundo cada vez más complejo y tecnológico” [2].

En el presente artículo se resalta la necesidad de una educación química para la sostenibilidad en áreas residenciales que esté centrada en la mitigación de desechos peligrosos y en la promoción de un entorno ambientalmente seguro. La educación en este ámbito quiere dar cuenta de la presencia de sustancias químicas en diversos productos de uso cotidiano que son fuente de contaminación, especialmente aquellos que se convierten en residuos peligrosos. Para ello se identifican componentes químicos catalogados como peligrosos y se educa sobre el uso de esos productos y los problemas socio ambientales que trae consigo una inadecuada manipulación de los mismos.

La promoción de una química sostenible surge como una alternativa para atenuar dichos efectos y concientizar sobre las repercusiones de diversas sustancias químicas en la salud humana, beneficiando a las generaciones futuras. A razón de lo descrito, el propósito de esta revisión es estudiar la importancia de la educación química en áreas residenciales y reconocer que la reducción adecuada de los desechos peligrosos es parte de la solución para la promoción un entorno ambientalmente seguro.

Materiales y métodos

Se llevó a cabo una revisión sistemática de bibliografía en cinco áreas generales: 1) educación química para la sostenibilidad, 2) áreas residenciales y manejo de residuos, 3) mitigación de desechos peligrosos, 4) evaluación de agentes químicos y ambiente, y 5) sostenibilidad y promoción de un entorno seguro. Se empleó la metodología PRISMA (figura 1), utilizando las palabras clave “educación”, “química” y “sostenibilidad” en las ecuaciones de búsqueda en Dialnet y Google Académico. El número de resultados obtenidos fue de 74 en Dialnet y de 745 en Google Académico, entre los cuales se encontraron 13 y 689 tesis, 44 y 32 artículos científicos y 15 y 17 revisiones, respectivamente, además de un libro en cada uno de los buscadores.

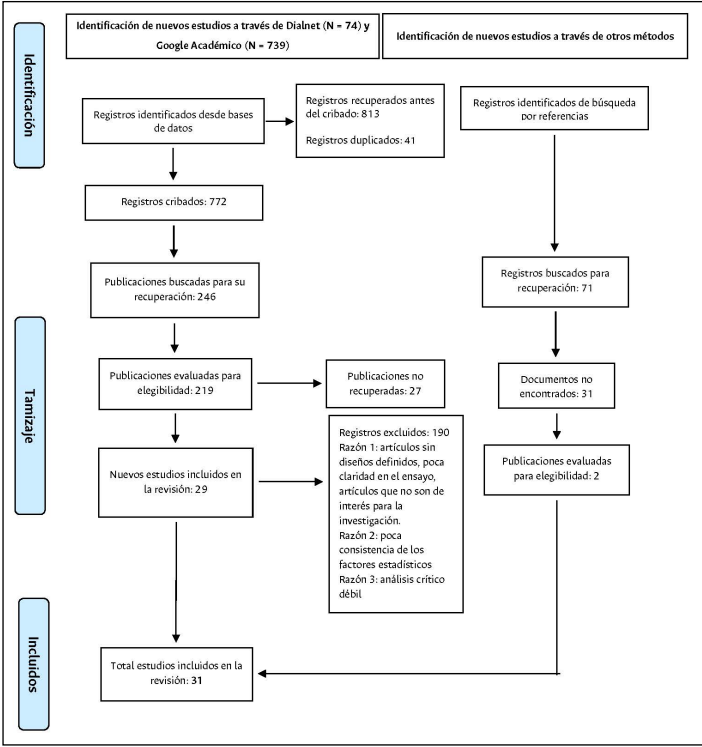


Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA.

La ruta de la revisión se realizó mediante una matriz analítica de registro de información que permitió identificar los efectos de sustancias químicas contaminantes en diversos ambientes. Se revisó un total 813 publicaciones en español en Dialnet y Google Académico, se descartaron aquellas que hacían referencia a indicadores fuera de Latinoamérica y se tuvieron en cuenta artículos científicos, reportes de investigaciones médicas y trabajos de investigación regional, todos relevantes para identificar la presencia de sustancias peligrosas para la salud y el ambiente. A continuación, se reportan los resultados de 31 investigaciones, se tomó como criterio de elegibilidad aquellas realizadas en los últimos 5 años y aquellas que se refieren directamente a la problemática ambiental y a las sustancias químicas presentes en el ambiente dentro de áreas residenciales.

Resultados

En la **tabla 1** se enumeran las áreas de estudio con sus referencias correspondientes y el porcentaje de calidad asociado. Las áreas mencionadas incluyen química, sostenibilidad, educación, residuos y materiales avanzados, entre otras. Cada área tiene las referencias asociadas al estudio, seguidas de un valor porcentual que representa la calidad de la referencia o del trabajo realizado en esa área, los porcentajes fueron calculados con base al 100% de las referencias consultadas, incorporadas progresivamente en cada área desarrollada. La **tabla 2** muestra los hallazgos en las diferentes áreas relacionadas con la química, la sostenibilidad y la educación.

Tabla 1. Áreas de estudio de la búsqueda sobre educación química para la sostenibilidad en áreas residenciales.

Área	Referencias asociadas	Calidad (%)
Educación química para la sostenibilidad	[1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8] y [9]	29,03%
Áreas residenciales y manejo de residuos	[3], [9], [10], [11], [12], [13] y [14]	22,58%
Mitigación de desechos peligrosos	[1], [15], [14], [16], [17] y [18]	19,35%
Evaluación de agentes químicos y ambiente	[14], [15], [18] y [19]	9,67%
Sostenibilidad y promoción de un entorno seguro	[20], [21], [22], [23], [24] y [25]	6%

Tabla 2. Hallazgos por área de estudio.

Área	Hallazgos
Educación química para la sostenibilidad	<ul style="list-style-type: none">• La educación química de calidad para la sostenibilidad se basa en el proceso formativo de la ciudadanía.• Necesita de la planificación de políticas públicas.• Debe considerar la importancia de la enseñanza y el aprendizaje de la química en la formación de ciudadanos responsables y comprometidos con el ambiente.• Se alcanza con la inversión y promoción de una gestión ambiental urbana.
Áreas residenciales y manejo de residuos	<ul style="list-style-type: none">• No existen muchos estudios sobre la importancia de la disposición de desechos y el desarrollo urbanístico.• Los desechos químicos peligrosos en las ciudades provienen en su mayoría de actividades domésticas, sanitarias, industriales y comerciales.
Mitigación de desechos peligrosos	<ul style="list-style-type: none">• Hay un control débil y pocos conocimientos de los alcances de la contaminación por sustancias químicas.• Existen dificultades para el desarrollo de la gobernanza y falta de conciencia en los ciudadanos y en las instituciones sobre la disposición de desechos peligrosos.
Evaluación de agentes químicos y ambiente	<ul style="list-style-type: none">• Es necesario conocer el impacto de agentes químicos en las zonas urbanas para evaluar sus demandas ambientales locales. Por lo tanto, se requiere actualización sobre demandas ambientales.• El avance tecnológico es un aliado para evaluar y educar a la ciudadanía en favor de la protección del ambiente.• Se requiere un conocimiento de la composición química de los desechos en diversos ambientes y niveles educativos.
Sostenibilidad y promoción de un entorno seguro	<ul style="list-style-type: none">• Se necesitan nuevas prácticas para proteger la vida.• Es necesario el diseño de procesos y productos químicos que reduzcan o desaparezcan la generación de sustancias peligrosas.

Educación química para la sostenibilidad

En los espacios educativos, la química siempre se relaciona con componentes tóxicos que contaminan y ponen en riesgo la salud; sin embargo, “es sabido que la química tiene un papel esencial en casi todos los aspectos de la vida, se relaciona con el aire, el agua, los plásticos, el vestuario, comida, agricultura, edificaciones, entre otros” [3], por lo tanto, la química cumple un papel muy importante en la gestión ambiental. “La gestión ambiental urbana del espacio público implica acciones de planificación, diseño y construcción que tienen como objetivo incorporar la dimensión ambiental y mejorar la calidad ambiental y paisajística del espacio público” [4]. Dentro de esta gestión se incluye la problemática de los efectos de diversos residuos en el ambiente, sobre los cuales se debe educar para que la población implemente prácticas que permitan una coexistencia segura con el uso algunos componentes durante su dinámica cotidiana.

Por ejemplo, una educación basada en los problemas ambientales, orientaría la reflexión hacia el impacto de estos componentes en el ambiente: “el aprendizaje basado en problemas (ABP) como estrategia didáctica, asume el estudiante como protagonista del aprendizaje” [5], por lo tanto, la preocupación por los problemas del entorno constituye una ventaja en los ambientes formativos para el

desarrollo sostenible. “La educación para el desarrollo sostenible (EDS) proporciona a los educandos valores, actitudes y conocimientos en pro de dar alternativas de solución a los desafíos sociales, ambientales y económicos que posiblemente se estén dando en el presente y a futuro” [6]. Esto requiere de la activación de procesos formativos ajustados a cada realidad social.

El proceso formativo de la ciudadanía a favor del ambiente se encuentra vinculado a la planificación de políticas públicas, las cuales se ajustan a las necesidades de los centros poblacionales, desde las comunidades menos organizadas hasta la creación de organizaciones que trabajan en beneficio de su entorno. De tal manera, “la EDS apunta a promover competencias que permitan a los individuos reflexionar sobre sus propias acciones” [7]. Además, considerando la importancia de la enseñanza y el aprendizaje de la química como clave para la formación de ciudadanos responsables y comprometidos con el ambiente, y para la consecución de una educación ciudadana en materia del manejo responsable de diversos desechos y especialmente con químicos peligrosos para la salud y el ambiente, “es importante repensar la forma en que la educación debe configurar y transformar la mentalidad de niños, jóvenes y adultos para lograr desarrollar una sensibilidad hacia la vida y los recursos que

posee la tierra, con foco en la transformación social, económica y sostenible” [8].

Mientras más cercana a diversos grupos sea la educación para la protección ambiental, y si se hace de manera integral y abordando diversos escenarios y grupos sociales, mayores serán los efectos en las generaciones futuras. Por tal motivo “es conveniente conocer la presencia y concentración de residuos tóxicos y peligrosos para evaluar el riesgo que su manejo, tratamiento, reprocesado y reutilización, puedan aportar a la salud humana y al medio ambiente” [9]. La educación en química resulta un valioso instrumento para reducir riesgos a la salud y el ambiente, y crear las condiciones necesarias para un entorno más seguro.

Áreas residenciales y manejo de residuos

Por lo general, en las áreas residenciales, el mal manejo de residuos se produce por “mala disposición de los mismos por parte de la ciudadanía, que mezclan los residuos con materiales peligrosos, residuos infecciosos de hospitales y sustancias industriales” [10]. Esta forma de hacerlo afecta la salud por diversas causas, bien sea por lesiones en la manipulación de los residuos o por efectos bacterianos o virales. Es importante señalar que los procesos de ocupación del suelo, el déficit de espacios urbanos de calidad y la intensificación de las desigualdades sociales han marcado el desarrollo de las ciudades actuales. De acuerdo a diversos estudios científicos, “el volumen mundial de residuos peligrosos está provocando el envenenamiento del planeta y de todos sus ecosistemas, con lo que se degrada la calidad de vida de millones de seres humanos y se provocan serios problemas de salud pública” [11]. La magnitud de esta problemática no ha sido evaluada con rigurosidad, pues en algunos casos se desconocen las características y la peligrosidad de ciertos productos. Un producto químico peligroso (PQP) se define como “toda sustancia química, ya sea aislada o mezclada, fabricada u obtenida de la naturaleza que, por la cantidad, características de peligrosidad o combinación de ambas, represente un peligro para la salud humana y el medio ambiente” [12]. Por esto es importante conocer sus propiedades y los niveles de riesgo a los que se expone la salud del ser humano.

Para considerar la peligrosidad de un agente químico derivado de diversos residuos en las áreas residenciales, se establecen diferentes criterios y se mencionan características como las propiedades físico-químicas (explosivo, oxidante, extremadamente inflamable, altamente inflamable e inflamable), los efectos sobre la salud (muy tóxico, tóxico, nocivo, corrosivo, irritante, sensibilizante, carcinogénico, mutagénico, tóxico para la reproducción) y su peligrosidad para el medio ambiente [12]. También se considera peligroso “todo elemento que al ser eliminado constituye un riesgo para la salud humana y el medio ambiente. Para determinar si un residuo es o no peligroso se creó el código CRETIVER (antes Cretib). Un residuo es peligroso si cumple por lo menos con una de estas características (cada letra representa una característica): C (Corrosivo), R (Reactivo), E (Explosivo), T (Tóxico), I (Inflamable), V (Volátil), E (Ecotóxico), R (Radioactivo)” [13]. Estas características permiten clasificar el tipo de efectos derivados de la acción de sustancias peligrosas.

Por ejemplo, en las ciudades se dispone de servicios sanitarios que originan una diversidad de residuos calificados como peligrosos, “los desechos sanitarios se consideran los segundos desechos más peligrosos del mundo después de los desechos radiactivos, estos abarcan diversas formas, como objetos punzocortantes, partes del cuerpo humano, sangre, desechos químicos, desechos farmacéuticos y dispositivos médicos” [14]. Además, elementos como “arsénico, cadmio, mercurio, antimonio, disolventes clorados, elementos con características de inflamabilidad, corrosividad, reactividad, ecotoxicidad, toxicidad o cualidades cancerígenas, mutagénicas o teratológicas, suelen estar presentes en los residuos urbanos,

normalmente procedentes de actividades industriales y hospitalarias” [9], al igual que detergentes, pinturas, lubricantes y otros compuestos que se usan en la cotidianidad residencial urbana.

Las superficies urbanas tienen características compartidas por las dinámicas residenciales, donde el deterioro progresivo de suelos y de la calidad del aire se intensifica a medida que se incrementa la producción de desechos, con el aumento de la densidad poblacional. Por ejemplo, “desde la expansión urbana, el suelo ha sido utilizado como vertedero de desechos sólidos y líquidos. (...) Un problema es la dificultad para establecer la definición de ‘concentraciones normales’. Puede ser relativamente sencillo establecer concentraciones peligrosas para sustancias hechas por el hombre que no se presentan naturalmente en el suelo, pero esta labor es más compleja cuando se trata de metales pesados y metaloides, los cuales pueden tener como origen la meteorización de rocas y minerales” [15]. La atención que debería darse a los tipos de desechos y la distribución de cualquier origen crea preocupación por su impacto negativo en los ciudadanos y por ende en la superficie urbana de las ciudades. “Actualmente, el manejo adecuado de los residuos es uno de los retos ambientales a los que se enfrentan todos los países, en sus etapas de recolección, tratamiento y disposición” [16]. Esto demanda una gestión efectiva por parte de las autoridades y de organizaciones no gubernamentales para abordar esta problemática tanto en las zonas residenciales como fuera de ellas.

Disposición de desechos peligrosos

En las áreas residenciales es recurrente la contaminación química del aire que “se genera por la presencia de agentes químicos que alteran la composición del mismo, perjudicando su calidad. Se presentan en forma de partículas, gases y vapores, que pueden causar daños a la salud, cuando nos exponemos de manera prolongada y crónica” [17]. Con relación a estos contaminantes químicos del aire, se señala “que son 5 las variedades de materiales que son considerados como los mayores contaminantes del aire dado que constituyen más del 90% de los factores de contaminación en las ciudades, estas son: monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburo (HC), óxido de azufre (SO_x) y sólidos suspendidos (PM-10, PM-2,5). Tanto las fuentes naturales como antropogénicas provocan la emisión de sustancias contaminantes a la atmósfera” [18]. Esta variedad de compuestos da cuenta de la magnitud e impacto que tienen en el ambiente.

Otro de los problemas que resalta en las zonas residenciales son los desechos tecnológicos, al respecto se explica que “uno de los principales y serios problemas actuales es la disposición de este tipo de basura, ya que la mayoría de los dispositivos electrónicos contienen elementos tóxicos. Si no se manejan o manipulan adecuadamente durante el proceso de remoción, causará un gran daño al medio ambiente” [19]. Cada día se hace más apremiante en las áreas residenciales impulsar un manejo responsable de estos desechos. Se resalta la necesidad de promover un conocimiento adaptado a solucionar las necesidades sociales en las ciudades. “El manejo responsable de los PQP tiene relación directa con el conocimiento, comprensión y percepción de riesgo que tengan los individuos involucrados” [20]. Por ello es preciso dar a conocer sus efectos para saber cómo deben actuar las personas en lo relacionado con estos compuestos.

El manejo inadecuado de estos desechos contamina con elementos que el ser humano no conoce o considera inocuos, pero que pueden afectar su ecosistema y, en consecuencia, su salud. En el caso de desechos tecnológicos, se mencionan porque los desechos de “la chatarra electrónica se pueden dividir en dos grupos: metales básicos: cobre del 20 al 50%, hierro del 8 al 20%, níquel del 2 al 5%, estaño del 4 al 5%, plomo aproximadamente 2%, aluminio del 2 al 5% y zinc del 1 al 3%, y metales preciosos: oro de 170 a 850 g aproximadamente el 0,1%, plata de 198 a 1698 g aproximadamente el

0,2%, paladio de 3 a 17 g aproximadamente el 0,005%” [21]. Estos elementos son señalados en menor o mayor cuantía, de acuerdo a la concentración en áreas residenciales y su desarrollo comercial, es decir, a mayor número de agentes químicos peligrosos, mayor son sus efectos sobre el ambiente.

Evaluación de agentes químicos y ambiente

Las evaluaciones de los alcances de la contaminación por sustancias químicas en las ciudades representan una limitante para conocer sus efectos en naciones latinoamericanas, enfocadas en políticas poco favorecedoras de la disposición responsable de residuos líquidos y sólidos. Según la identificación realizada, hay que tener en cuenta dentro de las emisiones de agentes químicos en las ciudades la importancia de “los compuestos orgánicos volátiles (COV). Son hidrocarburos que existen en estado gaseoso a temperatura ambiente o son altamente volátiles a esta temperatura. Tienen fuentes naturales (VOC biológicas) y artificiales (debido a la evaporación de disolventes orgánicos, quema de combustible, transporte, etc.). En cuanto a su riesgo, los COV se pueden dividir en 3 grupos. Compuestos de clase A: pueden causar daños importantes al medio ambiente. Por ejemplo: acetaldehído, anilina, tricloroetileno, etc. Compuestos de clase B: tienen menos impacto en el medio ambiente. Por ejemplo: acetona y etanol. Junto con los NO_x y la luz solar, los COV son el precursor del ozono a nivel del suelo (ozono troposférico), que es nocivo para la salud y puede producir el llamado ‘smog fotoquímico’” [18]. Estos efectos son poco conocidos en el ámbito comunitario de las áreas residenciales.

Ahora bien, es preciso señalar que la problemática avanza, “la cantidad y diversidad de contaminantes se encuentra en constante incremento a causa del desarrollo agroquímico e industrial. Esta diversidad, y la transformación en los suelos por la actividad biológica de los componentes orgánicos en diversos metabolitos, hacen que los estudios de suelos para identificar a los contaminantes sean complejos y costosos” [15]. Se destaca en las ciudades que “los rellenos sanitarios (RS) y los vertederos abiertos son responsables de la generación significativa de altas cantidades de lixiviados y gases que se incorporan al agua subterránea y a la atmósfera, principalmente COV, metales pesados y macro inorgánicos (N y P). Debido a que los RS bien diseñados conllevan altos costos de instalación, operación y mantenimiento” [22]. Esto causa deficiencias en el control de emisiones contaminantes en áreas urbanas. Por tanto, en muchas ciudades son escasos los estudios de los efectos contaminantes de diversas sustancias químicas que se producen en su quehacer cotidiano y la manera en que se interactúa con ellas. En consecuencia, la población desconoce sus efectos, desde los más leves hasta los más peligrosos, por lo que existe un déficit de acciones preventivas para la mitigación de desechos y sus efectos nocivos a la salud y los ecosistemas urbanos.

Sostenibilidad y promoción de un entorno seguro

El desarrollo de la sostenibilidad para promover un ambiente seguro se orienta a una constante dinámica de actualización de las demandas ambientales, “el desarrollo sostenible no es un estado de armonía fijo, sino un proceso de cambio que va dirigido al uso adecuado de procesos científicos y tecnológicos que no atenten contra el bienestar prospectivo de las generaciones presentes ni de las generaciones futuras” [23]. El avance tecnológico puede convertirse en un gran aliado para mitigar efectos nocivos y replantear estrategias de impacto ecológico para las ciudades. En este orden de ideas, “el enfoque de la sostenibilidad o sustentabilidad es multidisciplinario, multiescala y multiperspectiva porque abarca, entre otros ámbitos, la economía, la cultura, las estructuras sociales, además del uso y protección de los recursos” [24]. Por lo tanto, para el manejo de sustancias químicas provenientes de diversas fuentes, algunas veces desconocidas, en las áreas urbanas residenciales,

este enfoque se adecúa a las prácticas humanas de conservación ambiental y el impacto que las mismas pueden tener en las generaciones futuras.

Reflexionando sobre la gestión que se emprende para el avance oportuno de los ODS, algunos expertos aseguran que “hoy el desarrollo sostenible sufre las consecuencias de un incompleto estudio y manipulada interpretación. Por ello se necesita innovar en lo metodológico y práctico. Pero sin hacer lecturas parcializadas que miran fundamentalmente en la naturaleza y soslayan la economía y la sociedad ante un fenómeno acuciante de analfabetismo ambiental” [25]. Entre las alternativas de desarrollo surgen propuestas: “la química verde se relaciona con diseño de procesos y productos químicos y que estos reduzcan o eliminen la generación de sustancias peligrosas, se hace referencia a ‘verde’ debido a que con ella se busca un ambiente inocuo” [4]. Esta química resulta vital para la promoción de un ambiente seguro, la cual debe ajustarse a diseños y políticas educativas, “recomendamos la creación específica de asignaturas medioambientales en las distintas etapas educativas, que contribuirían a resolver los graves problemas medioambientales a los que nos enfrentamos” [26]. Por lo tanto, para la promoción de un ambiente seguro, es necesario un proceso educativo en todos los entornos y ambientes posibles.

De acuerdo al recorrido documental, actualizado y sistemático de la información, se puede afirmar que “el manejo inadecuado de los desechos puede conducir a la contaminación del agua, el suelo y el aire, y las personas están expuestas a altos niveles de este ambiente contaminado e insalubre” [27]. Por consiguiente, “el manejo inadecuado de los residuos sólidos puede tener efectos negativos en la salud pública, el medio ambiente y la economía” [28]. En cuanto a los mecanismos para desarrollar una educación sostenible y para asegurar un ambiente sano, se puede iniciar con una adecuada disposición de los desechos que se generan alrededor de las áreas residenciales mediante un proceso formativo planificado y amplio: “la generación de residuos sólidos urbanos está orientada a lograr un desarrollo sostenible, lo que requiere políticas claras, reglas que fomenten la buena gobernanza y la conciencia de los seres humanos sobre la necesidad de cambiar sus hábitos tanto en la producción como en el consumo” [29]. La crisis civilizatoria obliga a la humanidad a generar nuevas prácticas para asegurar su vida en el planeta, por lo tanto, la educación química para la sostenibilidad en áreas residenciales conduce a la mitigación de desechos peligrosos, como parte de una acción estratégica conjunta entre todos los actores sociales, y permite la promoción de un entorno ambientalmente seguro. De acuerdo a los indicadores del estudio, se resaltan en la **figura 1** los hallazgos más relevantes de la revisión sistemática, de acuerdo con las categorías manejadas por los artículos revisados, los cuales revelan un conjunto de determinantes en la dinámica urbana que se interrelacionan con la problemática estudiada.

Discusión

Asumiendo que el origen de los residuos catalogados como peligrosos provienen de diferentes actividades domésticas, industriales y sanitarias, su disposición adecuada depende del conocimiento que tengan los pobladores de las ciudades sobre las repercusiones que dichos desechos pueden tener en su salud y en la conservación del medio ambiente que les rodea. Por lo tanto, la educación es la principal estrategia en las áreas residenciales para alcanzar este conocimiento tan importante para el discernimiento entre los desechos altamente peligrosos y los que tienen efectos menos nocivos, así como la disposición adecuada de los mismos. Con respecto al origen y las repercusiones de estos residuos, de acuerdo con la investigación, se “identificó que los residuos en los que se debe prestar atención son los envases vacíos de agroquímicos, aceites lubricantes y aceites vegetales usados, ya que no hay control sobre ellos en el área

de estudio, lo que causa contaminación al ambiente (aire, suelo y agua) en que viven sus habitantes, y las acciones realizadas como la reutilización ponen en riesgo su salud” [16]. La problemática es señalada también como relevante en las zonas residenciales, pues allí es donde tiene su origen más común: “la contaminación ocasionada por la generación de los residuos domésticos, industriales y hospitalarios constituye un problema serio y complejo de una civilización que ha promovido el crecimiento económico y la industrialización como prototipo de la modernización y el desarrollo económico” [11].

En cuanto al impacto de esta problemática, esta es confirmada por diversos informes y trabajos de investigación, donde “los países de Europa y Latinoamérica tienen similitudes y diferencias en torno a la gestión pública, ambas regiones se enfocan en la administración eficiente de los recursos públicos, pero a diferencia de América Latina, la gestión pública enfrenta desafíos como la corrupción y la falta de recursos” [30]. Ante este problema, la educación para un entorno ambientalmente seguro emerge como una necesaria política pública en las ciudades, donde el impacto y desconocimiento de las propiedades químicas de los contaminantes representa una amenaza. En cuanto al desarrollo sostenible en las áreas residenciales, surgen algunas alternativas, como las mencionadas, para “el desarrollo de baterías, materiales de construcción sostenibles; mejorar la reciclabilidad y biodegradabilidad de una serie de productos; o convertir el dióxido de carbono (CO_2) y los desechos en sustancias intermedias químicas” [31]. Las iniciativas para mejorar el ambiente en las áreas residenciales son como las mencionadas en “un estudio del Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (CCCS) en el 2020 que señaló que, basado en encuestas del sector constructor, hoy 35% de los proyectos residenciales del país emplean materiales de bajas emisiones. Además, más de 40% de los proveedores y fabricantes de dichos insumos cuentan con criterios de sostenibilidad que superan el 80%” [32].

Con relación a la química como ciencia comprometida con el mejoramiento ambiental y los avances del conocimiento, se sostiene que “el uso e implantación de las tecnologías químicas más sostenibles, y en particular la electroquímica, se presentan como alternativas a las tecnologías más tradicionales, con el objetivo de promover procesos y transformaciones químicas más respetuosas con el medio ambiente” [33]. Situación que da cuenta de los esfuerzos por mejorar el impacto de las sustancias peligrosas en las ciudades, en beneficio de la salud de sus habitantes y en mejora del medio donde viven. De tal manera, “un desafío para la educación científica es impactar en la formación ciudadana; es decir, que desde ella se enfoquen acciones para ayudar a superar problemas de la región como la pobreza, la calidad de vida digna y la injusticia” [34]. En el campo de la química se gesta una nueva visión para que, en áreas residenciales, donde el impacto de diversas sustancias es cada día más evidente, se muestre como una necesidad la educación en los espacios sociales comunitarios que mitiguen la incidencia de estos compuestos en el modo de vida de sus residentes.

Conclusiones

De acuerdo al objetivo planteado de estudiar la importancia de la educación química en áreas residenciales, para conocer los procesos de mitigación de desechos peligrosos como parte de la solución desde la promoción de un entorno ambientalmente seguro, se confirma que la educación química tiene un impacto directo sobre la salud del ser humano y es una de las principales estrategias para lograr un ambiente seguro. Sin embargo, en la revisión teórica, las investigaciones no establecen una temática directa de clasificación de residuos químicos peligrosos conectados directamente con las dinámicas urbanas de las áreas residenciales, o iniciativas para una educación en áreas residenciales para el tratamiento de residuos. Mientras que sí se demuestra en la revisión sistemática un reco-

nocimiento parcial de desechos peligrosos en áreas urbanas residenciales para diferentes ámbitos, bien sea institutos educativos, hospitales o municipios.

Con relación a la educación química para la sostenibilidad, se reconoce la importancia de impulsar acciones educativas desde la gestión pública y la organización ciudadana para mitigar los efectos de estas sustancias peligrosas, a través de planes y programas de impacto hacia el conocimiento y concientización de los efectos sobre la salud y el medio ambiente. En el desarrollo actual de los procesos de sostenibilidad en áreas residenciales, se determinó que no son desarrollados de modo eficiente procesos para la disposición adecuada de desechos peligrosos, lo que justifica la presencia de diversos componentes químicos y altos niveles de contaminación en áreas urbanas, tanto en el suelo como en el aire y en el agua. En cuanto a la promoción de un ambiente seguro, se destacan algunos avances asociados a nuevas tecnologías y procesos que pueden contribuir con una educación sostenible para la promoción de un ambiente seguro bajo los principios de la sostenibilidad.

Referencias

- [1] Noticias ONU, “La química de todos los días”, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://news.un.org/es/story/2019/09/146140>. [Último acceso: 17/03/2024].
- [2] Studenta, “La Importancia de la Química en la Vida Cotidiana Aplicaciones y Relevancia”, 2023. [En línea]. Disponible: <https://es.studenta.com/content/126226342/la-importancia-de-la-quimica-en-la-vida-cotidiana-aplicaciones-y-relevancia>. [Último acceso: 15/03/2024].
- [3] I. Guzmán, “Propuesta para el fortalecimiento de la sostenibilidad ambiental a través del uso de la química verde en educación técnica en química”, tesis de especialización, Universidad ECCI, 2021.
- [4] R. Carrasco-Jocope, S. Vigil-Requena, V. Saldaña-Yoni y D. González-González, “Contaminación urbano ambiental y espacio público del centro de Piura, Perú: Revisión sistemática”, *Koinonia*, vol. 8, nro. 16, 2023. DOI: <https://doi.org/10.35381/r.k.v8i16.2542>
- [5] L. Castro, R. Nieto, J. Bilbao y F. Sánchez, “Aprendizaje Basado en Problemas-ABP. Experiencia educativa en Biología y Química en la Universidad Metropolitana de Barranquilla - Colombia”, *Revista Interamericana de investigación, Educación y Pedagogía*, vol. 15, nro. 2, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.15332/25005421.6091>
- [6] D. Gómez-Aguilar, J. Esteban-Muñoz y E. Guevara-Ortiz, “Fortalecimiento de la competencia para el desarrollo sostenible análisis crítico: aplicación de un ambiente virtual de aprendizaje”, *Discimus: Revista Digital de Educación*, vol. 2, nro. 2, pp. 126–140, 2023. DOI: <https://doi.org/10.61447/20231211/art7>
- [7] H. Odetti, *Prácticas de la enseñanza de la Química que promuevan la Educación para el Desarrollo Sostenible: tensiones entre la tradición y los cambios*, Santa Fe, Universidad Nacional del Litoral, 2020.
- [8] C. Cárcamo, N. Cifuentes y Y. Sierralta, “Resignificación del Compromiso Educativo en la Formación de sociedades Sostenibles”, en *Investigar y Educar para la Sostenibilidad. Principios Pedagógicos*, San Cristóbal, Centro de Investigación Educativa Georgina Calderón (UPEL), 2022, pp. 38–64.
- [9] E. Medioambiental, “Características químicas de los residuos sólidos urbanos”, 2022. [En línea]. Disponible: https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental. [Último acceso: 28/05/2024].
- [10] M. Rey y L. Avendaño, “Estrategia para el Manejo de residuos Sólidos en el Conjunto Residencial Aitana del Salitre”, seminario de investigación, Universidad EAN, Bogotá, 2023.
- [11] R. Mex-Álvarez, P. Garma-Quen y W. León-Reyes, “Manejo de residuos peligrosos biológicos e infecciosos en una escuela de química de nivel superior”, *RIDE. Revista Iberoamericana de Investigación y Desarrollo*, vol. 10, nro. 20, 2020. DOI: <https://doi.org/10.23913/ride.v10i20.651>

- [12] A. Gil y S. Pell del Río, “Diagnóstico del manejo de productos químicos peligrosos en el sector del trabajo por cuenta propia en dos comunidades de la ciudad de La Habana, Cuba”, *Estudios de Desarrollo social: Cuba y América Latina*, vol. 8, nro. 1, 2020. Disponible: <https://cuba.vlex.com/vid/diagnostico-manejo-productos-quimicos-873922427>
- [13] U. MEDICAL, “Clasificación de los residuos hospitalarios”, 2023. [En línea]. Disponible: <https://um.com.co/blog/clasificacion-de-los-residuos-hospitalarios>. [Último acceso: 30/05/2024].
- [14] R. Dávila et al., “Impacto en la salud pública por el manejo inadecuado de los desechos peligrosos”, *Boletín de Malaria y Salud Ambiental*, vol. 63, pp. 63–71, 2022. DOI: <https://doi.org/10.52808/bmsa.7e6.621.009>
- [15] N. Rodríguez, M. Mac Laughlin y D. Pennock, *La Contaminación del Suelo: Una Realidad Oculta*, Roma, Organización de naciones unidas para la Alimentación y la agricultura (FAO), 2020.
- [16] M. Aguilera, A. Garay-Fernández, M. Contreras-Ramírez, V. Ávila-Vázquez y Y. Rodríguez-Martínez, “Diagnóstico de las prácticas comunes del manejo de residuos en localidades marginadas: un caso de estudio”, *Revista de ciencias ambientales*, vol. 55, nro. 2, 2021. DOI: <https://doi.org/10.15359/rca.55-2.12>
- [17] M. Bravo, “La Contaminación Química del Aire y su Influencia en las Capacidades Cognitivas de los Escolares a Nivel de Lima Metropolitana”, tesis de doctorado, Universidad de San Martín de Porres, 2023.
- [18] K. Vera, M. Zapata, A. Nomberto y B. Pasco, “Niveles de concentración de material particulado en el aire en Lima Metropolitana: Un estudio Teórico”, *Revista de Ciencias Sociales y Sostenibilidad*, vol. 1, nro. 1, pp. 80–103, 2022. DOI: <https://doi.org/10.56111/recsys.2021.v1.n1.p80-103>
- [19] D. Cajamarca-Carrasco, L. Hidalgo-Viteri, S. Vaca-Zambrano y Y. Jua-Tandu, “Basura tecnológica, contaminante ambiental silenciosa del siglo XXI causas y repercusiones”, *Dominio de las Ciencias*, vol. 8, nro. 2, pp. 228–244, 2022. DOI: <https://doi.org/10.23857/dc.v8i2.2753>
- [20] S. Pell del Río, M. Perdomo, J. Llanes y D. Valdez, “Nivel de seguridad en el manejo de los productos químicos peligrosos en la comunidad Mantilla”, *Revista Cubana de Salud Pública*, vol. 45, nro. 3, 2020.
- [21] H. Molina Zambrano, “Modelo de Procedimientos sobre el manejo de desechos electrónicos en la Universidad Estatal Del sur del Manabí”, tesis de grado, Universidad Estatal Del sur del Manabí, 2020.
- [22] A. Dávila-Sámano, L. Castillo-Suárez, I. Linares-Hernández y V. Martínez-Miranda, “Gestión de los residuos sólidos urbanos y su efecto en el aire, agua y suelo”, *Alfa Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinaria*, vol. 5, nro. 15, 2021. DOI: <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v5i15.128>
- [23] B. Madrid-Rangel, L. Gutiérrez y J. Vielma, “La Enseñanza de la Química desde la Perspectiva de una Educación para el desarrollo Sostenible”, *Acta Bioclínica*, vol. 10, nro. 19, 2020.
- [24] A. Ivanova, “Cambio climático y desarrollo Sostenible, retos y oportunidades”, *UNAM Internacional*, nro. 3, pp. 14–31, 2022. Disponible: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8929552>
- [25] M. Charbonet, “Una didáctica de la Química para el desarrollo sostenible”, *Varona*, nro. 74, 2022. Disponible: <https://www.re-dalyc.org/journal/3606/360657468025/html/>
- [26] F. J. Hoyuelos-Álvaro y J. Ibáñez-Quintana, “Conocimientos previos erróneos del alumnado en la asignatura de Química del Medio Ambiente”, *Education in the Knowledge Society (EKS)*, nro. 24, pp. 1–24, 2023. DOI: <https://doi.org/10.14201/eks.28493>
- [27] M. Herrera-Uchalin, Y. Valiente-Saldaña, J. Garibay-Castillo y S. Herrera-Cherres, “Manejo de residuos sólidos en la gestión municipal; revisión Sistemática”, *Koinomía*, vol. 8, nro. 16, 2023. DOI: <https://doi.org/10.35381/r.k.v8i16.2540>
- [28] J. Chancafe, “Análisis medioambiental del manejo de residuos sólidos de los mercados abiertos en Perú, una revisión narrativa”, *Revista de ciencias*, vol. 25, nro. 2, 2023. DOI: <https://doi.org/10.25100/rc.v25i2.12514>
- [29] L. Sumarriva-Bustinza, H. Ticona-Arapa, N. Zela. Payi, N. Chambi. Condori y N. Chávez-Sumarriva, “Manejo de residuos sólidos para el cuidado del medioambiente: una necesidad para la calidad de Vida”, *ALFA*, vol. 7, nro. 20, pp. 408–417, 2023. DOI: <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v7i20.224>
- [30] V. Trelles-Díaz, Y. Valiente y J. de Valladolid-Martínez, “Gestión de residuos sólidos para elaborar proyectos de inversión”, *Koinonia*, vol. 8, nro. 16, 2023. DOI: <https://doi.org/10.35381/r.k.v8i16.2544>
- [31] E. Pública, *Química Sostenible para una Vida Saludable*, México D. F., Dir. Gral. de Educación Superior para el Magisterio, 2022.
- [32] D. Sierra, “Lineamientos para el Manejo Sostenible de Residuos de Placas de Yeso en la Ciudad de Medellín. Una Mirada al Manejo Sostenible de los Residuos de Construcción y Demolición (RDC)”, tesis de maestría, Instituto Tecnológico Metropolitano, 2022.
- [33] J. Iniesta y M. Martínez, “Objetivos de Desarrollo Sostenible y Educación para el Desarrollo Sostenible: Aplicaciones a la Enseñanza de la Asignatura Cinética Química del Grado en Química”, *Revista de la Facultad de Educación de Albacete*, vol. 35, nro. 2, pp. 17–33, 2020. DOI: <https://doi.org/10.18239/ensayos.v35i2.2250>
- [34] D. Parga, “Del CTSA educativo a la ambientalización del contenido y la formación ciudadana ambiental”, *Revista iberoamericana de ciencia, tecnología y sociedad*, vol. 17, nro. 51, pp. 117–140, 2022. Disponible: <https://ojs.revistacts.net/index.php/CTS/artic/view/322>

Citación del artículo:

R. M. Chuquillanqui Galarza, E. S. Carhuachuco Rojas, J. L. Medina Aliaga, G. J. Vela Urbina y G. O. Zurita, “Educación química para la sostenibilidad en áreas residenciales: mitigación de desechos peligrosos y promoción de un entorno ambientalmente seguro”, *Rev. Colomb. Quim.*, vol. 53, nro. 1, pp. 13–20, 2024. DOI: <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v53n1.114871>



Promoviendo la educación sobre sustancias químicas y su impacto en el ambiente: un enfoque para la salud humana

Resumen

En el planeta tierra existen sustancias químicas que resultan de procesos químicos intencionados, artificiales o sintéticos. Aminorar sus efectos sobre los ecosistemas y sobre la salud humana constituye un reto importante para la sociedad actual, especialmente en la región latinoamericana. El objetivo de este estudio fue revisar la importancia de promover la educación sobre las sustancias químicas y su impacto en el ambiente y en la salud humana. La investigación está basada en una revisión sistemática de bibliografía científica asociada a la educación para el manejo de sustancias químicas en Latinoamérica, entre los años 2019 y 2024. Se consideraron tres temas principales: educación sobre sustancias químicas, sustancias químicas y ambiente, y determinantes de la salud humana. Desde los resultados investigativos se infiere que es preciso elevar desde la educación los niveles de conciencia social para que las personas usen de forma pertinente, eficaz y efectiva las sustancias químicas.

Palabras clave: educación; salud humana; sustancias químicas; medio ambiente.

Promoting education about chemicals and their impact on the environment: An approach to human health

Abstract

There are chemical substances on planet Earth that result from intentional, artificial or synthetic chemical processes. Reducing their effects on ecosystems and human health is an important challenge for today's society, especially in Latin America. The objective of this study was to review the importance of promoting education about chemical substances and their impact on the environment and human health. This research is based on a systematic review of scientific literature associated with education in the management of chemical substances in Latin America, between the years 2019 and 2024. Three main topics were considered: Chemical substances education, chemical substances and environment, and determinants of human health. From the research results, it is inferred that it is necessary to raise, through education, the levels of social awareness for people to use chemical substances in a pertinent, efficient and effective way.

Keywords: education; human health; chemical substances; environment.

Promover a educação sobre os produtos químicos e o seu impacto no ambiente: uma abordagem a saúde humana

Resumo

No planeta Terra existem substâncias químicas que resultam de processos químicos intencionais, artificiais ou sintéticos. A redução dos efeitos nos ecossistemas e na saúde humana constitui um desafio importante para a sociedade atual, especialmente na região latino-americana. O objetivo deste estudo foi revisar a importância da promover a educação sobre substâncias químicas e seu impacto no meio ambiente e na saúde humana. A pesquisa baseia-se em uma revisão sistemática da literatura científica associada à educação em gestão de substâncias químicas na América Latina, entre os anos de 2019 e 2024. Foram considerados três temas principais, educação sobre substâncias químicas, substâncias químicas e meio ambiente, e determinantes da saúde humana. A partir dos resultados da pesquisa infere-se que é necessário elevar, por meio da educação, os níveis de consciência social para que as pessoas utilizem as substâncias químicas de forma pertinente, eficiente e eficaz.

Palavras-chave: educação; saúde humana; substâncias químicas; meio ambiente.



Introducción

La educación, en cualquiera de sus modalidades y formas, es el instrumento más importante con el que cuentan las sociedades en la actualidad para propiciar los cambios actitudinales y epistemológicos necesarios para el desarrollo de las naciones. Con base a esta consideración, se realizó este estudio sobre el impacto que generan las sustancias químicas en el ambiente y en la salud humana. Para este propósito, se desplegó un estudio de naturaleza documental, donde se asumió una revisión crítica-exploratoria con respecto a los ejes temáticos de la investigación, para comprender y aprehender de mejor modo la lógica y la dinámica del fenómeno abordado.

En los últimos años, diversos estudios científicos han determinado que algunas sustancias químicas son peligrosas y nocivas, tanto para el ambiente como para la salud humana: “cada persona tiene contacto a diario con un sinnúmero de sustancias químicas, como sociedad hemos normalizado el uso y la presencia de estas sustancias en la cotidianidad, incorporándolas en la rutina de la vida humana” [1]. Estas sustancias pueden causar innumerables patologías y afecciones, pero también pueden ser beneficiosas y aumentar el bienestar y la calidad de vida en el mundo, tal como ocurre con los aportes de la industria farmacéutica o la industria agrícola.

Existen sustancias químicas que contienen contaminantes orgánicos persistentes que afectan la salud humana. “Los contaminantes orgánicos persistentes (COP) son sustancias químicas que suponen una amenaza para la salud humana y el medio ambiente de todo el planeta, debido a que permanecen en el medio ambiente, al ser resistentes a la degradación, son bioacumulables, se incorporan en los tejidos de los seres vivos, pudiendo aumentar de concentración según se sube a niveles más altos de la cadena trófica” [2]. Estos y otros compuestos, algunas veces con un impacto a la salud poco conocido en las comunidades, pasan en ocasiones inadvertidos en las dinámicas sociales. Por lo tanto, “al mejorar la calidad de la educación en química, estaremos preparando a las generaciones futuras para enfrentar los desafíos científicos y tecnológicos del mundo actual y contribuir al desarrollo sostenible de la sociedad” [3].

En este sentido, esta investigación pretende contribuir a incrementar el acervo gnoseológico que se maneja hasta el momento con respecto a este tema. También servirá de marco conceptual para la reflexión, discusión y apoyo referencial que estimule el desarrollo de más indagaciones en esta área, de tal manera que la educación sobre sustancias químicas y su impacto en el ambiente se oriente a mejorar el entorno con un enfoque para mejorar también la salud humana.

Materiales y métodos

Para el desarrollo de esta investigación se realizó una revisión sistemática de fuentes bibliográficas con el objetivo de hacer un análisis exhaustivo y obtener respuestas a las preguntas de investigación establecidas. Además, se utilizaron estudios de mapeo sistemático para estructurar el tema de investigación.

Preguntas de la investigación

Para iniciar la revisión sistemática es fundamental formular las preguntas de investigación, ya que estas guían las etapas posteriores del proceso. La **tabla 1** presenta las preguntas de investigación (RQ) definidas junto con sus respectivos objetivos.

Tabla 1. Preguntas y objetivos de la investigación.

Pregunta de investigación	Objetivo
RQ1: ¿Qué importancia tiene la educación sobre sustancias químicas?	Describir la importancia de la educación sobre sustancias químicas.

RQ2: ¿Cuál es la repercusión del manejo de sustancias químicas en el ambiente?	Determinar la repercusión del manejo de sustancias químicas en el ambiente.
RQ3: ¿Qué determinantes de la salud están asociados con el manejo adecuado de sustancias químicas para un ambiente sano?	Establecer los principales elementos determinantes de la salud asociados a un manejo adecuado de sustancias químicas para un ambiente sano.

Fuentes de información y estrategia de búsqueda

Para identificar los trabajos de investigación relevantes se consultaron varias fuentes de información y se implementó una ecuación de búsqueda para cada una de las plataformas, como se detalla en la **tabla 2**.

Tabla 2. Fuentes de información y ecuaciones de búsqueda.

Motor	Ecuación	Criterios	Número de recuperaciones
Dialnet	“química” and educación and salud	Solo artículos científicos de los últimos 5 años y de países latinoamericanos	137
Google Scholar	“química” and “educación” and salud and ambiente and “latinoamericanos”	Solo artículos científicos de los últimos 5 años	392
Science Direct	“química” and “educación” and salud and ambiente	Páginas web especializadas	6

Selección de estudios

A continuación, se describen los pasos seguidos para la selección y filtrado de los 529 documentos identificados. Como resultado, se identificaron 29 artículos relevantes, como se ilustra en la **figura 1**.

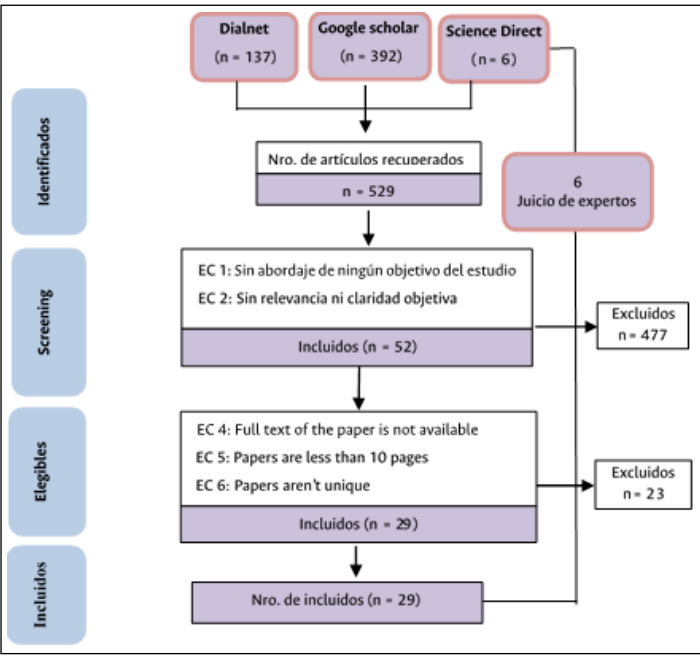


Figura 1. Pasos para la selección y filtrado de documentos.

Evaluación de calidad

En esta fase se evaluó la calidad de los estudios que cumplieron con los criterios de inclusión y exclusión. La lista final de artículos incluidos en la investigación se identificó aplicando seis criterios de evaluación de calidad (QA):

- QA1: objetivos claros y precisos.
- QA2: metodología descripta y referenciada.
- QA3: hallazgos relevantes y acordes a los objetivos de este estudio.
- QA4: aportes específicos y sugerencias.
- QA5: uso adecuado del lenguaje técnico.

En esta fase se llevó a cabo una evaluación de calidad de los 29 estudios que cumplían los criterios de selección. Para determinar la relevancia de cada estudio, se realizó una evaluación individual basada en seis criterios de evaluación de calidad. Todos los estudios primarios seleccionados, un total de 29, cumplieron satisfactoriamente con cada uno de los criterios de calidad (QA) establecidos.

Resultados

Esta revisión sistemática de bibliografía científica, asociada a la educación sobre el manejo de sustancias químicas en Latinoamérica, con un rango de publicación entre los años 2019 y 2024, constituye un diseño documental de tipo descriptivo. Se recopilaron artículos, libros e informes publicados en los últimos cinco años de las bases de datos Dialnet, Google Scholar y Science Direct. Se tuvieron en cuenta tres descriptores esenciales del tema: educación sobre sustancias químicas, sustancias químicas y ambiente y determinantes de la salud humana (figura 2). Se realizó una revisión crítica actualizada, excluyendo aquellos documentos que describían efectos en especies animales, fuera de Latinoamérica y los artículos duplicados, lo que permitió un análisis crítico de 29 documentos asociados directamente con los descriptores de la temática de estudio. A partir de los documentos se establecieron supuestos epistemológicos, teóricos y empíricos para comprender y aprehender la lógica y la dinámica del fenómeno abordado. En función de revisar la importancia de promover la educación sobre las sustancias químicas y su impacto en el ambiente y en la salud humana, los documentos se clasificaron en tres áreas: educación y sustancias químicas, sustancias químicas y ambiente, y determinantes de la salud, como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Distribución de referencias por área de estudio.

Área	Referencias	Calidad (%)
Educación y sustancias químicas	[1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10] y [11]	11/29 (37,9%)
Sustancias químicas y ambiente	[4], [5], [9], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24] y [25]	17/29 (58,6%)
Determinantes de la salud humana	[9], [14], [17], [18], [26], [27], [28], [29] y [30]	9/29 (31%)
Total de referencias empleadas para la revisión sistemática de cada área		29

La figura 2 representa un análisis de clústeres que agrupa diversos términos relacionados con sustancias químicas, medio ambiente y salud humana, utilizando el software VOSviewer. Los clústeres se distinguen por colores: rojo para sustancias químicas, verde para la intersección entre sustancias químicas y medio ambiente, y morado para los determinantes de la salud humana. En el clúster rojo

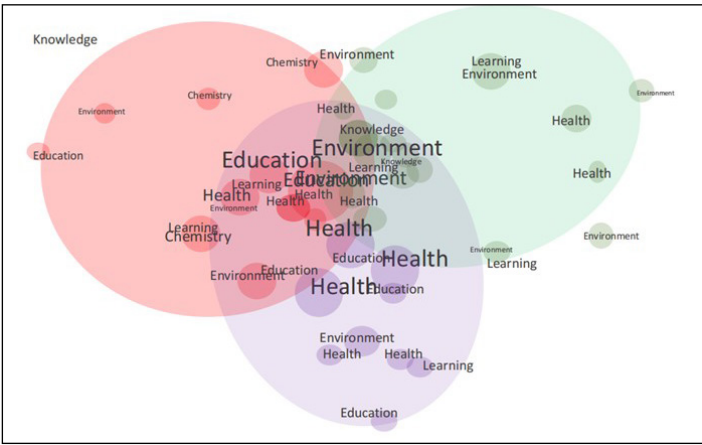


Figura 2. Clúster de sustancias químicas (rojo), sustancias químicas y ambiente (verde) y determinantes de la salud humana (morado). Elaborado en VOSviewer.

se destacan términos como “Chemistry”, “Education” y “Learning”. En el clúster verde, los términos predominantes son “Environment”, “Learning” y “Health”. Por último, en el clúster morado, los términos más relevantes son “Health”, “Education” y “Environment”. Esta figura ilustra las interrelaciones y agrupaciones de estos términos según su similitud y frecuencia en el contexto de la investigación.

Este análisis es significativo ya que permite visualizar las conexiones entre conceptos clave en el estudio de sustancias químicas, medio ambiente y salud humana. La identificación de estos clústeres ayuda a los investigadores a comprender cómo se agrupan los términos y cómo interactúan entre sí, lo que puede facilitar la identificación de áreas de interés común y posibles colaboraciones interdisciplinarias. Además, el uso del software VOSviewer proporciona una representación gráfica eficaz de estos datos complejos, convirtiéndose en una herramienta visual poderosa para el análisis e interpretación de grandes volúmenes de información.

Educación sobre sustancias químicas

Las sustancias químicas son un conjunto de compuestos que se derivan de procesos químicos intencionales, artificiales o sintéticos, los cuales son empleados para fabricar todos los bienes y productos de uso común en la vida diaria, como los desinfectantes, los combustibles, los medicamentos, la ropa, los teléfonos celulares, los ordenadores, los dentífricos, entre muchos otros. En este sentido, las sustancias químicas están presentes o constituyen todos los bienes, tangibles e intangibles, que están a nuestro alrededor. Los intangibles pueden ser, por ejemplo, la energía de activación que es necesaria para iniciar reacciones químicas, al igual que las condiciones de reacción que, aunque no son sustancias físicas, contribuyen en las reacciones, como la temperatura, la presión y el pH. De tal modo, se puede afirmar que las sustancias químicas han contribuido a mejorar el estado de bienestar de la sociedad a través del desarrollo de nuevos materiales que ayudan con el progreso de distintos sectores como el alimentario, el sanitario, el industrial, entre muchos otros.

No obstante, en los últimos años, a nivel social son muy comunes las opiniones negativas sobre las sustancias químicas, puesto a que se les considera contaminantes o perniciosas para la salud. De acuerdo con este parecer, García y Zabatti aducen que “el mundo está plagado de injusticias ambientales indefendibles, con toxicación de las personas y del planeta y la creación de ‘zonas de sacrificio’, lugares extremadamente contaminados con sustancias tóxicas cuyas comunidades vulnerables y marginadas están extremadamente expuestas y soportan desproporcionadamente las consecuencias que esto acarrea para la salud, los derechos humanos y el medio ambiente” [4]. Este es un hecho inocultable, la existencia y uso de algunos compuestos sintéticos que contienen elevados valores de toxicidad son hostiles al ambiente y pueden desencadenar problemas en la salud pública. Algunas sustancias químicas son más nocivas

que otras, debido a que pueden entrar en la cadena alimentaria y actuar en el medio ambiente por muchos años.

Ahora bien, esta problemática está estrechamente vinculada con los niveles de conciencia que prevalecen en un espacio social determinado. En este sentido, el problema no se encuentra en las sustancias químicas de por sí, sino en los bajos niveles de conciencia social que evitan que los grupos humanos utilicen de forma pertinente, eficaz y efectiva dichas sustancias y, de esa forma, puedan obtener de estas los ilimitados beneficios que aportan al progreso humano. Según estudios desarrollados por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, en el año 2019 “se produjo un aumento del 89% en los accidentes relacionados con el uso inadecuados de productos químicos en el ámbito laboral en comparación con 2018, lo que señala la vulnerabilidad del público como consecuencia de la insuficiente información sobre las sustancias químicas nocivas” [5]. Esta aseveración, por supuesto, no excluye la posibilidad real de riesgo de las sustancias químicas cuando se fabrican, se utilizan o se eliminan de manera inapropiada e inconsciente, ya que su manejo implica la exposición a riesgos permanentes durante todo su ciclo de vida. Hoy en día se tiene conocimiento de más de 6.000.000 de sustancias químicas, de las cuales de 80.000 a 100.000 son de uso diario, y cada año emergen alrededor de medio millón de sustancias nuevas y llegan al mercado entre 500 y 1000 productos manufacturados que contienen sustancias químicas.

Todo el tiempo aparecen nuevas sustancias químicas que genera un estado de vulnerabilidad y sensibilidad permanente, tanto por el riesgo que existe durante su producción como al momento de ser utilizadas. Debido a que cada nueva sustancia tiene singularidades y cualidades propias, muchas poseen protocolos únicos para ser empleadas y dispuestas. Por ello, es importante promover la educación sobre las sustancias químicas como una herramienta que busca influir en el comportamiento y las actitudes de las personas. También son indispensables las iniciativas para mitigar los efectos de las sustancias químicas. Iniciativas como la expuesta por Chiloeches en el área de alimentos son ejemplo de ello: “en la industria del envasado se emplean cada vez más envases activos con materiales antimicrobianos ya que las infecciones provocadas por intoxicaciones alimentarias son muy relevantes y generan gran alarma social” [6]. El efecto de sustancias químicas empleadas en el procesamiento y envasado de alimentos y medicamentos genera múltiples complicaciones para garantizar la salud humana.

Es por ello que para Pabón *et al.* [7] la exposición a riesgos asociados con la manipulación, uso y presencia de productos químicos requieren de la implementación de medidas de intervención que permitan mejorar las condiciones de trabajo cuando los seres humanos, en el ejercicio de sus labores, se exponen a sustancias peligrosas. Entre esas acciones está la educación, la gran mayoría de la población no posee la información adecuada para interpretar las etiquetas de los productos químicos y los peligros a los que pueden estar expuestos por un mal uso o una inadecuada interpretación. Según Muñoz *et al.*, el desconocimiento sobre los peligros a los que se está expuesto, la actitud arrogante de las personas frente a posibles amenazas y la idea de que es permisible llevar a cabo acciones aventuradas y peligrosas sin tomar las precauciones debidas son generalizadas [8].

La educación en todo nivel permite la identificación de sustancias y peligros químicos, además, a partir de la promoción de la salud (PS), se pueden hacer planes de mejoramiento y capacitaciones a la ciudadanía. Al respecto, Juvinyà y Casals sostienen que “una buena gobernanza en salud es imprescindible para avanzar en estrategias y programas de PS en este mundo cambiante. Esta propuesta se recoge en el 13.º Programa General de Trabajo de la Organización Mundial de la Salud (OMS) 2019-2023 en el cual se reconoce la PS como estrategia para mejorar la salud y el bienestar de las personas.

También, en la Carta de Ginebra para el bienestar, declaración resultante de la 10.ª Conferencia Mundial de PS de la OMS celebrada en diciembre de 2021, donde se afirma la necesidad de unir esfuerzos en la creación de sociedades de bienestar sostenibles, comprometidas con la salud, equitativas, que tienen presente las generaciones futuras y los límites ecológicos” [9]. Estos objetivos orientan un camino de promoción de salud a través de iniciativas educativas exitosas.

De esta manera, las sustancias químicas, al estar presentes en buena parte de las actividades diarias y productivas, y en contacto con los seres humanos y el ecosistema en general, debe formar parte de los contenidos educativos prioritarios, donde se debe visibilizar sus propiedades tanto benéficas como peligrosas. Por lo tanto, resulta imprescindible desarrollar actividades pedagógicas que permitan conocer cada vez mejor y actualizar permanentemente los perfiles toxicológicos de esas sustancias. Sin embargo, esto requiere no solo de organización, sino de ciencia y tecnología.

Por lo tanto, a través de la educación, se debe fortalecer el desarrollo de altos niveles de conciencia y de esquemas actitudinales más racionales, que favorezcan el desarrollo de las sustancias químicas y todos los procesos que deriven de ellas, y que, además, contribuyan con el desarrollo sostenible en las distintas esferas, sean económicas, humanas, ambientales, políticas, entre otras. Zapata *et al.* destacan que “a nivel mundial la situación medioambiental está generando la necesidad del desarrollo de hábitos sustentables, implementando estrategias para el tratamiento de residuos aprovechables” [10]. En este sentido, la promoción de la educación sobre las sustancias químicas supone necesariamente un cambio de paradigma cultural en la sociedad hacia estos compuestos.

La interpretación descrita pone de relieve la importancia del rol que cumple el conocimiento, la educación y la conciencia en la dinámica del fenómeno que se viene examinando, donde el manejo adecuado y responsable de sustancias químicas debe permitir condiciones ambientales sostenibles y armónicas, esto puede incluso vincularse con el respeto a los derechos humanos. Por lo tanto, se considera que la promoción de la educación en el contexto del presente estudio constituye una práctica de empoderamiento, de involucramiento humano, de socialización del saber, de movilización para la construcción social de la salud para el bienestar social del ser humano.

Sustancias químicas y ambiente

Las sustancias químicas repercuten de un modo positivo o negativo al entorno o ambiente, dicha influencia, se estima, es directamente proporcional al nivel de conciencia que poseen los agentes sociales con respecto a los compuestos químicos. Para Ledit *et al.*, “en la antroposfera, el entorno de la superficie terrestre habitada por los humanos, se han alterado los equilibrios naturales por la emisión de múltiples sustancias y se ha producido un creciente cambio climático. Este fenómeno global influye en la calidad del aire y consecuentemente en el desarrollo de enfermedades respiratorias” [11]. De ahí la importancia de promover la educación sobre las mismas y su impacto ambiental y en la salud humana. “Los problemas ambientales han estado presentes a lo largo de la historia de Latinoamérica, determinados principalmente por los patrones de uso de los bienes (recursos) naturales, los consecuentes sistemas de producción, los hábitos de consumo de las poblaciones humanas y la gobernanza ambiental” [12]. Estos problemas ambientales son los causantes del desequilibrio ecológico que presentan diversas regiones del mundo, entre ellas la latinoamericana, y deben ser abordados desde la educación para promover en las prácticas cotidianas el bienestar humano.

De acuerdo con Cajamarca *et al.* [13], los factores ambientales tienen una gran importancia en la exposición a condiciones de riesgo, por ejemplo, las limitaciones en el acceso a agua potable y a servi-

cios básicos o la falta de condiciones que garanticen la seguridad alimentaria. Esto afecta, sobre todo, a las poblaciones de zonas rurales y barrios populares de las ciudades, a través del uso de las sustancias químicas para la minería, lavadoras de vehículos, eliminación de derivados de petróleo, etc.

Ahora bien, en la actualidad, en países como Perú se repite una realidad presente en los países de la región, no existe una relación o inventario de las sustancias químicas peligrosas utilizadas, fabricadas e importadas al país. Por consiguiente, hay una insuficiencia de mecanismos para realizar un análisis apropiado respecto al uso y manejo de las sustancias químicas, así como del cumplimiento apropiado de normas de supervisión y control que regulan el empleo de dichos componentes. Estas normas permiten mitigar los riesgos que vulneran el ambiente, el bienestar y la calidad de vida de los individuos, vigilar las incidencias ocasionadas por el inadecuado uso de las sustancias químicas, regular correctamente el tráfico ilícito de sustancias nocivas para la salud y el propio ambiente en los puntos fronterizos, además de difundir los riesgos inherentes de las sustancias tóxicas en las comunidades.

No obstante, para García y Zavatti, “una ley por sí sola sería ineficaz sin mecanismos para aplicarla o hacerla cumplir, y para educar a los interesados y al público en general acerca de la gestión racional de los productos químicos y los desechos” [4]. Es necesaria una educación sobre las sustancias químicas que permita capacitar con mayor y mejor preparación y modernización al capital humano en el área vinculada a los compuestos químicos, con el fin de mitigar, reducir y limitar su impacto negativo a nivel medioambiental y en la salud humana. La educación es, sin lugar a dudas, un vehículo elemental para que las naciones alcancen niveles satisfactorios de bienestar humano.

Ahora bien, trascender la situación planteada demanda de mucha organización, ciencia y tecnología, lo cual implica un costo inestimable para los países del tercer mundo. En alusión a los efectos mortales que pueden causar las sustancias químicas, la OMS explica que “son atribuibles cerca de la mitad de esas muertes a la exposición al plomo y a las enfermedades cardiovasculares resultantes, y 138.000 muertes a plaguicidas implicados en suicidios, en concreto el 20% de todas las muertes por suicidios que se producen en el mundo” [14]. En contextos urbanos, una de las características que resalta en los ambientes de trabajo y fuera de estos, según Meza *et al.*, es que los trabajadores de diferentes áreas laborales están expuestos a contaminantes químicos como gases, líquidos, aerosoles y vapores [15]. Por su parte, Navarro *et al.* estiman, en cuanto al tema de las sustancias químicas y su impacto medio ambiental, que “son innegables los aportes que la utilización de las sustancias químicas implica para nuestra sociedad, pero también es indudable que la proliferación y el uso masivo de sustancias químicas trajeron consigo importantes problemas para la salud humana y ambiental” [16]. Es preciso señalar que incendios, explosiones, entre otros eventos, algunas veces son producto de un inadecuado control de los riesgos y del manejo inadecuado de sustancias químicas, eso perjudica nuestro ambiente y, en consecuencia, afecta la vida humana.

Como el costo es el principal reto que deben afrontar los países en vía de desarrollo, ya que ellos cuentan con recursos limitados y problemáticas inmediatas por atender, la única manera de no quedarse rezagados sería con la construcción y participación en redes cooperativas, ojalá globales, alrededor de la generación y gestión del conocimiento, que permitan desarrollar ciencia y tecnología como soluciones inaplazables hacia una comunidad y un medio ambiente sustentable. Atendiendo a iniciativas globales, García [17] explica que, para orientar la agenda química de los países con economías emergentes, de la mano del Convenio de Minamata de la ONU, se recogió un proyecto de gestión ambientalmente adecuada del ciclo

de vida de los productos que contienen mercurio y sus desechos. El estudio fue realizado en Uruguay y resalta la vulnerabilidad de la etapa perinatal ante la exposición con este metal.

Mitigar los efectos de las sustancias químicas en el ambiente es necesario para poder enfrentar las consecuencias que tienen dichas sustancias en la salud humana, lo cual, desde el punto de vista preventivo, requiere de inversión social en educación. Es reconocido por la Organización Panamericana de la Salud que “la exposición a largo plazo a plaguicidas como organofosforados y carbamatos se ha relacionado con una amplia gama de efectos crónicos en la salud, que incluyen deterioro de la función neuroconductual, problemas respiratorios, obesidad y diabetes” [18], lo que genera efectos poco evaluados por las comunidades.

Los efectos de sustancias químicas peligrosas tienen múltiples orígenes que van desde los efectos de la actividad industrial, hasta el desecho de sustancias como las provenientes de la industria farmacéutica. De acuerdo con Vicentin *et al.* “la eliminación no controlada de medicamentos ocasiona la farmacontaminación del ambiente (agua, aire, suelo), lo cual se evidencia a través del creciente aumento de contaminantes emergentes encontrados en el agua, en los sedimentos de ríos y arroyos, en las especies acuáticas e incluso en la fauna que bebe o consume esos organismos” [19]. Estos efectos adversos siguen creciendo, “siendo las industrias uno de los contribuyentes a los cuales se les atribuye la mayor fuente de emisiones de gases de efecto invernadero, el derrame de químicos a fuentes hídricas, ruidos al entorno, explosiones y amenaza a la salud de los seres vivos. A esto se suma la poca relevancia y formación que se le otorga a la educación ambiental” [20]. En la mayoría de los casos, las sustancias químicas afectan de modo adverso el ambiente, por lo tanto, es necesario educar a la sociedad.

Otra de las fuentes de sustancias químicas perjudiciales para la salud está relacionada con el crecimiento de la producción y con el comercio de agroquímicos, la comercialización de alimentos y sus derivados. Molpeceres *et al.* argumentan que “cuando comenzaron los cuestionamientos por su toxicidad, las principales organizaciones internacionales con competencia en materia de alimentación, trabajo, salud y ambiente significaron el problema como de conocimiento” [21]. Esto produjo una alerta a nivel mundial donde los esfuerzos estuvieron orientados a “la creación de instrumentos para facilitar el relevamiento y la circulación de información acerca de las prácticas de manejo de los mismos, el nivel de toxicidad de los residuos, la clasificación y el etiquetado para prevenir los daños a la salud y el ambiente y, hacia el final del período, para regular el comercio” [21].

En esta dinámica, se deben tener en cuenta los altos niveles de peligrosidad asociados a la exposición con agentes químicos, así como la probabilidad de sufrir afecciones agudas o crónicas a la salud, lesiones por accidentes e incluso la muerte, debido a los actos inseguros por conocimientos insuficientes, hábitos inadecuados o la organización deficiente. Estas son las principales causas del daño individual que, bajo determinadas circunstancias, puede extenderse a otro entorno, a la comunidad o al ecosistema. De acuerdo con López *et al.* “el ambiente es un conjunto de factores de tipo físico, sociales, culturales, económicos y estéticos en constante interacción, los cuales influyen en los individuos o comunidades, determinando su forma, carácter, relaciones y, en última instancia, su supervivencia” [22].

Para Ruiz *et al.* [23] el conjunto de circunstancias a través de las cuales las personas nacen, crecen, viven, trabajan y envejecen, así como los sistemas establecidos para combatir las enfermedades, condicionan la salud. Es decir, si el entorno natural o medioambiental es influenciado o impactado por cualquier circunstancia, fenómeno o hecho, fortuito o no, como las sustancias químicas, el factor

humano también lo será, en tanto y en cuanto pertenece a ese sistema de elementos. En las dinámicas de las ciudades, según Cajamarca *et al.*, la distribución de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) es omnipresente en el medio ambiente, ya que la atmósfera es el medio más importante de su dispersión, se encuentran en el carbón y en los sedimentos de alquitrán. “La contaminación del aire por Material Particulado (PM), como consecuencia del aumento del tráfico, es de gran preocupación para la salud pública en las zonas urbanas. El PM llama mucho la atención, primero porque, debido a su tamaño micrométrico, las partículas pueden penetrar en los pulmones e impedir el intercambio de gases, y en segundo lugar debido a su composición química, incluida la presencia de metales pesados, que pueden dañar los sistemas biológicos” [24]. De tal manera, las dinámicas en cada localidad y sus sistemas de gobernanza condicionan la importancia y medidas que puedan tomarse para disminuir los efectos de estas sustancias en la salud humana.

También debe afirmarse que el comportamiento humano en cualquier espacio social va a generar un impacto en el ambiente, bien sea de manera positiva o negativa. Es por ello que el nivel de conciencia que se maneje acerca de las sustancias químicas incidirá, positiva o negativamente, en el medio ambiente y la salud humana en un espacio social determinado. Esto se debe a que la disposición incorrecta de sustancias químicas (por un bajo nivel de conciencia) puede contaminar el agua y el suelo, alterar el medio ambiente y poner en peligro la salud pública [25]. Además, “la gestión no racional de los productos químicos y los desechos, así como la contaminación, pueden tener efectos adversos significativos en la salud humana y el medio ambiente, y que son factores importantes en muchas enfermedades no transmisibles” [14]. En este escenario, la inacción es el mayor de los peligros ante la falta de una política pública para abordar de forma eficiente la problemática.

Determinantes de la salud humana

El entorno natural es un elemento que determina la salud humana y genera las condiciones necesarias para el desarrollo del bienestar individual y colectivo. Considerando que la salud “es un estado de completo bienestar físico, mental, y social y no simplemente la ausencia de afecciones o enfermedades (como se creía hace muchos años). El estado de salud de una persona es el reflejo de las interacciones complejas entre la genética, el estilo de vida, y el entorno de una persona” [26]. Esta propuesta conceptual goza del mérito de ser integral y compartida universalmente, lo cual permite inferir que la salud humana está atravesada por las dimensiones antes enunciadas, y es precisamente en la última dimensión propuesta, la social, donde está el factor ambiental.

La integración de forma armónica del ser humano con su ambiente es esencial para su salud. Este juicio de valor permite reafirmar, para los efectos del presente estudio, que debería existir una perfecta imbricación entre las sustancias químicas, el ambiente y la salud humana, debido a que el entorno ambiental está concebido de modo sistémico, donde todos los elementos se conjugan, influyen y determinan. Además, por lo general se asume que factores como la vivienda, las políticas salariales y la alimentación también son condiciones existenciales fundamentales para alcanzar la salud humana: “los determinantes sociales de la salud son factores que influyen en la salud de las personas y las comunidades, y que están relacionados con las condiciones sociales, económicas y ambientales en las que viven” [27].

Ahora bien, León-Arce *et al.* expresan que “la suma de amenazas químicas, físicas, biológicas, ecológicas y sociales que provocan violencias y comorbilidades causan condiciones de salud que afectan el desarrollo social; se genera así un ciclo vicioso de enfermedad y subdesarrollo” [28]. En este sentido se presentan situaciones que aumentan el riesgo de contraer y desarrollar una enfermedad, esto

trae como consecuencia una mayor demanda “de acciones humanitarias, para afrontar escenarios de pandemia. En una pandemia, una condición de salud se agrava o se genera por la aparición conjunta de los determinantes ambientales, los determinantes sociales de la salud u otra condición de salud” [28]. El ambiente se reconoce como uno de los factores determinantes de la salud, donde también se incluyen factores como la asistencia sanitaria, la biología humana, los estilos de vida, entre otros. Por lo tanto, la presencia de sustancias químicas en el medio ambiente puede afectar la salud de las personas o agravar las situaciones de salud que ya presentan.

En América Latina y el Caribe, como productores del 14% de los alimentos a nivel mundial, “el uso intensivo de plaguicidas en la región, con fines agrícolas y de control de vectores (por ejemplo, para combatir el dengue y la malaria), ha provocado la exposición ocupacional crónica a plaguicidas de trabajadores agrícolas” [18]. Se puede advertir que, en esta región, los agentes sintéticos continúan representando un problema sanitario de orden público que, como se ha evidenciado a lo largo de toda la exégesis de la presente contribución, ha sido insuficientemente atendido, no se registran las incidencias salubristas de modo apropiado y oportuno. Hecho que contrasta con el incremento creciente de la producción y el uso de esos compuestos.

Para Martínez, “los estudios sobre el impacto de las sustancias químicas en la salud son imprescindibles para alertar a los fabricantes y a los gobiernos que legislan la necesidad de disminuir el uso de sustancias químicas potencialmente perjudiciales” [30]. Dentro de los principales efectos a la salud se encuentra el exposoma, catalogado “como la totalidad de las exposiciones ambientales que afectan a las personas desde la concepción en adelante, complementando el genoma” [30]. El exposoma puede ser modificado al cambiar hábitos de vida o la exposición a contaminación ambiental y se asocia a tres ámbitos: “Medio exógeno general: incluye el entorno urbano, los factores climáticos, el nivel socioeconómico o el estrés. Medio exógeno específico: como contaminantes, la dieta, la actividad física o el tabaco. Medio endógeno: incluye factores biológicos de la persona como el metabolismo, la microflora intestinal y la agresión oxidativa” [30]. Todo este conjunto de factores interviene en la disminución o aumento de la salud humana en relación con el ambiente y la exposición a diversos compuestos químicos.

Discusión

En función a los resultados obtenidos en este ejercicio investigativo, se confirmaron tres premisas fundamentales, basadas en las respuestas a los interrogantes del estudio (tabla 1):

1. La importancia que tiene la educación sobre sustancias químicas radica en la necesidad de brindar en todos los entornos sociales mayor información acerca del uso y manejo de estas sustancias, sus propiedades y riesgos para la salud y el ambiente. La educación mejora la pericia de las personas para un manejo adecuado de los compuestos químicos.
2. El manejo inadecuado de sustancias químicas produce alteraciones o desequilibrios en el ambiente, las cuales se expresan a través de la aparición de ciertas afecciones o patologías en el espacio social.
3. Los determinantes de la salud están relacionadas con el estilo de vida, el ambiente, la predisposición biológica y el manejo sanitario, todos estos factores condicionan el manejo que se les da a las sustancias químicas. Todas las determinantes presentan debilidades en los países de América Latina y requieren, para ser garantizadas, de un aumento de la infraestructura científica, tecnológica y financiera para afrontar el desafío de promover educación vinculada con las sustancias químicas para el desarrollo sostenible.

La importancia que tiene la educación sobre sustancias químicas se basa en el planteamiento de brindar, en todos los entornos sociales, mayor información acerca del uso y manejo de las sustancias químicas. Es así como se confirman los resultados de las necesidades educativas planteadas, desde la investigación de Moreno, basada en el estudio de ofertas en materia de educación en salud pública, donde se pudo determinar “la necesidad de adecuar las competencias y habilidades desarrolladas por los cursos y programas a las demandas de los usuarios de los servicios, programas y sistemas de salud regionales, para lograr programas orientados al enfrentamiento de los procesos de determinación socioambiental de la salud y de producción y reproducción de desigualdades” [31]. Al plantearse que en los países que conforman Latinoamérica se carece de manera amplia de la infraestructura científica, tecnológica y financiera para afrontar el desafío de promover educación vinculada con las sustancias químicas para el desarrollo sostenible, esto coincide con lo expuesto en la investigación de Cajamarca *et al.* quienes plantean que “debe superarse la actual lógica disruptiva por la cual los sectores de la sociedad civil más comprometidos con la defensa y preservación del ambiente confrontan permanentemente, en posición fuera de juego, con los sectores gubernamentales responsables del diagnóstico de situación, sin lograr sinergias positivas que conlleven a la mejora continua de la situación abordada” [13]. De igual modo, es necesario destacar lo establecido por Juvinyà-Canal y Casals-Alons, cuando mencionan la “declaración resultante de la 10.ª Conferencia Mundial de PS de la OMS celebrada en diciembre de 2021, donde se afirma la necesidad de unir esfuerzos en la creación de sociedades de bienestar sostenibles, comprometidas con la salud” [9].

Conclusiones

A manera de conclusión, se puede afirmar que promover la educación sobre sustancias químicas y su impacto en el ambiente es una forma de concientizar y empoderar a los agentes sociales y contribuir a la organización, el cambio y el bienestar físico, psíquico y social, tal y como se desprende de toda la narrativa y argumentación realizada. Adicionalmente, se logró determinar que el problema no son las sustancias químicas propiamente, sino los niveles de conciencia social y la desinformación, que evita que las personas puedan hacer un uso pertinente, eficaz y efectivo de las mismas, y así obtener de ellas los ilimitados beneficios que puede aportar al progreso humano. Aseveración que, por supuesto, no excluye la posibilidad real de riesgo de estos compuestos sintéticos, ya que pueden pasar al aire, al agua o al suelo, cuando se fabrican, se utilizan o se eliminan de manera inapropiada e inconsciente.

Sin embargo, en Latinoamérica se evidencian insuficiencias en los programas de formación con respecto al uso y manejo de las sustancias sintéticas o químicas. Este estado de cosas es producto de la debilidad en infraestructura técnica, en los métodos de investigación y en el financiamiento, el cual no permite identificar de manera adecuada las sustancias químicas más comunes, empleadas en una localidad cualquiera, ya que no se cuenta con la infraestructura adecuada para tal fin.

Por lo tanto, si el entorno natural o medioambiental es impactado, el factor humano también lo será porque forma parte de ese sistema de elementos. También se afirma que el comportamiento humano en cualquier espacio social va a marcar indefectiblemente al ambiente, bien sea de manera positiva o negativa. Por lo tanto, se puede determinar un sistema de relaciones complejo entre las sustancias químicas, el ambiente y la salud humana, el cual debe modificarse mediante un plan de educación sobre sustancias químicas y su impacto en el ambiente, en beneficio de la salud humana.

Referencias

- [1] A. Salcedo, “Educación en salud para prevenir intoxicaciones”, *Horizonte Sanitario*, vol. 18, nro. 3, 2019. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-74592019000300249
- [2] C. Castro y C. Luis, “Contaminantes orgánicos persistentes: Impactos y medidas de control”, *Manglar*, vol. 21, nro. 1, 2024. DOI: <http://dx.doi.org/10.57188/manglar.2024.014>
- [3] N. Balseca, M. Quilligana-Chifla y D. Aman Balseca, “Una mirada histórica en la enseñanza-aprendizaje de la química: Mejorando la calidad educativa”, *Polo del Conocimiento*, vol. 9, nro. 1, pp. 1497–1506, 2024. Disponible en: <https://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/view/6446/16165>
- [4] S. García y J. Zavatti, “Derecho a un medio ambiente limpio, saludable y sostenible: el medio ambiente no tóxico”, *Salud Ambiental*, vol. 22, nro. 16, pp. 3–7, 2022. Disponible en: <https://ojs.diffundit.com/index.php/rsa/article/view/1224/1174>
- [5] Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, “El Perú Impulsa la gestión de la seguridad química para proteger el medio ambiente y salud pública”, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.unep.org/es/el-peru-impulsa-la-gestion-de-la-seguridad-quimica-para-proteger-el-medio-ambiente-y-la-salud>
- [6] A. Chiloeches, “Materiales poliméricos biobasados derivados del ácido itacónico con actividad antimicrobiana”, tesis de doctorado, Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2024.
- [7] H. Pabón, S. Gelvez, S. Trigos y L. Gelvez, “Causas generadoras de enfermedades laborales producidas por sustancias químicas en trabajadores del sector agrícola en el corregimiento de Buena Esperanza en Norte de Santander”, *Ciencia Latina Revista Científica Disciplinar*, vol. 7, nro. 5, 2023. DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i5.8598
- [8] A. Muñoz, M. Trejos y L. López, “Efectos carcinogénicos en estudiantes de educación superior por la exposición a sustancias químicas en prácticas de laboratorio”, tesis de pregrado, Universidad Libre, 2023.
- [9] D. Juvinyà-Canal y C. Casals-Alonso, “Promoción de la Salud en tiempos de incertidumbre”, *Revista Sanus*, vol. 7, nro. 1, 2022. DOI: <https://doi.org/10.36789/revsanus.vi1.348>
- [10] S. Zapata *et al.*, “Ecomobiliario universitario a partir del reciclaje de las maquetas de arquitectura”, *Cuadernos del Centro de Estudios en Diseño y Comunicación*, nro. 219, pp. 321–341, 2024. DOI: <https://doi.org/10.18682/cdc.vi219.11142>
- [11] A. Ledit *et al.*, “Intervención ambiental de enfermedades respiratorias”, *Medicina*, vol. 79, nro. 2, 2019. Disponible en: <https://www.medicinabuenosaires.com/revistas/vol79-19/n2/123-136-Med6871-Arduso-A.pdf>
- [12] A. del Barrio, M. Ocampo y M. Larrañaga, “Políticas públicas y gobernanza ambiental: lineamientos para un programa ambiental de control, descontaminación y saneamiento de las cuencas rionegrinas (Argentina)”, *Pilquen*, vol. 23, nro. 5, 2020. Disponible en: <https://revele.uncoma.edu.ar/index.php/Sociales/article/view/2982>
- [13] J. Cajamarca *et al.*, *Determinantes de la salud ambiental*, Red Editorial Latinoamericana de Investigación, Cuenca, 2023.
- [14] Organización Mundial de la Salud (OMS), “Efectos de los productos químicos, los desechos y la contaminación en la salud humana”, en 76.ª Asamblea Mundial de la Salud. Punto 16.3 del orden del día, Washington D. C., 2023.
- [15] Y. Meza, M. Rebolledo, H. Vásquez y M. Gil, “Efectos para la salud respiratoria de los trabajadores que usan sustancias químicas en su medio laboral. Una revisión sistemática”, *Salud Uninorte*, vol. 38, nro. 2, 2023. DOI: <https://doi.org/10.14482/sun.38.2.616.2>
- [16] Y. Navarro, L. Rivas, C. Chao, C. Cañete y Y. Díaz, “Desarrollo y Aplicación de Alternativas para Reducir Productos Químicos Ociosos y Caducados en la Industria Petrolera”, *Centro Azúcar*, vol. 49, nro. 1, 2022. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/>

- caz/v49n1/2223-4861-caz-49-01-31.pdf
- [17] S. Garcia, "La Salud Ambiental en comunidades vulnerables de América Latina. Parte II", *Revista Salud Ambiental*, vol. 20, nro. 1, 2020. Disponible en: <https://ojs.diffundit.com/index.php/ras/article/view/1006/940>
- [18] Organización Panamericana de la Salud, "Exposición ocupacional a plaguicidas y sus efectos en la salud de trabajadores agrícolas: estudios epidemiológicos en Chile y Brasil", en *Exposición ocupacional a plaguicidas y sus efectos en la salud. 77.ª Asamblea Mundial de la Salud*, Washington, 2024.
- [19] E. Vicentin, L. Ferreiros y C. Magnatti, "Farmacontaminación: El Lado B de los medicamentos", *Revista Argentina de Salud Pública*, vol. 13, nro. 1, 2021. Disponible en: <https://rasp.msal.gov.ar/index.php/rasp/article/view/473>
- [20] E. Guevara, H. Lopez y R. Franco, "Una propuesta de educación verde para fortalecer las habilidades en investigación del semillero EDUQUVERSA", *Biografía*, vol. 17, nro. 32, 2021. Disponible en: <https://revistas.upn.edu.co/index.php/bio-grafia/article/view/15708>
- [21] M. Molpeceres, R. Ceverios y S. Brieva, "Agroquímicos: cambios en la agenda internacional e instrumentos de regulación en Argentina (1950-2015)", *Estudios Socioterritoriales*, vol. 25, nro. 1, 2019. Disponible en: <https://portal.amelica.org/ameli/journal/32/32724024/html/>
- [22] L. López, E. Moreno y Z. Castañeda, "Efectos en la salud del personal que manipula sustancias químicas en laboratorios", *Universidad Libre*, 2023. Disponible en: <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/27840/Art%3%adculo%20Final%20-%20grado.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [23] M. Ruiz, A. Aginagalde y J. del Llano, "Los Determinantes Sociales de la Salud en España", *Revista Española de Salud Pública*, vol. 96, 2022. Disponible en: <https://ojs.sanidad.gob.es/index.php/resp/article/view/343>
- [24] R. Peña, S. Andrade, M. Parra, D. Coronel y C. Rodas, "Análisis espacial de PM10 en el aire y su composición de metales con relación a factores ambientales alrededor de centros de educación preescolar en Cuenca", *Maskana*, vol. 11, nro. 1, 2020. DOI: <https://doi.org/10.18537/MSKN.11.01.06>
- [25] A. Vasquez, I. Ayala, I. Domenech, I. Martinez y R. Rodriguez, "Riesgo biológico en los laboratorios de microbiología de las instituciones de Salud", *Panorama, Cuba y Salud*, vol. 14, nro. 1, pp. 61-67, 2019. Disponible en: <https://revpanorama.sld.cu/index.php/panorama/article/view/854>
- [26] A. Government, "What is Health?", *Australian Institute of health and welfare*, 2022. [En línea] Disponible en: <https://www.aihw.gov.au/reports/australias-health/australias-health-2022-in-brief/summary>
- [27] CONSULTORSALUD, "Determinantes Sociales en la Salud en Perú", *Determinantes Sociales en la Salud en Perú*, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://consultorsalud.com/determinantes-sociales-la-salud-peru/>
- [28] M. León-Arce et al., "Unidades RISC: una estrategia para evaluar riesgos de salud en la población infantil de comunidades contaminadas", *Revista panamericana de Salud Pública*, 2023. DOI: <https://doi.org/10.26633/RPSP.2023.29>
- [29] L. Schwartz, L. De Lima y J. Stacciarini, "Influencia de los determinantes sociales de la salud en la eficacia familiar", *Revista Cuidarte*, vol. 14, nro. 1, 2023. DOI: <https://doi.org/10.15649/cuidarte.2805>
- [30] E. Martinez, "Sustancias químicas que afectan a nuestra salud respiratoria", 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.salud.mapfre.es/cuerpo-y-mente/habitos-saludables/sustancias-quimicas-afectan-salud-respiratoria/>. [Último acceso: 17/03/2024].
- [31] A. Moreno, "Salud y medio ambiente", *Revista de la Facultad de Medicina*, vol. 65, nro. 3, 2022.
- [32] Organización Mundial de la Salud (OMS), "Seguridad Química", en *77.ª Asamblea Mundial de la Salud*, Washington D. C., 2024.

Citación del artículo:

E. S. Carhuachuco Rojas, R. E. Arenales López, D. Oseda Gago, G. Olivera Zurita y G. J. Vela Urbina, "Promoviendo la educación sobre sustancias químicas y su impacto en el ambiente: un enfoque para la salud humana", *Rev. Colomb. Quim.*, vol. 53, nro. 1, pp. 21-28, 2024. DOI: <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v53n1.114765>



Simulation of electronic structure and excited states of a chlorophyll-A system

Abstract

A system of six chlorophyll-A molecules (Ch-A-6) was studied by quantum chemical modeling methods using density functional theory and its non-local approximations. Theoretical modeling of the spatial structure, electronic levels, distribution of effective charges on atoms and excited states was carried out simultaneously with interpretation of experimental optical absorption spectra of chlorophyll-A in solution with diethyl ether. Analysis of electronic structure and atomic nuclei by Mulliken methods allowed to establish the nature of the bond between chlorophyll-A molecules within the system. The effect of Mg coordinate position in the formation of bands in calculated absorption spectra was studied. According to the calculations, excited states are caused by transitions from within each chlorophyll fragment. Transitions of mixed molecular orbitals can also be detected. A final analysis of non-covalent interactions showed the presence of a high degree of hydrogen bonds and strong Van der Waals interactions.

Keywords: Chlorophyll-A; density functional theory; optical spectroscopy; electronic structure; atomic nuclei.

Simulación de estructura electrónica y estados excitados del sistema molecular clorofila-A

Resumen

Un sistema compuesto por seis moléculas de clorofila-A (Ch-A-6) fue estudiado a partir de métodos de simulación de química cuántica mediante la teoría funcional de la densidad y su aproximación de forma no local. La simulación teórica de la estructura espacial, la configuración electrónica y la distribución de cargas efectivas en átomos y en estados excitados se llevaron a cabo simultáneamente con la interpretación de espectros ópticos de clorofila-A en solución con etoxietano. El análisis de la estructura electrónica y de los núcleos atómicos mediante métodos Mulliken permitió establecer la naturaleza del enlace entre las moléculas de clorofila-A dentro del sistema. Se estudió el efecto de la posición del magnesio (Mg) en espectros de absorción simulados. Según los cálculos, los estados excitados son causados por transiciones dentro de cada fragmento de clorofila. También se detectaron otras transiciones entre orbitales moleculares. El análisis de interacciones no covalentes mostró la presencia de un alto grado de enlaces de hidrógeno y fuertes interacciones de Van der Waals.

Palabras clave: clorofila-A; teoría funcional de la densidad; espectroscopia óptica; estructura electrónica; núcleos atómicos.

Simulação da estrutura eletrônica e estados excitados do sistema molecular da clorofila-A

Resumo

Um sistema composto por seis moléculas de clorofila-A (Ch-A-6) foi caracterizado em simulação física quântica usando a teoria do funcional da densidade e sua aproximação não local. A simulação da estrutura espacial, da configuração eletrônica e da distribuição de cargas efetivas nos átomos e nos estados excitados foi realizada simultaneamente, com interpretação dos espectros ópticos da clorofila-A em solução em etoxietano. A análise da estrutura eletrônica e dos núcleos atômicos usando métodos Mulliken permitiu estabelecer a natureza da ligação entre as moléculas de clorofila-A dentro do sistema. O efeito da posição do magnésio (Mg) nos espectros de absorção simulados foi estudado. De acordo com os cálculos, os estados excitados são causados por transições dentro dos fragmentos, outras transições entre orbitais moleculares também foram detectadas. A análise das interações não covalentes mostrou a presença de um alto grau de ligações de hidrogênio e fortes interações de Van der Waals.

Palavras-chave: clorofila-A; teoria do funcional da densidade; espectroscopia óptica; estrutura eletrônica; núcleos atômicos.

Introduction

Chlorophyll-A (Ch-A) is the only pigment in protein structures that is directly involved in photosynthesis [1]. Common structure of Ch-A is composed by a central chlorin ring enclosing a magnesium (Mg) ion with several methyl CH_3 ring substituents connected to a hydrophobic hydrocarbon phytol “tail”. These three elements integrate the main areas for absorption of visible radiation. The central chlorin-enclosed Mg is widely believed to heavily influence the absorption abilities of the whole system. The presence of Mg is explained by the heterogeneous biosynthesis of chlorophyll [2], which occurs along the carboxyl pathway by oxidation and chain closure of the propionate substituent [3].

Obtained experimental optical absorption spectra of Ch-A have a complex structure [4]. To connect transitions ground-excited states to their respective fragments and their contributions to the intensity of the bands is almost an impossible task without the use of theoretical methods. Density functional theory (DFT) is one of the most effective methods for calculating electronic structure, excited states and probabilities of transitions from ground state [5–8]. This approach allows one to determine the contribution of each fragment to the intensities of the experimental bands from electronic structure and distribution of Mulliken atomic charges. Additionally, to verify and visualize the non-covalent interactions (van der Waals interactions, hydrogen bonds, and steric clashes) between molecules and molecular fragments, we used the non-covalent interaction index (NCI) based on the reduced density gradient (RDG) of electron density; this topological method has demonstrated great capability and precision on predicting non-covalent interactions and their characteristics [9–12].

In this work, three main structures were calculated and analyzed: the system of six Ch-A fragments (Ch-A-6) (**figure 1A**), two molecules of Ch-A in parallel (**figure 1B**) and perpendicular alignment (**figure 1C**). The main objective of this work was to establish the nature of the bond between Ch-A molecules and their excited states, and to interpret the optical absorption spectra by energy analysis and localization of molecular orbitals (MO). Separate tasks were set to determine and analyze atomic charge, simulated photo-electronic spectra and the effect of coordination of Mg ion in the chlorin ring on the optical absorption spectra for the six-molecule system and individual fragments of Ch-A in order to shed light on long-range order effects (such as characteristic optical spectra that can be measured from passive and active satellite sensors) by analyzing electronic structure and absorbance from excited states.

Methods and approach

Quantum-chemical calculations of the spatial structure, energies (and composition) of MO and distribution of effective atomic charges were performed in the DFT approximation using the program FireFly 8.2.0 [13]. Calculations of 50 excited states and singlet-singlet transitions for all studied compounds were performed in the approximation of non-local density functional theory (TDDFT) using the GAMESS-US (2022 R2) program [14]. For all calculations the hybrid exchange-correlation functional CAM-B3LYP [15] was used, which is a modification of the B3LYP5 functional [16]. The selected functional included long-range corrections and an accurate description of charge transfer processes [17, 18], which allows the calculation of complex systems [18]. The high density of atoms and overall volume of the systems greatly affects calculation time and the choice of basis set requires a compromise between accuracy and time-consumption; therefore, the compact 6-311G basis set [19] was chosen for its well-tested and accurate results for complex systems [20, 21].

Initial structure of the Ch-A molecule was constructed using data from a study into the reaction center of a photo-system [22], regar-

ded as the most accurate analog for experimental absorption spectra of real pigments based on Ch-A; thereafter, the structure was subdivided into several main fragments and calculated separately. For all calculated compounds 50 excited states of singlet-singlet transitions on the TDDFT methods were obtained. Additionally, an analysis of non-covalent interactions and calculation of the smallest density gradient [23] were performed for the system of Ch-A-6 molecules using the program Multiwfn [24].

Results

The initial structure of Ch-A “natural” analog (**figure 1A**) consists of six chlorin rings with phytol chains shortened to a C^7 methyl group; two water molecules coordinating the Ch-A molecules and two extra Ch-A molecules flanking the central system [22]. Structures in **figure 1B** and **1C** demonstrate, respectively, the arrangement of two Ch-A molecules in parallel and perpendicular to each other. Main Ch-A system contains six fragments of Ch-A numerated in **figure 1A**. The acid radical $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CO}_2^-$ is attached to fragment one (perpendicular to fragment three) and two (perpendicular to fragment four). In fragments three and four, the central Mg ions are connected to water molecules; fragment five (located in the background of **figure 1A**) and six (located in the foreground of **figure 1A**) have histidine (a heterocyclic alpha-amino acid) attached to them. Two subsystems were isolated, each consisting of two molecules with fragments one-three (**figure 1C**) and five-six (**figure 1B**).

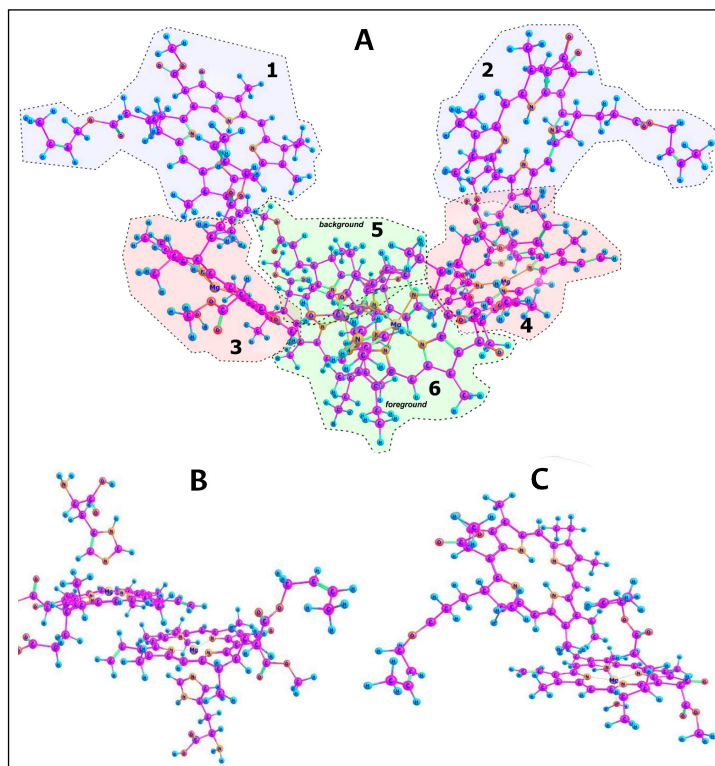


Figure 1. Spatial structure of six molecular chlorophyll-A system (A) and isolated 2-molecular subsystems in parallel (B) and perpendicular (C) configurations.

For all the selected structures energy, localization of MO (**table 1**) and atomic charges (**table 2**) were calculated. In addition, an analysis of the population of the highest occupied MO (HOMO) and lowest unoccupied MO (LUMO) interacting in the energy transfer from ground to excited states using theoretical absorption spectra (**figure 2** and **3**) was carried out. The obtained calculated spectra were compared with the experimental spectra of the Ch-A molecule in a diethyl ether solution [25]. The choice of the experimental spectrum in a diethyl ether solution is due to the fact that this solvent is considered “non-polar” (doesn’t have donor-acceptor properties), compared to ethanol, acetone, methanol, etc. This allows us to reduce the influence of external variables on the results [26].

Table 1. Energy (eV) and localization (%) of the molecular orbitals (MO) system of six chlorophyll-A molecules (Ch-A-6).

Chlorophyll-A-6 (Ch-A-6)								
N°	MO	ε (eV)	Localization (%)					
			1	2	3	4	5	6
1154	L+9	-0.84	-	100	-	-	-	-
1153	L+8	-0.90	-	-	-	96	-	-
1152	L+7	-0.95	97	-	-	-	-	-
1151	L+6	-0.97	-	-	99	-	-	-
1150	L+5	-1.60	-	-	-	-	21	79
1149	L+4	-1.62	-	-	-	-	80	20
1148	L+3	-1.77	-	99	-	-	-	-
1147	L+2	-1.85	96	-	-	-	-	-
1146	L+1	-1.95	-	-	-	96	-	-
1145	LUMO	-1.97	-	-	99	-	-	-
1144	HOMO	-5.47	-	-	-	-	10	89
1143	H-1	-5.56	-	-	-	-	72	27
1142	H-2	-5.61	-	99	-	-	-	-
1141	H-3	-5.73	-	-	-	-	74	25
1140	H-4	-5.73	99	-	-	-	-	-
1139	H-5	-5.81	-	-	-	-	40	56
1138	H-6	-5.87	-	-	97	-	-	-
1137	H-7	-5.88	-	-	-	94	-	-
1136	H-8	-5.97	-	98	-	-	-	-
1135	H-9	-6.05	54	-	-	45	-	-
1134	H-10	-6.11	46	-	-	54	-	-
1133	H-11	-6.14	-	-	99	-	-	-

1132	H-12	-6.88	-	-	-	-	26	73
------	------	-------	---	---	---	---	----	----

N°: Ordinal number of the molecular orbital.
MO: designation of the molecular orbital relative to the HOMO and LUMO, where plus (+) means the next one and the minus sign (-) means the previous one.
ε (eV): energy of the MO measured in eV.
Localization: the relative contribution of each fragment to the MO, expressed as a percentage.

Analysis of electronic structure was focused on both energy and localization of MO in each individual Ch-A molecule (table 1). In the system of Ch-A-6, inter molecular mixing of MO (MO numbers: 1144, 1143, 1141, 1139, 1132) is observed only for fragments five and six located parallel to each other; furthermore, in perpendicular configurations no hybridization was observed. The result of calculation of systems composed by two chlorophylls with different mutual arrangements (table 2) corroborates a greater mixing of orbitals for fragments of the Ch-A-1 subsystem lying parallel to each other.

The HOMO in the Ch-A-6 system is formed by hybridization of the fragments five and six, in which the fragment six is the predominant contributor. The LUMO is formed by fragment three: with a HOMO-LUMO energy gap of 3.5 eV for the Ch-A-6 system, lower than in the Ch-A-1 and Ch-A-2 systems, which have an energy gap of 0.34 and 0.28 eV respectively. The high density of five lowest unoccupied and twelve highest occupied MO causes high absorption capacity with a relatively narrow energy gap. Based on the results obtained, it can be hypothesized that an increase in the number of Ch-A molecules in the system will increase the density of boundary orbitals with a decrease in the energy gap.

Table 2. Energy (eV) and localization (%) of the molecular orbitals (MO) system of two chlorophyll-A molecules in parallel (Ch-A-1) and perpendicular (Ch-A-2) configurations, with their respective histidine (His#) molecules.

Ch-A-1							Ch-A-2				
N°	MO	ε (eV)	Localization (%)				N°	MO	ε (eV)	Localization (%)	
			1	His1	2	His2				1	2
444	L+7	0.56	100	0	0	0	360	L+5	0.20	3	97
443	L+6	0.48	0	0	0	100	359	L+4	0.10	97	3
442	L+5	0.36	0	0	100	0	358	L+3	-0.95	94	6
441	L+4	0.30	0	100	0	0	357	L+2	-0.98	6	94
440	L+3	-0.46	69	0	31	0	356	L+1	-1.84	96	4
439	L+2	-0.54	33	0	67	0	355	LUMO	-1.95	4	96
438	L+1	-1.40	100	0	0	0	354	HOMO	-5.73	100	0
437	LUMO	-1.46	0	0	100	0	353	H-1	-5.89	0	100
436	HOMO	-5.30	93	0	7	0	352	H-2	-6.06	79	21
435	H-1	-5.41	31	0	69	0	351	H-3	-6.13	22	78
434	H-2	-5.58	28	0	72	0	350	H-4	-7.27	100	0
433	H-3	-5.66	50	0	50	0	349	H-5	-7.45	28	72
432	H-4	-6.69	78	0	22	0	348	H-6	-7.61	43	57
431	H-5	-6.97	56	0	44	0	—				
430	H-6	-7.21	27	0	73	0					
429	H-7	-7.33	39	0	61	0					
428	H-8	-7.46	100	0	0	0					

N°: ordinal number of the molecular orbital (MO).
MO: designation of the molecular orbital relative to the HOMO and LUMO, where plus (+) means the next one and the minus sign (-) means the previous one.
ε (eV): energy of the MO measured in eV.
Localization: indicates the relative contribution to the MO expressed as a percentage.

As already noted, Ch-A contains a chlorin ring. Chlorin is a composite porphyrin molecule in which two -CH₂ radicals were added. At the same time, porphyrin is a derivative of the dipyrrole molecule consisting of two pyrrole molecules. The molecular orbital energy diagram (figure 2) shows correlation between MO from the pyrrole structure to the complete Ch-A structure. Additionally, the energies of the histidine MO are plotted on the diagram to show its participation in the formation of the Ch-A MO. The highest occupied MO

of pyrrole (π₂) is retained when transitioning through dipyrrole-porphyrin-chlorin-chlorophyll-A, with destabilization non greater than 1.58 eV. The lowest unoccupied MO of pyrrole (π₄) is also retained during the transition to Ch-A with a high degree of stabilization equal to 4.23 eV. These changes, which have a positive effect on the optical ability of Ch-A, are caused by the increasing density MO near the HOMO-LUMO gap.

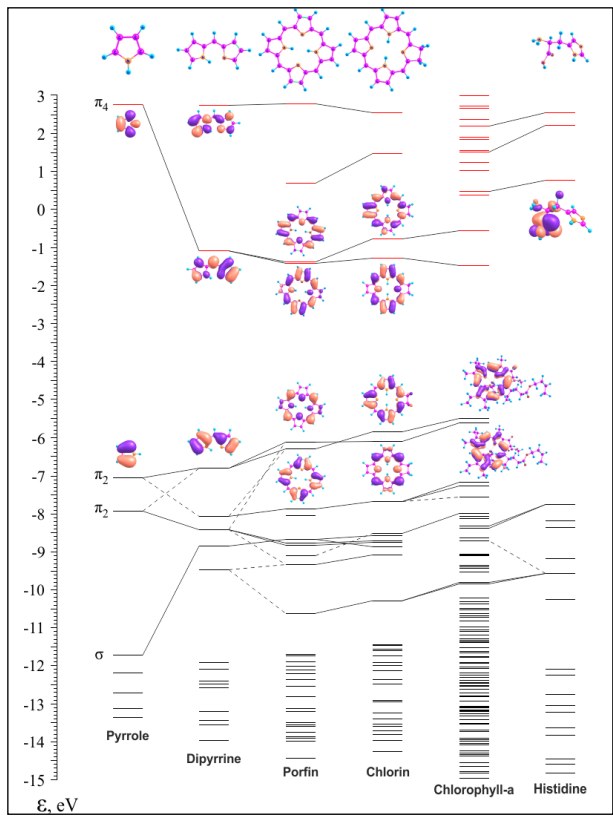


Figure 2. Transitional energy correlation diagram of the chlorophyll-A molecule, its derivatives and components, with occupied molecular orbitals indicated in black and unoccupied molecular orbital in red.

Based on the values of energies and localizations from DFT calculations, theoretical photo electronic spectra (PES) for the Ch-A-6 system and for the Ch-A-1 and the Ch-A-2 subsystems were constructed exhibiting shifts and changes on the MO and their relative intensity when transitioning from a two-molecule system to a six-molecule system. Theoretical photoelectron spectra of all structural molecules of Ch-A (shown in the diagram of **figure 2**) were obtained separately (**figure 3B**).

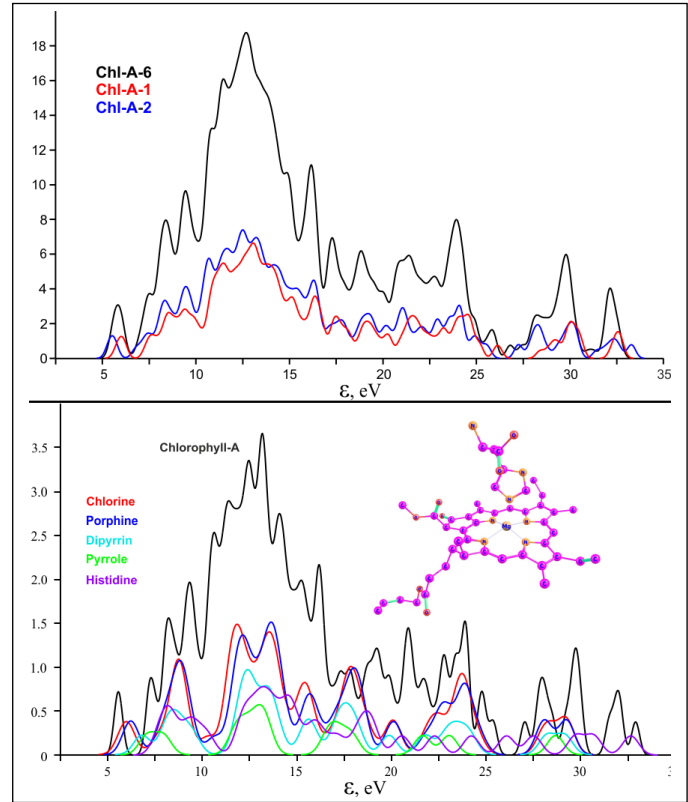


Figure 3. A: Theoretical photoelectron spectra of Ch-A-6 (black line), Ch-A-1 system in parallel configuration (red line) and Ch-A-2 system in perpendicular configuration (blue line) fragments. B: Theoretical photoelectron spectra of Ch-A molecule and derivatives of the pyrrole molecule.

The atomic charges in Mulliken approximation (**table 3**) were obtained by localization of the electron density of molecular orbitals for all three systems. For Ch-A-6, all of the fragments have negative charge; there is a lack of coordination with Mg ion in fragments one and two, so the ion charge value is not given in the table for them. The value of the Mg ion charge differs due to the presence of an additional attached water molecule (H₂O) for three and four fragments; and histidine (His) for fragments five and six. The mutual arrangement of the Ch-A molecules in the system affects the charge distribution.

Table 3. Mulliken atomic charges (a.u.) for system of six chlorophyll-A molecules (Ch-A-6), chlorophyll-a 2-molecule system in parallel configuration (Ch-A-1), chlorophyll-a 2-molecule system in perpendicular configuration (Ch-A-2).

Ch-A-6		Ch-A-1		Ch-A-2	
Fragment	q (a.u.)	Frag-ment	q (a.u.)	Fragment	q (a.u.)
1	-0.003	1 / Mg	-0.144 / +1.168	1	+0.004
2	-0.014	His1	-0.192	2 / Mg	-0.150 / +1.122
3 / H ₂ O / Mg	-0.033 / +0.146 / +1.120	2 / Mg	+0.196 / +1.193	H ₂ O	+0.146
4 / H ₂ O / Mg	-0.031 / +0.151 / +1.134	His 2	+0.140		
5 / His / Mg	+0.044 / +0.148 / +1.167	-			
6 / His / Mg	+0.037 / +0.144 / +1.195				
Σ	-0.0005	Σ	0	Σ	0

The fragment number is indicated in accordance with **figure 1A**.

q: atomic charge.

Σ: Total charge of the entire system, the total charge of fragments 3-6 includes the charge of the Mg ion.

His: Histidine.

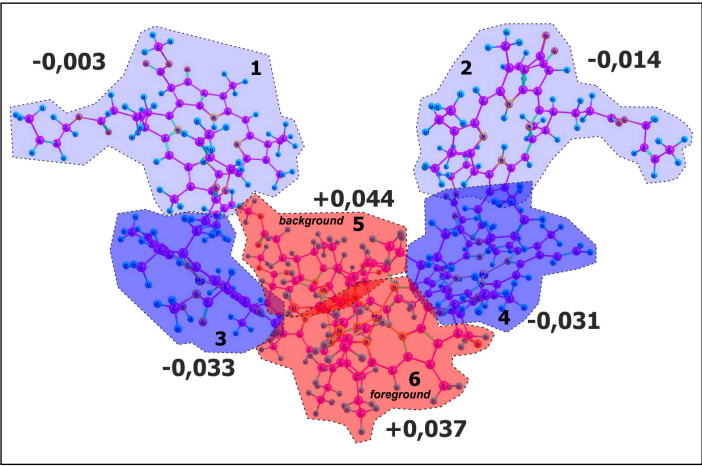


Figure 4. Total charge of fragments in chlorophyll-A six-molecular system; red color indicates positive charge; blue color indicates negative charge.

Total charge of systems Ch-A-6, Ch-A-1 and Ch-A-2 is close to neutral; although, it can be noted that the total charge of fragment one is negative (-0.144), and in fragment two it is positive (+0.196). This indicates a “pulling” of the electron density onto fragment one and of the His molecule from fragment two. Visually, the spatial structure is relatively symmetrical, but the distribution of atomic charges is asymmetrical. In Ch-A-2, the first fragment remains relatively neutral (the electron density is reduced by 0.004 a.u.). The second fragment remains negatively charged, having received a charge from the H₂O molecule. Taking into account the results of the analysis of atomic charge distribution, it can be speculated that, with an in-

crease in the number of Ch-A molecules in the system, the atomic charges are distributed in such a way that the entire system remains neutral, but the fragments will differ in total atomic charge.

By considering atomic charges and their positioning, we can deduce the type of bonding between the fragments (table 3 and figure 4). Fragments one and two are significantly removed from the central position and located perpendicular (respectively) to fragments three and four, attracting an insignificant electron density of about 0.01 a.u. and forming a total negative charge. Fragments three and four have a total negative charge (-0.033 and -0.031 a.u.), while fragments five and six have a positive charge (+0.044 and +0.037 a.u.), indicating a redistribution of electron density drawn to fragments three and four. In figure 4, areas with a positive (red) and negative (blue) charge are visually highlighted to clearly demonstrate the distribution of the total charge of the fragments, indicating the ionic nature of the bond between Ch-A molecules in the system.

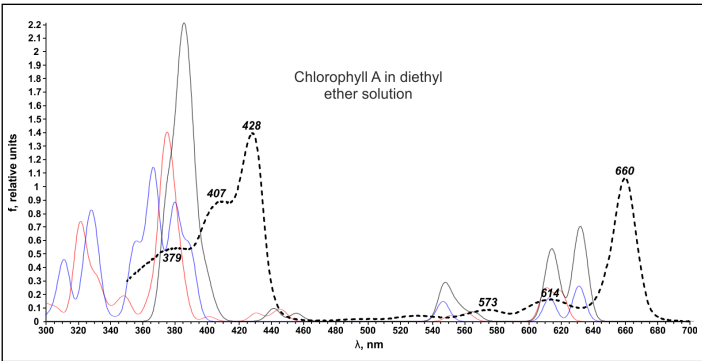


Figure 5. Optical absorption spectra of the calculated chlorophyll-A six-molecular system (Ch-A-6) (gray line), chlorophyll-A 2-molecule system in parallel configuration (red line), chlorophyll-A 2-molecule system in perpendicular configuration (blue line) and the experimental spectrum of chlorophyll-A (black dotted line).

When analyzing the experimental spectrum of Ch-A molecule in a diethyl ether solution (figure 5, black dotted line), two groups of maxima can be distinguished: 660, 614, 573 nm (red region) and 428, 407, 379 nm (UV region). The theoretical data (figure 5, gray line) for the system of six Ch-A fragments shows that the band with a maximum at 660 nm consists of highly intense transitions 1-5 (table 4) to π orbitals within fragments 2-2, 1-1, 6(5)-6(5), 4-4, 3-3. An unambiguous assignment of the bands at 614 and 573 nm is complicated by a high shift of 32 nm caused by the error in the method. Taking into account the calculations of individual Ch-A-1 and Ch-A-2 systems (table 5) and the corresponding sequence of transition energies, we can assume that the transition with a maximum at 614 nm refers to the transition within fragments 3-3, and the band at 573 nm corresponds to the transition within the residue 1-1. The

transition N° 3 (in table 4) stands out from 1144 to 1150 of mixed orbitals of fragments five and six.

Table 4. Calculated singlet-singlet transitions to excited states of the Ch-A-6 molecular system.

Ch-A-6					
N°	E (eV)	λ (nm)	f	Transition	Fragments
1	1.954	669.3	0.36	1142-1148	2 - 2
2	1.967	665.4	0.17	1140-1147	1 - 1
3	1.968	665.1	0.28	1144-1150	6, 5 - 6, 5
5	2.016	650.1	0.36	1137-1146	4 - 4
6	2.028	646.4	0.21	1138-1145	3 - 3
11	2.264	600.7	0.11	1133-1145	3 - 3
12	2.268	581.7	0.13	1140-1147	1 - 1
31	3.112	433.4	0.32	1138-1151	3 - 3
34	3.168	426.3	0.31	1135-1146	1, 4 - 4
35	3.179	425.0	0.49	1142-1154	2 - 2
36	3.188	424.0	0.11	1134-1146	1, 4 - 3
39	3.203	422.1	0.53	1132-1150	6, 5 - 6, 5
40	3.230	418.8	1.06	1137-1153	4 - 4
41	3.235	418.3	0.26	1132-1150	6, 5 - 6, 5
44	3.275	413.6	0.22	1132-1149	6, 5 - 5, 6
45	3.306	410.0	0.57	1137-1150	4 - 6, 5
47	3.317	408.8	0.12	1137-1150	4 - 6, 5

E: transition energy in eV.

λ : wavelength in nm.

f : oscillator strength in relative units.

Transition: ordinal number of molecular orbitals between which the transition occurs, the first number indicates the occupied MO, the second, separated by a dash, is the unoccupied MO.

Fragments: numbers of fragments separated by a dash (figure 1A) between which the transition occurs are indicated. Transitions with oscillator strength < 0.10 omitted.

The UV-region of the spectrum contains three high-intensity bands with maxima at 428, 407, and 379 nm, which, according to calculations, belong to ten transitions (31-47). About these transitions, the following can be distinguished: mixed transitions 34, 36, 39, 41, 44, 45, 47 and the transition with the highest calculated oscillator strength of 1.06 occurring within fragment 4 (table 4, transition N° 40). However, the calculation of the Ch-A-6 system couldn't show the structure of the 407 and 379 nm bands. The calculated individual systems Ch-A-1 and Ch-A-2 (table 5) allow us to interpret these bands. In general, the transitions of these two systems are similar, but they are fundamentally different in spatial arrangement, from which it follows that the relative arrangement of Ch-A molecules relative to each other has a little effect on the absorption spectra.

Table 5. Calculated singlet-singlet transitions to excited states of a system of two Ch-A molecules in parallel (Ch-A-1) and perpendicular (Ch-A-2) configuration.

Ch-A-1						Ch-A-2					
N°	E (eV)	λ (nm)	f	Transition	Fragments	N°	E (eV)	λ (nm)	f	Transition	Fragments
1	1.997	655.9	0.21	436-438	1 - 1	1	1.969	664.7	0.26	354-356	1 - 1
2	2.027	646.5	0.24	435-437	2,1 - 2	2	2.027	646.5	0.18	353-355	2 - 2
3	2.204	597.6	0.06	433-437	1, 2 - 2	4	2.273	580.4	0.13	351-355	2, 1 - 2
10	3.224	419.6	0.26	432-438	1, 2 - 1	7	3.173	425.8	0.24	352-355	1, 2 - 2
11	3.255	415.9	0.20	432-438	1, 2 - 1	8	3.196	423.0	0.33	354-358	1 - 1
12	3.287	412.2	0.76	432-437	1, 2 - 2	9	3.265	414.8	0.82	353-357	2 - 2
13	3.324	408.0	0.78	435-440	2,1 - 1, 2	11	3.374	402.4	0.93	352-358	1, 2 - 1
14	3.398	399.9	0.15	435-439	2,1 - 2, 1	12	3.410	398.6	0.29	349-355	2, 1 - 2
17	3.539	385.3	0.14	436-439	1 - 2, 1	15	3.495	389.8	0.49	351-357	2, 1 - 2
24	3.748	365.8	0.17	436-444	1 - 1	18	3.724	368.0	0.11	348-356	2, 1 - 1
25	3.801	361.2	0.10	428-438	1 - 1	19	3.760	364.7	0.50	354-359	1 - 1
27	3.861	356.2	0.60	433-440	1, 2 - 1, 2	20	3.805	325.8	0.31	350-358	1 - 1
—						23	3.979	311.6	0.45	353-360	2 - 2

E: transition energy (eV). λ : wavelength (nm). f : oscillator strength in relative units.

Transition: ordinal number of molecular orbitals between which the transition occurs, the first number indicates the occupied MO. The second is the unoccupied MO.

Fragments: numbers of fragments separated by a dash (figure 1B, 1C) between which the transition occurs are indicated. Transitions with oscillator strength < 0.10 omitted.

The bands at 407 and 379 nm (UV-region of the spectrum) are formed by transitions between fragments three and five, four and six, and five and six. There is no absorption of fragments one and two in this region. The energies of the transitions and their intensities in

the theoretical absorption spectra correspond with good accuracy to the experimental spectra of the Ch-A molecule, which allows us to judge the reliability of the results obtained.

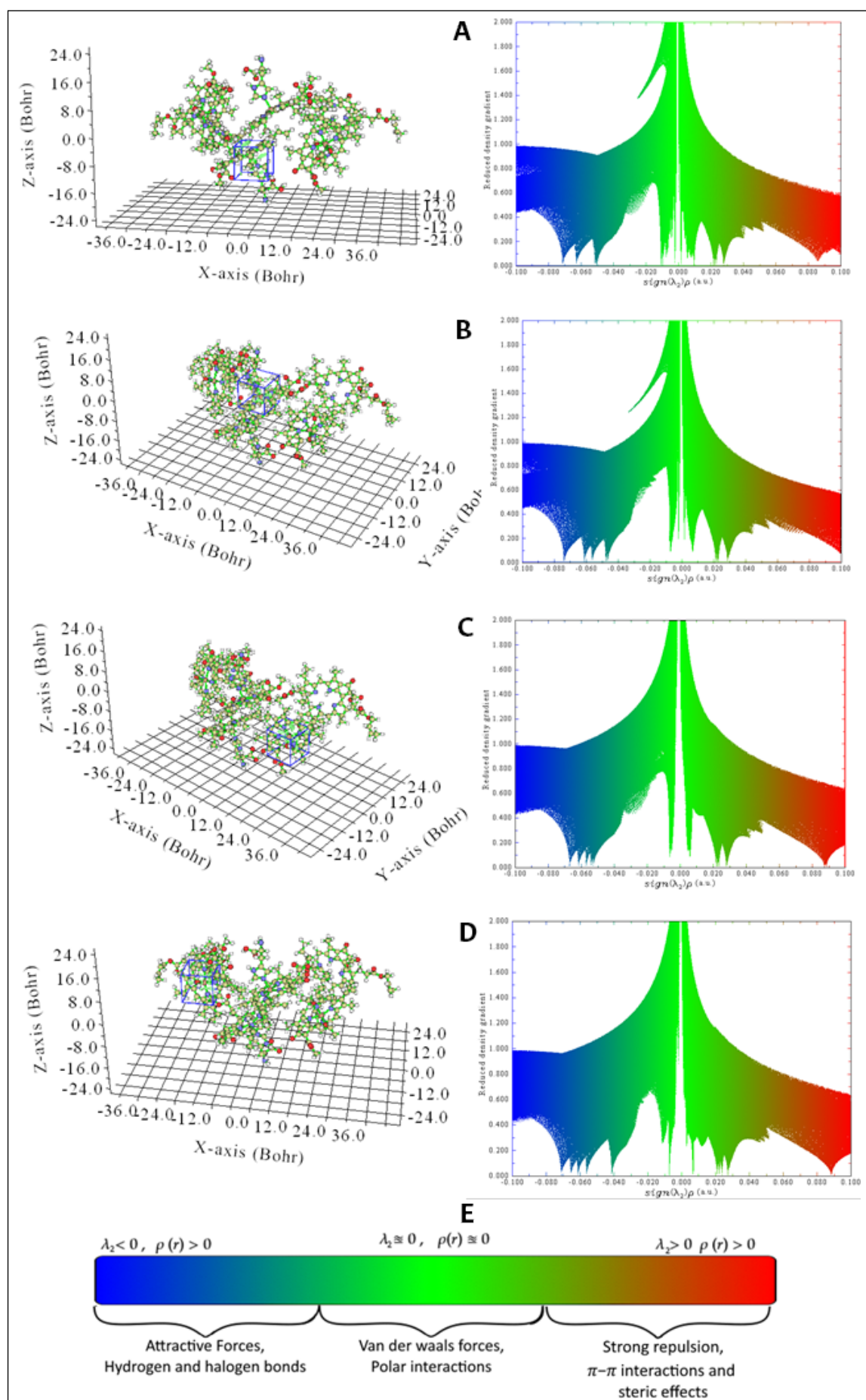


Figure 6. Calculated reduced density gradient (RDG) and data range for (A) first, (B) sixth, (C) third, and (D) fourth molecular fragments in chlorophyll-A system; E: Range and correspondence of non-covalent interactions spikes of RDG with their respective electronic density values $\rho(r)$, filtered by attractive or repulsive interaction by the sign of the second eigenvalue of the Hessian of the electron density ($\text{sign}(\lambda_2)$).

To evaluate non-covalent interactions (NCI), we calculated the reduced density gradient (RDG) around in the Mg coordination regions in a volume of a cube with side of five Bohr with geometrical center in Mg ion (denoted in blue in **figure 6**). As a result, for the fifth and the sixth fragments, an isosurface is observed around the central Mg surrounded by nitrogen atoms, which indicates the presence of a strong attraction in this region (**figure 7C**). For the third and fourth fragments, an attractive region with a hydrogen bond is observed between the central Mg ion and the water molecule, which is reflected in the NCI pattern as “tails” of the gradient touch near $\text{sign}(\lambda_2) \rho(r) \approx -0.040$ a.u.

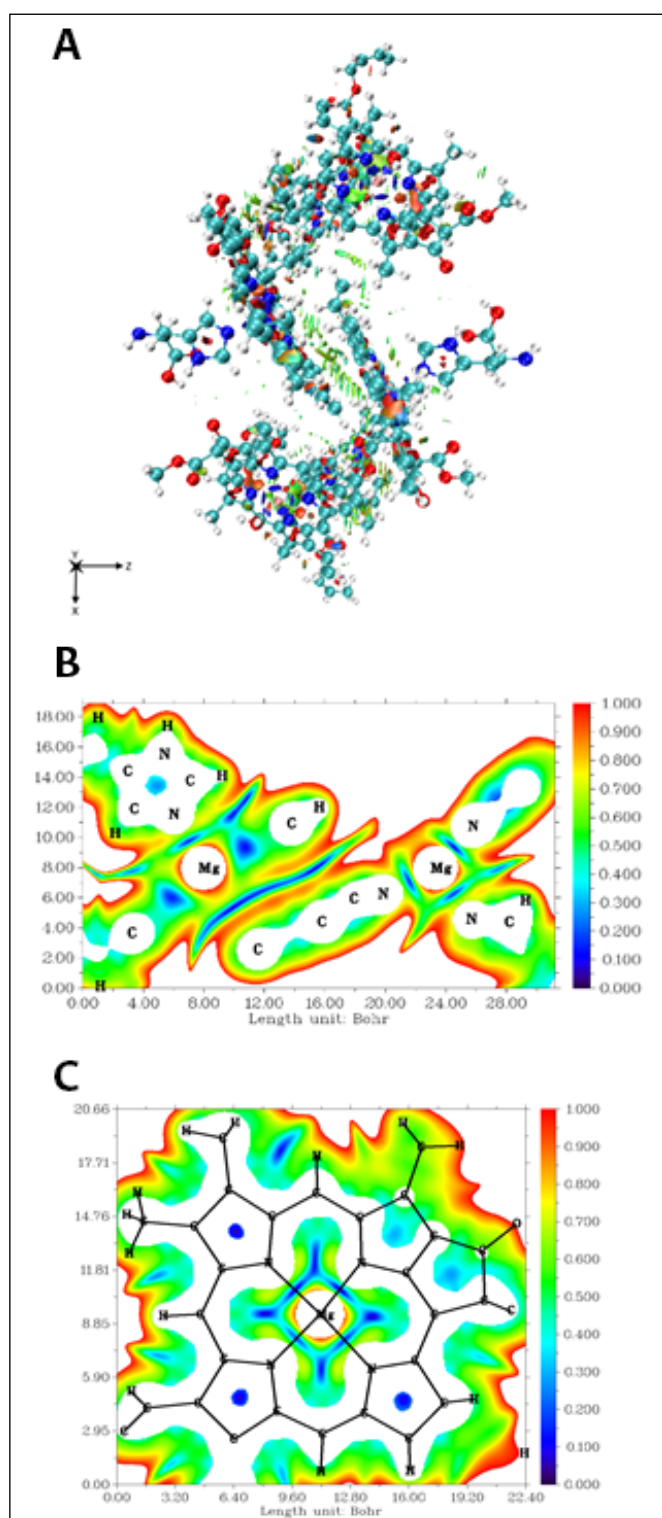


Figure 7. A: Visualization of non-covalent interactions of the system of six chlorophyll-A molecules as isosurfaces (Van-der-Waals interactions demarcated by the color green). B: Reduce density gradient (RDG) in chlorophyll-A system (parallel configuration), sliced perpendicular to interaction, critical values ($\text{RDG} \approx 0$) correspond to non-covalent interactions (strong Van-der-Waals interactions) between fragments. C: RDG values around the magnesium ion of chlorophyll-A system. White within the plotted area of B and C indicates values of $\text{RDG} > 1$.

For fragments five and six, the isosurface diagram (**figure 7A**) shows critical values within the range $1.400/-0.030 \text{ sign}(\lambda_2) \rho(r)$ and lower, corresponding to Van der Waals and weak attractive non-covalent interactions. **Figure 7A** shows the visualization of non-covalent interactions as isosurfaces, where blue color is hydrogen and halogen bonds, green is Van der Waals interactions, red is strong repulsion, π - π interactions and steric effects. Van der Waals interactions can be found in the plane between fragments five and six of the system. The high degree of Van der Waals interactions is caused by the chlorin rings of neighboring Ch-A, located near the considered regions. This indicates the presence of polarization of electron shells and the interaction of dipole moments between molecules (**figure 7B**).

Conclusion

Analysis of electron density and atomic charge distribution in the molecular system consisting of six Ch-A molecules showed that fragments interact through ionic bonds. With an increase in the number of Ch-A molecules, the total charge of the entire system remains neutral, and the total charge of the fragments included in the composition is distributed unevenly. Total atomic charge in systems consisting of two Ch-A molecules with different relative positions (Ch-A-1 and Ch-A-2) remains neutral. At the same time, the total charge of chlorin with a methyl group and a phytol “tail” of one fragment in the Ch-A-1 system is negative (-0.144 a.u.), and the second is positive ($+0.196$ a.u.). The histidine molecules attached to this system have the opposite charge (-0.192 and $+0.140$ a.u., respectively). The distributions of atomic charges for the system of four Ch-A molecules and two residues (Ch-A-6) indicate a significant redistribution of the atomic charge when several Ch-A molecules appear. The low total atomic charge of the fragments one and two (-0.003 and -0.014 a.u.) derives from the lack of coordination with the Mg ion. This affects insignificantly their participation in the absorption spectra in the UV region. According to the calculations, the coordination of the chlorin ring on the Mg ion causes a significant redistribution of atomic charges, and therefore the electron density which affects the absorption capacity in the UV region of the spectrum. This allows the system consisting of Ch-A to have a high absorption capacity of visible radiation.

The calculation and analysis of the absorption spectra showed transitions from the ground to excited states that occur between mixed molecular orbitals of the nearest Ch-A molecules. Such transitions are carried out with charge transfer (electron density). Thus, the absorption region is formed by transitions not only within one Ch-A, but also between closely located ones.

Theoretical photoelectron spectra were obtained, which clearly show the structure of the valence electron levels involved in the energy transfer. The use of topological methods for analyzing non-covalent interactions (RDG) showed the presence of strong hydrogen bonds and Van der Waals interactions. That indicates the occurrence of polarization between closely located Ch-A molecules and the interaction of the dipole moments of the molecules. For the remains of Ch-A molecules (without Mg coordination), “strong” Van der Waals interactions were not detected.

Acknowledgments

This work was supported by the Russian Ministry of Science and Higher Education (State Task No. FZNS-2024-0013).

References

- [1] J. W. Murray, "Photosynthesis: Light and Life", *Biochemist*, vol. 35, no. 5, pp. 4–7, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1042/BIO03505004>
- [2] A. Constantín, *Rebeiz Chlorophyll Biosynthesis and Technological Applications*, Springer, 2014.
- [3] G. Britton, *The biochemistry of natural pigments*, Cambridge University Press, 1986.
- [4] S. M. Petrovic, J. B. Zvezdanović, T. D. Anđelković and D. Z. Marković, "The identification of chlorophyll and its derivatives in the pigment mixtures: HPLC-chromatography, visible and mass spectroscopy studies", *Advanced technologies*, vol. 1, pp. 16–24, 2012.
- [5] T. van Mourik, M. Bühl and M. P. Gaigeot, "Density functional theory across chemistry, physics and biology", *Phil. Trans. R. Soc. A.*, vol. 372, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0488>
- [6] A. M. Hussein, Y. H. Zaki, S. A. Elroby and A. M. Hassanien, "Optical spectroscopic and DFT/TD-DFT studies on a new synthesized N, S-containing organic heterocyclic", *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, vol. 153, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physe.2023.115764>
- [7] M. Vasilescu et al., "Optical spectroscopic characteristics and TD-DFT calculations of new pyrrolo[1,2-b]pyridazine derivatives", *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, vol. 194, no. 2–3, pp. 308–317, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2007.08.029>
- [8] V.V. Korochentsev et al., "Electronic structure of guanidine and its derivatives from X-ray photoelectron spectroscopy and density functional theory studies", *Russian Journal of General Chemistry*, vol. 84, pp. 25–32, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1070363214010071>
- [9] E. R. Johnson, S. Keinan, P. Mori-Sánchez, J. Contreras-García, A. J. Cohen and W. Yang, "Revealing noncovalent interactions", *Journal of the American Chemical Society*, vol. 132, no. 18, pp. 6498–6506, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1021/ja100936w>
- [10] V. Ponnuchamy, A. Sandak and J. Sandak, "Multiscale modeling investigation of wood modification with acetic anhydride", *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. 22, no. 48, pp. 28448–28458, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1039/d0cp05165a>
- [11] M. Medimagh et al., "Investigations on the non-covalent interactions, drug-likeness, molecular docking and chemical properties of 1,1,4,7,7-pentamethyldiethylenetriammonium trinitrate by density-functional theory", *Journal of King Saud University - Science*, vol. 35, no. 4, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2023.102645>
- [12] A. H. Bakheit, R. Al-Salahi and A. A. Al-Majed, "Thermodynamic and Computational (DFT) Study of Non-Covalent Interaction Mechanisms of Charge Transfer Complex of Linagliptin with 2,3-Dichloro-5,6-dicyano-1,4-benzoquinone (DDQ) and Chloranilic acid (CHA)", *Molecules*, vol. 27, no. 19, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27196320>
- [13] A. A. Granovsky, *Firefly: computational chemistry program v.8.1*, <http://classic.chem.msu.su/gran/firefly/index.html>
- [14] M. W. Schmidt et al., "General Atomic and Molecular Electronic Structure System", *Journal Computational Chemistry*, vol. 14, no. 11, pp. 1347–1363, 1993. DOI: <https://doi.org/10.1002/jcc.540141112>
- [15] T. Yanai, D. P. Tew and N. C. Handy, "A new hybrid exchange-correlation functional using the Coulomb-attenuating method (CAM-B3LYP)", *Chemical Physics Letters*, vol. 393, no. 1–3, pp. 51–57, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2004.06.011>
- [16] A. D. Becke, "Density-functional exchange-energy approximation with correct asymptotic behavior", *Phys. Rev. A.*, vol. 38, no. 6, pp. 3098–3100, 1988. DOI: <https://doi.org/10.1103/physreva.38.3098>
- [17] M. Li, J. R. Reimers, M. J. Ford, R. Kobayashi and R. D. Amos, "Accurate prediction of the properties of materials using the CAM-B3LYP density functional", *Journal of Computational Chemistry*, vol. 42, no. 21, pp. 1486–1497, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/jcc.26558>
- [18] Z. L. Cai, M. J. Crossley, J. R. Reimers, R. Kobayashi and R. D. Amos, "Density Functional Theory for Charge Transfer: The Nature of the N-Bands of Porphyrins and Chlorophylls Revealed through CAM-B3LYP, CASPT2, and SAC-CI Calculations", *The Journal of Physical Chemistry B*, vol. 110, pp. 15624–15632, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1021/jp063376t>
- [19] R. Krishnan, J. S. Binkley, R. Seeger and J. A. Pople, "Self-consistent molecular orbital methods. XX. A basis set for correlated wave functions", *J. Chem. Phys.*, vol. 72, no. 1, pp. 650–654, 1980. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.438955>
- [20] N. Gelfand, A. Freidzon, V. Vovna, "Theoretical insights into UV-Vis absorption spectra of difluoroboron β -diketonates with an extended π system: An analysis based on DFT and TD-DFT calculations", *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, vol. 216, pp. 161–172, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2019.02.064>
- [21] D- Kröner, J. P. Götz, "Modeling of a violaxanthin-chlorophyll b chromophore pair in its LHCII environment using CAM-B3LYP", *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, vol. 109, pp. 12–19, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jphoto-biol.2011.12.007>
- [22] M. A. Kavanagh, J. K. G. Karlsson, J. D. Colburn, L. M. C. Barter and I. R. Gould, "A TDDFT investigation of the Photosystem II reaction center: Insights into the precursors to charge separation", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 117, no. 33, pp. 19705–19711, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1922158117>
- [23] G. Saleh, C. Gatti and L. Lo Presti, "Non-covalent interaction via the reduced density gradient: Independent atom model vs experimental multipolar electron densities", *Computational and Theoretical Chemistry*, vol. 998, pp. 148–163, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comptc.2012.07.014>
- [24] T. Lu, F. Chen, "Multiwfn: A Multifunctional Wavefunction Analyzer", *Journal of Computational Chemistry*, vol. 33, pp. 580–592, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1002/jcc.22885>
- [25] G. R. Seely and J. S. Connolly, "Fluorescence of photosynthetic pigments in vitro", in *Light emission by plants and bacteria*, Academic Press, pp. 99–133, 1986.
- [26] S. Jacquemoud and S. Ustin, *Spectroscopy of Leaf Molecules. In Leaf Optical Properties*, Cambridge University Press, 2019.

Citación del artículo:

D. A. Rivas Velásquez and A. Shurygin Vladimirovich, "Simulation of electronic structure and excited states of a chlorophyll-A system", *Rev. Colomb. Quim.*, vol. 53, no. 1, pp. 29–36, 2024. DOI: <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v53n1.116612>



Metrostat: desarrollo de potencióstato asequible con Arduino para experimentos electroquímicos

Resumen

Este artículo explica el proceso de diseño, construcción y evaluación del Metrostat, un potencióstato de bajo costo con Arduino para estudios electroquímicos. Para evaluar la relación costo-eficiencia, el Metrostat se comparó con un dispositivo comercial y con los dispositivos elaborados en otras investigaciones. También se realizaron experimentos de voltametría de barrido lineal, voltametría cíclica, polarización y cronoamperometría para evaluar el rendimiento del potencióstato. El equipo mostró una resolución en el potencial de 0,152 mV y en la corriente de 1,52 µA, comparables a los de un dispositivo comercial. La separación de las ramas en voltametría cíclica aumentó con la velocidad de barrido, en concordancia con la bibliografía consultada. Se obtuvieron voltamogramas cíclicos para la oxidación de ácido ascórbico a las concentraciones 2, 4 y 6 mM y curvas de polarización para la corrosión de acero al carbono similares a las reportadas en la bibliografía consultada. En cronoamperometría, se observó una relación lineal entre la corriente y la concentración de glucosa. Los resultados demuestran que el Metrostat tiene un rendimiento y sensibilidad comparables a los equipos comerciales a un precio considerablemente menor, esto lo convierte en una herramienta viable y eficiente para estudios electroquímicos en diversos campos como la química analítica, la ciencia de materiales y la bioquímica.

Palabras clave: estudios electroquímicos; potencióstato; Arduino; voltametría; química analítica; ciencia de materiales.

Metrostat: Development of an affordable potentiostat with Arduino for electrochemical experiments

Abstract

This paper explains the process of designing, building and evaluating the Metrostat, a low-cost Arduino-based potentiostat for electrochemical studies. To evaluate the cost-effectiveness, the Metrostat was compared with a commercial device and with devices developed in other researches. Linear sweep voltammetry, cyclic voltammetry, polarization and chronoamperometry experiments were also performed to evaluate the performance of the potentiostat. The equipment showed a potential resolution of 0.152 mV and current resolution of 1.52 µA, comparable to those of a commercial device. The separation of the branches in cyclic voltammetry increased with the scanning speed, in agreement with the literature consulted. Cyclic voltammograms were obtained for ascorbic acid oxidation at 2, 4, and 6 mM concentrations and polarization curves for carbon steel corrosion similar to those reported in the literature. In chronoamperometry, a linear relationship between current and glucose concentration was observed. The results demonstrate that the Metrostat has a performance and sensitivity comparable to commercial equipment at a considerably lower price, making it a viable and efficient tool for electrochemical studies in various fields such as analytical chemistry, materials science, and biochemistry.

Keywords: electrochemical studies; potentiostat; Arduino; voltammetry; analytical chemistry; materials science.

Metrostat: desenvolvimento de potencióstato acessível com Arduino para experimentos eletroquímicos

Resumo

Este trabalho explica o processo de projeto, construção e avaliação do Metrostat, um potencióstato de baixo custo baseado em Arduino para estudos eletroquímicos. Para avaliar a relação custo-benefício, o Metrostat foi comparado com um dispositivo comercial e com dispositivos desenvolvidos em outras pesquisas. Também foram realizados experimentos de voltametría de varredura linear, voltametría cíclica, polarização e cronoamperometria para avaliar o desempenho do potencióstato. O dispositivo apresentou uma resolução de potencial de 0,152 mV e uma resolução de corrente de 1,52 µA, comparável a um dispositivo comercial. A separação das ramificações na voltametría cíclica aumentou com a velocidade de varredura, de acordo com a literatura consultada. Foram obtidos voltamogramas cíclicos para a oxidação de ácidoascórbico em concentrações de 2, 4 e 6 mM e curvas de polarização paracorrosão de aço carbono semelhantes às relatadas na literatura. Na cronoamperometria, foi observada uma relação linear entre a corrente e a concentração de glicose. Os resultados demonstram que o Metrostat tem desempenho e sensibilidade comparáveis aos dos equipamentos comerciais a um preço consideravelmente menor, o que o torna uma ferramenta viável e eficiente para estudos eletroquímicos em vários campos, como química analítica, ciência dos materiais e bioquímica.

Palavras-chave: estudos eletroquímicos; potencióstato; Arduino; voltametría; química analítica; ciência de materiais.



Introducción

El potenciostato es una herramienta clave para la investigación electroquímica, es un dispositivo indispensable para el desarrollo y evaluación de inhibidores de corrosión, para la caracterización de materiales, el diseño de sensores, los estudios de baterías y la química ambiental. Estas aplicaciones son esenciales para avanzar en múltiples áreas científicas y tecnológicas. Sin embargo, el alto costo de los potenciostatos comerciales puede representar una barrera significativa para el avance de las investigaciones, especialmente para instituciones o proyectos con presupuestos limitados. Como respuesta a este desafío, muchos investigadores han optado por desarrollar y construir potenciostatos de bajo costo, como informan diversos estudios [1–4].

Este artículo aborda la construcción del Metrostat: un potenciostato-galvanostato de bajo costo, como una solución práctica y accesible que responda a las necesidades de las líneas de investigación de la Universidad Metropolitana (Venezuela). La implementación de este dispositivo no solo ampliará las posibilidades de investigación en el ámbito electroquímico, sino que también facilitará el acceso a esta tecnología tanto para estudiantes como para investigadores. Con esto se busca promover herramientas tecnológicas accesibles, que mejoren la calidad y el alcance de la investigación científica, y fortalecer las capacidades de la institución en áreas estratégicas.

A partir del segundo trimestre del año 2024, este potenciostato se integrará a la práctica “Determinación de glucosa por método cronamperométrico” del curso Laboratorio de Destrezas Instrumentales del plan de estudios de Ingeniería Química. Esta incorporación significará una mejora del programa de estudios de pregrado y establecerá un precedente para la construcción de dispositivos similares en el futuro, alineándose con el noveno Objetivo de Desarrollo Sostenible del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.

Materiales y métodos

El potenciostato es un dispositivo que permite seguir el curso de las reacciones electroquímicas, ya que permite monitorear la diferencia de potencial entre el electrodo de trabajo (WE) y el electrodo de referencia (RE), mediante la respuesta en intensidad de corriente entre el WE y el contra electrodo (CE) [5–6].

En la **figura 1** se muestra el circuito eléctrico elemental de control y medición de un potenciostato.

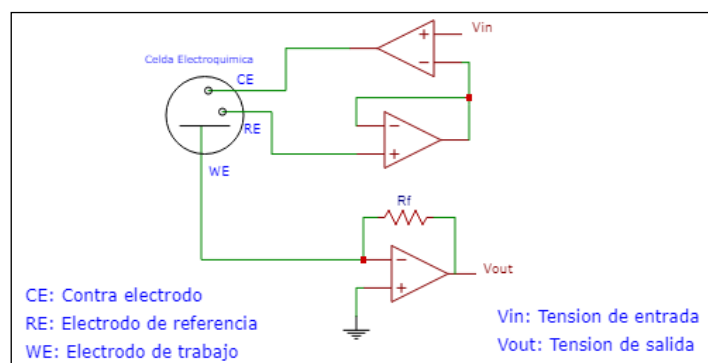


Figura 1. Circuito básico de un potenciostato simplificado. Tomado de [14].

El uso de un CE activa una celda electroquímica y genera una señal de control. Esta señal se resta de la señal del RE, con lo cual se obtiene la medición del WE. Estas mediciones, junto con la corriente y la diferencia de potencial con respecto al RE, son esenciales para los experimentos electroquímicos con potenciostatos. En el presente estudio, y con la finalidad de realizar estas mediciones, se utiliza un Arduino [7], que es una plataforma de prototipado electrónico de código abierto que combina hardware y software de manera flexible y accesible. A nivel científico, se presenta como un sistema integrado de desarrollo que facilita la creación y programación de dispositi-

tivos electrónicos interactivos y autónomos. La plataforma consta de una placa de circuito impreso equipada con un microcontrolador, una interfaz de programación y un entorno de desarrollo que simplifica la escritura de código y la interacción con periféricos.

Se utilizaron amplificadores operacionales (OPAMP) para desacoplar circuitos, amplificar y atenuar señales, y configurar un amplificador diferencial, como se muestra en la **figura 2**. Los OPAMP son componentes clave en la electrónica debido a su capacidad para amplificar señales débiles, su versatilidad en el diseño de circuitos, su alta impedancia de entrada, su comportamiento lineal, y su capacidad para aislar señales. Estas características hacen que los OPAMP sean fundamentales en una amplia gama de aplicaciones electrónicas y sistemas [8].

Un OPAMP típico consta de un circuito con entradas, una etapa de amplificación y una salida. La etapa de amplificación permite una ganancia de voltaje muy alta, lo que permite amplificar pequeñas señales de entrada a niveles mucho más altos. Además, los amplificadores operacionales suelen tener propiedades de entrada y salida bien definidas y características de funcionamiento estables [9].

En el caso del potenciostato que se ha desarrollado, se utilizó un amplificador de tipo diferencial que sirve para las aplicaciones en las que hay necesidad de amplificar la diferencia entre las señales de entrada; en otras palabras, este dispositivo amplifica la diferencia entre dos entradas, pero rechaza toda señal común a las dos entradas [10].

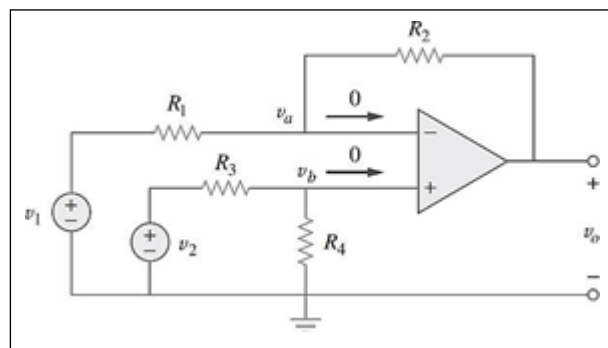


Figura 2. Amplificador operacional en configuración diferencial. Tomado de [10].

La Ec. (1) está asociada con la configuración del amplificador:

$$v_0 = \frac{R_2 (1 + R_1/R_2)}{R_1 (1 + R_3/R_4)} v_2 - \frac{R_2}{R_1} v_1 \quad (1)$$

Donde R_1 , R_2 , R_3 y R_4 son resistencias, v_1 y v_2 son tensiones de entrada y v_0 es la tensión de salida [10].

Una señal representada por modulación por ancho de pulso (PWM, Pulse Width Modulation), como se muestra en la **figura 3**, es una señal digital que se utiliza para representar una señal analógica. La señal PWM consta de pulsos de ancho variable y amplitud constante, el ancho de los pulsos varía para representar el valor de la señal analógica. Un filtro es un dispositivo que permite pasar o bloquear ciertas frecuencias de una señal. En el presente trabajo, el filtro está diseñado para permitir el paso de las frecuencias bajas de la señal PWM y para bloquear las frecuencias altas. Esto se debe a que las frecuencias bajas de la señal PWM representan el valor de la señal analógica, mientras que las frecuencias altas son ruido. Al pasar la señal PWM a través del filtro, se eliminan las frecuencias altas y se obtiene solo la señal analógica. Esto significa que la señal de salida del filtro es una señal continua que representa el valor de la señal analógica original.

En el caso del Arduino, la señal PWM se genera utilizando un pin digital de la plataforma. El ancho de los pulsos de la señal PWM se puede controlar utilizando la función `analogWrite()`. El filtro se puede implementar utilizando un circuito electrónico o un software.

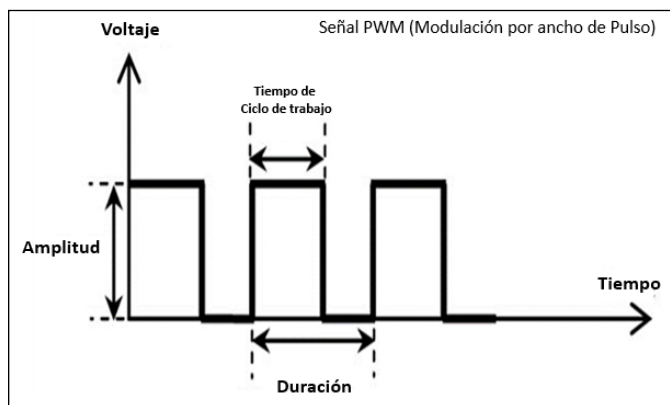


Figura 3. Señal PWM con sus dos períodos de tiempo básicos (pulso 0 y 1). Tomado de [11].

Un ejemplo de circuito electrónico que puede emplearse para filtrar una señal PWM es un filtro pasa-bajos compuesto por una resistencia (R) y un condensador (C). Un ejemplo de un software que se puede utilizar para filtrar una señal PWM es la función `lowpassfilter()` de la biblioteca Arduino.

Aunque en el caso de estudio se trata de un dispositivo de elaboración propia y de bajo costo, es importante comparar su eficiencia con la de los potenciostatos comerciales, para alcanzar los objetivos planteados en el presente trabajo. Para ello se establecieron dos métodos de comparación: uno a través de un potenciostato comercial y otro con resultados de otras investigaciones en las que se utilizaron potenciostatos en procesos similares.

Entre los antecedentes se pueden citar, en orden cronológico, los siguientes dispositivos utilizados en otras investigaciones: el prototipo de Barrero et al. [12] es obsoleto para propósitos analíticos y educativos debido a su antigüedad y limitada resolución; Meloni [13] desarrolla un potenciostato de bajo costo para enseñanza de la electroquímica, pero carece de un sistema de medición para detectar y reportar la diferencia de potencial entre los electrodos;

y Crespo et al. [14] presenta un diseño completo y mejorado de un potenciostato que soluciona debilidades de diseños anteriores, como la falta de protección para el prototipado electrónico de código abierto y filtros para excluir frecuencias indeseadas, y que cuenta con sistemas para evaluar la sensibilidad de forma independiente a la corriente que pasa por el WE y la diferencia de potencial entre los WE y RE. Adicionalmente, para el desarrollo de la presente investigación, se estudiaron y consideraron distintos diseños y experiencias de otros autores en esta área como Krorakai et al. [15], Alfaro y Alfaro [16], Ramos y Hernández [17], Rathnayaka et al. [18], y Colburn et al. [19].

Diseño del dispositivo

El Arduino es una herramienta útil para controlar y monitorear los valores de corriente y potencial en celdas electroquímicas; sin embargo, Arduino no registra señales negativas, por lo que se necesitan OPAMP para desplazarlas. Los OPAMP también replican potenciales de celdas sin interferencia y son vitales en un potenciostato para amplificar señales de tensión de microamperios y milivoltios. La figura 4 muestra el circuito de un potenciostato con Arduino y OPAMP.

Fuente de alimentación de los amplificadores operacionales (OPAMP)

Se mejoró el montaje del prototipo con una fuente regulada usando integrados 7805, condensadores y diodos para alimentar los OPAMP. Esto hace que el potenciostato sea portátil y pueda ser alimentado por baterías de 9 V para obtener las tensiones ideales para los OPAMP de $\pm 6,2$ V [20–21]. Así se eliminan ruidos eléctricos y se garantiza una señal clara desde la celda, a través del Arduino y la corriente directa.

Entrada de la señal

El Arduino envía señal PWM a través de un filtro para convertirla en señal continua. Esta señal es una rampa ascendente de 0 hasta 5

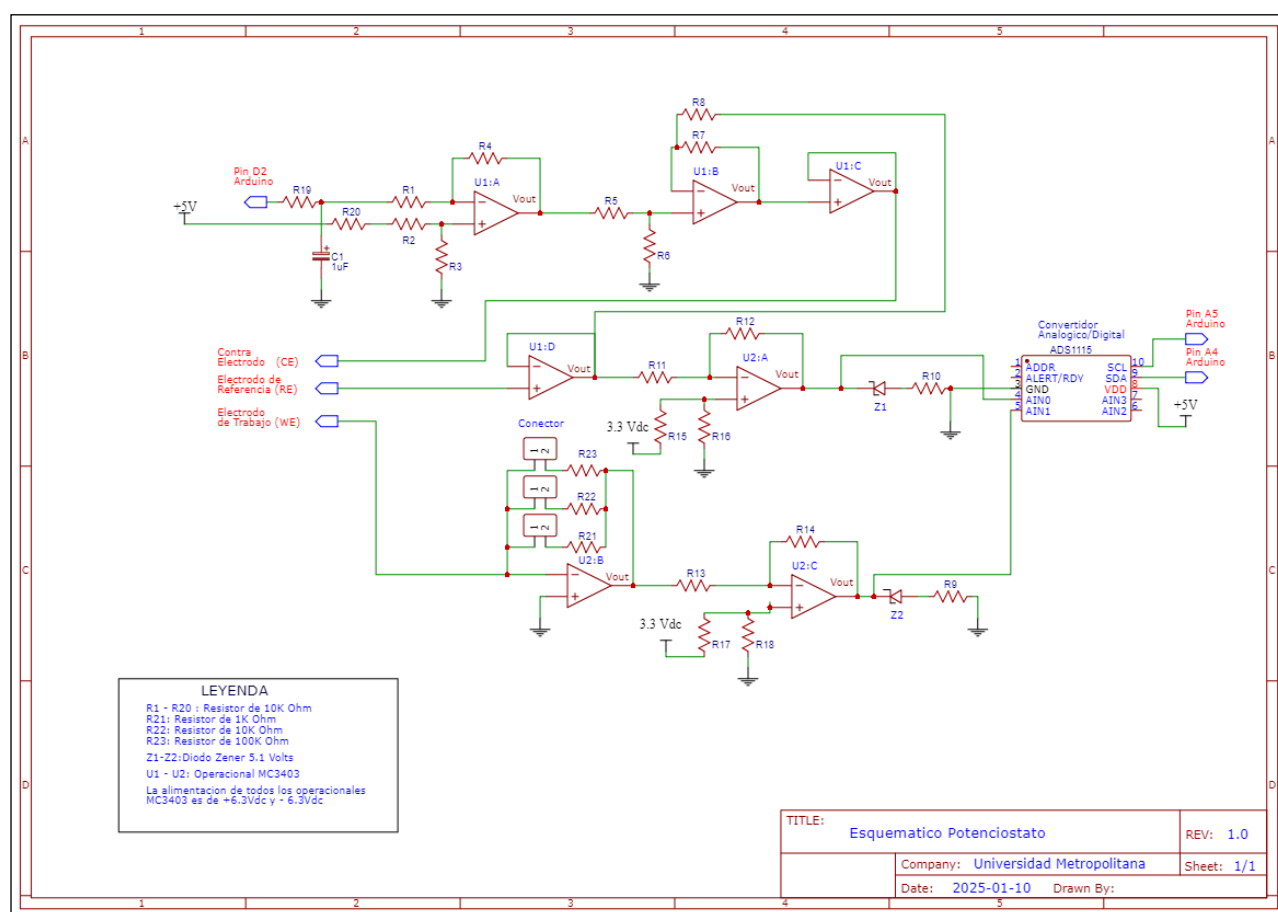


Figura 4. Circuito de un potenciostato construido con amplificadores operacionales y Arduino.

V que luego desciende con la misma pendiente y se desplaza 2,5 V hacia el sentido negativo para obtener una señal triangular de -2,5 a +2,5 V. La señal de excitación se obtiene restando la señal triangular al potencial del RE y se introduce en la celda electroquímica a través del CE.

Lectura de los datos

Para interpretar los potenciales y corrientes negativas obtenidas en la celda, se usa un OPAMP en configuración seguidor, para tomar una muestra de los potenciales, y se desplaza 3,3 V con un amplificador diferencial. Además, se usa un convertidor analógico-digital de 16 bits, denominado como ADS1115, para maximizar la precisión de la lectura, la cual se comunica con el Arduino mediante el protocolo I2C. Para la lectura de la intensidad de la corriente se emplea un convertidor de tensión a corriente con resistencias de transimpedancia de valores distintos, que afectan la ganancia del amplificador y varían el tamaño de la señal resultante. Estas resistencias se pueden intercambiar mediante un jumper para seleccionar la ganancia del amplificador adecuada según la magnitud esperada de las corrientes.

Interpretación de datos

El Arduino se configura con un software que monitorea, almacena e imprime datos automáticamente en tiempo real durante el escaneo. Estos datos se pueden exportar a Excel® u otros programas para generar gráficos y facilitar su análisis.

Ensayos del dispositivo

La mejor manera de comprobar el correcto funcionamiento de un potenciostato de bajo costo, antes de hacer experimentos electroquímicos reales o para identificar un problema en caso de falla, es realizar una serie de mediciones electroquímicas con soluciones conocidas. A continuación se citan algunas medidas electroquímicas específicas que se usaron para probar el potenciostato: voltametría de barrido lineal, voltametría cíclica y cronoamperometría.

Voltametría de barrido lineal

La voltametría de barrido lineal es una técnica para medir la respuesta de corriente-voltaje de una reacción electroquímica a medida que el potencial se escanea linealmente desde un potencial inicial hasta un potencial final. En este caso, se utilizó un circuito de prueba llamado celda ficticia (*dummy cell*) que emula un comportamiento electroquímico de histéresis, donde se coloca una resistencia eléctrica conocida, tal como se indica en la **figura 5**. Se utilizaron dos resistencias eléctricas (R1) de valores nominales 10 y 50 kohm.

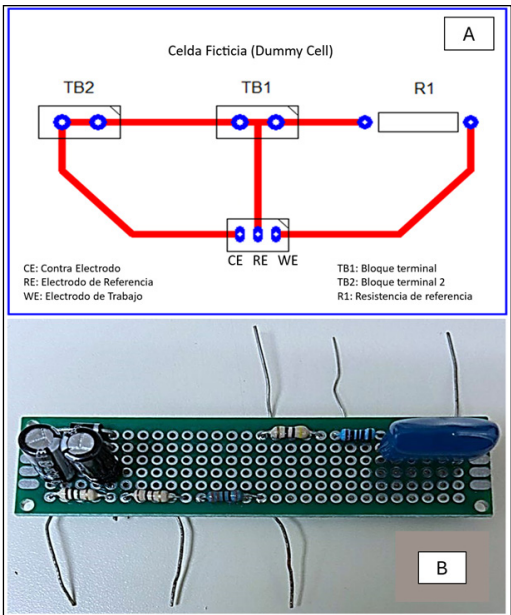


Figura 5. A: representación de la celda ficticia (*dummy cell*) para medir el valor de la resistencia R1, TB1. B: *Dummy cell* (electrónica) construida.

El esquema presentado es un arreglo de resistencias y capacitores (270 μ F) y TB2 es un arreglo de resistencias y diodos (SR 106). En SIL1 se hacen las conexiones al potenciostato equivalentes al CE, al RE y al WE.

Voltametría cíclica

Esta técnica permite medir la respuesta de corriente a un voltaje en una reacción electroquímica mientras se escanea linealmente el potencial. Para probar la sensibilidad del potenciostato con referencia a la velocidad de barrido, se realizó un ensayo utilizando la misma celda ficticia mencionada anteriormente y se generó el gráfico respectivo.

Por otra parte, se estudió una solución de ferro/ferri cianuro de potasio 1 mM (P.A. (ACS), Biopack) en KCl 1 M (BioUltra, Merck), con una velocidad de barrido de 500 mV/s, utilizando un WE de grafito (20 mm² de superficie), un alambre de platino como CE (0,4 mm de diámetro) y un RE de Ag/AgCl.

Para visualizar el efecto que tiene la concentración de ácido ascórbico en los voltamogramas cíclicos se elaboraron 3 soluciones a distintas concentraciones: 2, 4 y 6 mM. Previo a esto se preparó un *buffer* de fosfatos (NaH₂PO₄/Na₂HPO₄) 0,5 M y pH 7,4. En esta experiencia se utilizó un RE Cu/CuSO₄ de elaboración propia, un alambre de platino de 2,4 cm de longitud y 0,4 mm de grosor como WE y una barra de grafito como electrodo auxiliar.

Se utilizó un WE de acero al carbono en un medio de ácido sulfúrico 0,5 M (H₂SO₄), un CE de platino y un RE Ag/AgCl a través de un puente salino de agar con KCl como electrolito. La concentración del inhibidor es 0,01 M y se elaboró una curva de polarización para cada caso. El estudio se basó en investigaciones anteriores realizadas por Ortega et al. [22] y Ashassi et al. [23]. La velocidad de barrido fue de 19 mV/s y el recorrido lineal fue de 0 a 1,5 V vs. Ag/AgCl (barrido ascendente).

Cronoamperometría

Teniendo en cuenta que el dispositivo desarrollado está previsto para su utilización durante el último trimestre del año 2024 en el Laboratorio de Destrezas, el cual forma parte del plan de estudios de la carrera de Ingeniería Química en la Universidad Metropolitana, se llevó a cabo un experimento para medir los niveles de glucosa en las bebidas refrescantes comerciales.

Los medidores de glucosa comerciales utilizan la técnica de la cronoamperometría, en la que se aplica un potencial constante entre un WE y un CE, mientras se mide la corriente en función del tiempo.

Para medir la glucosa, se utilizaron tiras reactivas de glucosa marca FreeStyle Optium, Abbott, USA. Para conectar los tres electrodos exteriores de las tiras al dispositivo se utilizó un adaptador casero, similar al utilizado en los electrodos serigrafados.

Las muestras de glucosa se prepararon con una solución madre de glucosa en polvo (Glucose 30DE) 100 mM (1,80 g en 100 mL) y con una solución *buffer* de fosfato (Scharlau) de 0,05 M con pH 7,2 en agua destilada. A partir de la solución patrón se prepararon por dilución con agua destilada cuatro soluciones de prueba con diferentes concentraciones (0,4; 0,8; 1,5; y 2,0 mg/mL). Las soluciones de glucosa se prepararon el día anterior a la realización de los experimentos para permitir el equilibrio de mutarrotación entre las formas α y β [24].

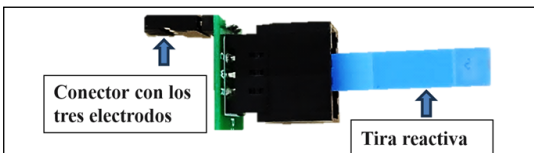


Figura 6. Adaptador casero y tira reactiva utilizada en el experimento de cronoamperometría.

En la **figura 6** se muestra un esquema de la conexión de las tiras reactivas al dispositivo.

El ensayo cronoamperométrico consistió en dos partes:

- Período inicial donde el potencial permaneció a 0 mV por 1 s.
- Período de ensayo donde el potencial fue escalonado a 0,5 V y permaneció constante durante 30 s, con una corriente de 35 μA a una frecuencia de 4 Hz.

Para cuantificar la cantidad de glucosa se tomó la corriente promedio a los 20 s, una vez que el valor se mantuviese estable [25–26]. Para medir la glucosa, los electrodos en la tira reactiva están recubiertos con la enzima glucosa oxidasa, que convierte la glucosa en ácido glucónico con la producción de peróxido de hidrógeno [27], el cual se oxida en la superficie del WE [28]. La corriente en un momento dado es directamente proporcional a la concentración de glucosa, como lo muestra la ecuación de Cottrell [29].

Software

En el Metrostat, el software secuencial comienza con el barrido de tensión a la celda. Los usuarios pueden definir parámetros como el potencial de inicio, el máximo del barrido y la velocidad del escalón. Una vez definido el rango de barrido, el software toma los datos requeridos en cada paso y los almacena en una base de datos para su análisis posterior.

Análisis económico y comparación de costos

Se llevó a cabo un análisis económico del último prototipo desarrollado.

Resultados y discusión

Se llevaron a cabo pruebas electroquímicas en las versiones desarrolladas del potenciostato, utilizando los resultados de otras investigaciones consultadas como referencia.

Voltametría de barrido lineal

Los valores de las resistencias utilizadas se midieron utilizando un multímetro digital marca UNI-T, modelo UT890D+. Los datos resultantes del potenciostato se graficaron en la **figura 7**.

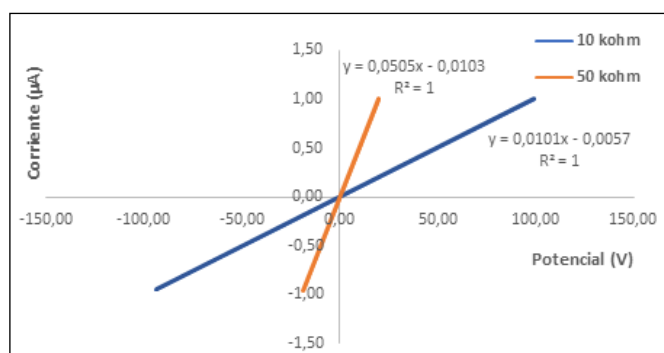


Figura 7. Barrido lineal utilizando la celda ficticia, corriente (μA) vs potencial (V).

Como se muestra en la **figura 7**, las pendientes obtenidas de las rectas para cada una de las resistencias ensayadas representan los valores de dichas resistencias. La precisión de la corriente medida (PCM) utilizando el potenciostato fue de 99,98% para el caso de la resistencia de 50 kohm y del 99,66% para el caso de la resistencia de valor 10 kohm.

El valor de la precisión en la corriente registrada (PCM) se obtuvo utilizando la Ec. (2).

$$\text{PCM} = \frac{V/R - I}{V/R} \times 100\% \quad (2)$$

Donde V es el potencial registrado por el potenciostato, R el valor referencial de la resistencia e I el valor de la corriente reportada por el potenciostato.

Durante el diseño y desarrollo del equipo, se elaboraron cuatro versiones de potenciostatos, dos de 10 bits (1.0 y 2.0) y dos de 16 bits (3.0 y 4.0). La versión 4.0, la última, la más compacta y versátil, incluye la fuente de alimentación de los OPAMP en el circuito y una caja de acrílico para su transporte y uso. Esta última versión ofrece la mayor resolución y precisión según los resultados y la bibliografía consultada [7]. Su resolución de 16 bits se divide en 1 bit para el signo y 15 bits para el rango de medición, lo cual permite mediciones precisas de hasta 152 μV (Ec. (3)) en un amplio rango de medidas.

$$\text{Resolución potencial} = 5\text{V}/2^{15} = 0,152 \text{ mV} = 152 \mu\text{V} \quad (3)$$

Donde V es el potencial registrado por el potenciostato.

El potenciostato tiene una alta precisión y exactitud para medir corrientes con resistencias de transimpedancia entre 100 ohm y 100 kohm, con una resolución de 1,52 μA (Ec. (4)) y 0,00152 μA (Ec. (5)), respectivamente.

$$\text{Resolución corriente} = 152 \mu\text{V}/100 \text{ ohm} = 1,52 \mu\text{A} \quad (4)$$

$$\text{Resolución corriente} = 152 \mu\text{V}/100 \text{ kohm} = 0,00152 \mu\text{A} \quad (5)$$

La adición del convertidor analógico-digital de 16 bits ADS1115 aumenta la precisión de los datos de 10 bits del Arduino a 16 bits, lo que es útil para estudios de corrosión electroquímica con valores de corriente muy bajos, del orden de pocos microamperios. Esto se traduce en resultados más confiables para la investigación. El potenciostato mide un intervalo de -3,3 a 1,7 V y la lectura de intensidad de corriente se ajusta según la resistencia de transimpedancia seleccionada. Si la resistencia es inferior a 100 ohm, es posible obtener lecturas mucho más altas. En la **figura 8** se muestra una fotografía del potenciostato desarrollado.



Figura 8. Potenciostato versión 4.0 (16 bits).

Voltametría cíclica

La **figura 9** presenta la respuesta de la celda ficticia a una voltametría cíclica con la última versión del potenciostato (16 bits), representando el potencial (eje x) del WE en V vs. la corriente (eje y) del WE en μA . El gráfico de la **figura 9** se construyó a partir de los parámetros mostrados en la **tabla 1**, en la cual se comenzó la prueba con un valor inicial de potencial.

Tabla 1. Parámetros fijados en el potenciostato para trazar las curvas de voltametría cíclica.

Potencial inicial (mV)	Potencial final (mV)	Velocidad de barrido (V/s)	Intervalo de corriente (μA)
-600	+600	Variable: 0,2 - 0,4 - 0,8	100

Utilizando la última versión del potenciostato se realizó un ensayo de voltametría cíclica, cuyo resultado se indica en la **figura 10**. Puede observarse en esta figura que la respuesta del equipo es la esperada para este tipo de ensayos de voltametría. El fenómeno de la separación de las ramas de las curvas al aumentar la velocidad de barrido es bien conocido [30] y la celda ficticia utilizada está

simulando esta situación, en las celdas reales este comportamiento está relacionado con los procesos electroquímicos.

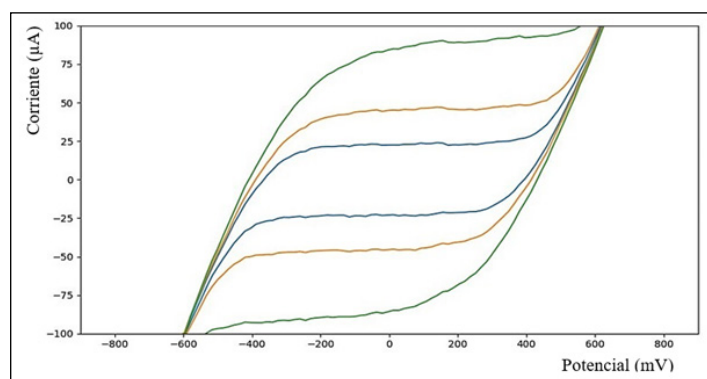


Figura 9. Ensayo de voltametría cíclica sobre celda ficticia a diferentes velocidades de barrido (VB).

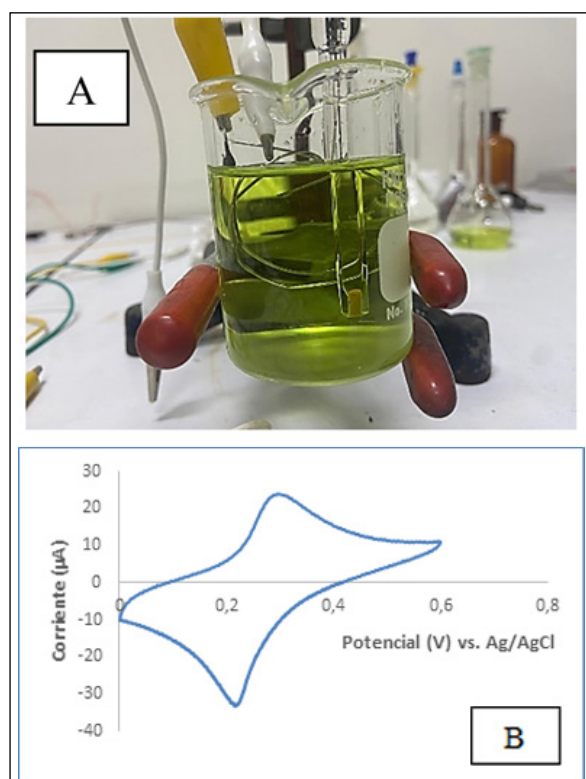


Figura 10. A: voltamograma de solución de ferro/ferricianuro de potasio 1 mM en KCl 1 M. B: celda de ferricianuro de potasio 4,8 mM con electrodo de referencia Ag/AgCl, electrodo de trabajo de platino y electrodo auxiliar de platino.

En la **figura 11** se muestran los voltamogramas cíclicos, con un solo pico, realizados con el potenciostato de 16 bits. Puede observarse en esta figura que la respuesta del equipo es la esperada para este tipo de ensayos electroquímicos [31].

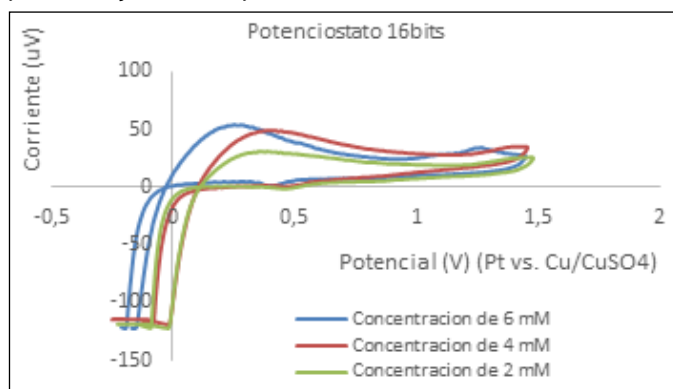


Figura 11. Voltamogramas cíclicos para ácido ascórbico (AA) a 2, 4 y 6 mM realizados con el potenciostato de 16 bits.

La reacción estudiada es la de oxidación de ácido ascórbico. El pico observado en la **figura 11** es atribuido a la oxidación del ácido. La ausencia de un pico de reducción confirma, como puede esperarse,

que se trata de un proceso irreversible [32]. Al aumentar la concentración, la intensidad de corriente del pico de oxidación en los voltamogramas cíclicos aumenta, lo cual resulta en una mayor área bajo la curva, tal como lo muestran Motahary *et al.* [33], Caretto y Braslavsky [34], y Suliborska *et al.* [35]. Por lo anterior, se puede concluir que el instrumento muestra una respuesta correcta al detectar menores valores de potencial para concentraciones más bajas.

Curvas de polarización y corrosión de acero al carbono

En la **figura 12** se presentan las curvas de polarización obtenidas al graficar V vs. log(i) para analizar el comportamiento electroquímico del acero al carbono (SAE 1010) con y sin difenilamina como inhibidor de la corrosión.

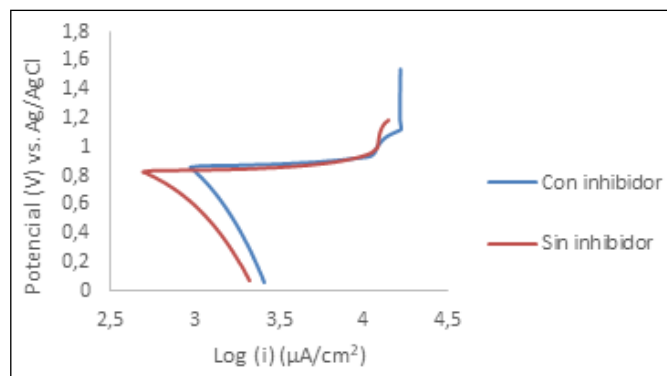


Figura 12. Curvas de polarización para la corrosión de acero al carbono en ácido sulfúrico 0,5 M con inhibidor (azul) y sin inhibidor (naranja). Potencial en V vs. Ag/AgCl (eje y) y logaritmo de la densidad de corriente (i) en μA/cm² (eje x).

Se observa un desplazamiento del potencial de corrosión hacia valores más positivos, de 0,81 a 0,83 V, en presencia del inhibidor, coincidiendo con lo reportado por Lefrou *et al.* [36] y Revie y Uhlig [37]. La mayor diferencia entre ambas curvas es la densidad de corriente catódica, la cual es menor en presencia del inhibidor, como se esperaba. Este resultado indica la alta sensibilidad y especificidad del potenciostato para estudios de corrosión electroquímica.

Cronoamperometría

La cronoamperometría es una técnica para medir la corriente que fluye a través de una celda electroquímica en función del tiempo. La **figura 13** muestra las curvas de intensidad de corriente-tiempo.

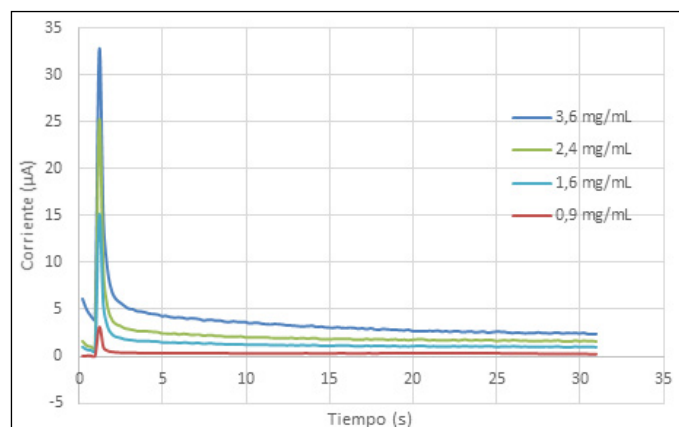


Figura 13. Gráfico de intensidad de corriente-tiempo para experimentos cronoamperométricos de mediciones de glucosa en una muestra de una bebida de cola comercial.

Para calcular la cantidad de glucosa en la solución, se elaboró una curva de calibración. En el presente estudio se utilizaron tres tiras para cada muestra de glucosa. Los valores de corriente se midieron a los 20 s y se representó el promedio de dichos valores frente a la concentración de glucosa, tal como se indica en la **figura 14**.

El potenciostato desarrollado mostró una relación lineal de 0,87 μA de corriente por cada mg/mL de aumento en la concentración de la glucosa en solución, con un coeficiente de determinación R^2 de 0,9813.

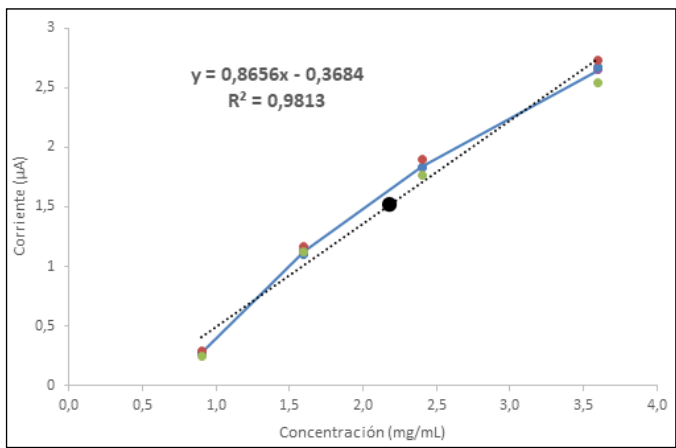


Figura 14. Curva de calibración. El punto negro representa los valores del refresco de cola.

Para corroborar los resultados obtenidos en este ensayo cronoamperométrico se tomó una muestra de una bebida de cola comercial, se diluyó 20 veces y se sometió al mismo ensayo que las soluciones de glucosa. El valor promedio de intensidad de la corriente medida a los 20 s, para el caso de la cola, fue de 1,52 µA, lo que representa, utilizando la curva de calibración de la figura 14, un valor de glucosa de 2,18 mg/mL, como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Valores obtenidos a partir del gráfico de la figura 14. Valor de referencia tomado de [38].

	Corriente (µA)	Glucosa (mg/mL)	Glucosa real (g/L)	Glucosa de referencia (g/L)	% de error (glucosa de referencia/ glucosa real)
Cola	1,52	2,18	43,56	39	12

La comparación arrojó un error del 12%, el cual es menor al error máximo (15%) establecido para medidores de glucosa aprobados por la FDA [39]. Estos errores posiblemente se deben a la variación de la temperatura o la humedad relativa, a las diferencias propias de las tiras reactivas (enzimáticas) y a la resolución del potenciostato [40].

Software

La figura 15 muestra el diagrama del software de los potenciostatos contruidos.

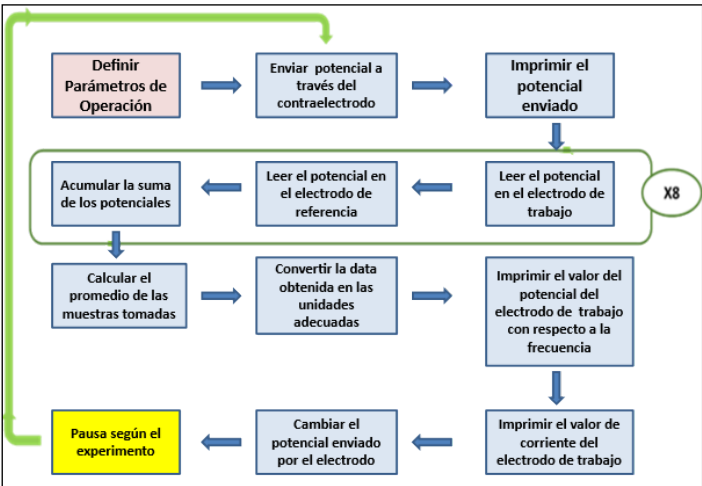


Figura 15. Esquema de funcionamiento del software de los potenciostatos contruidos.

El programa envía tensión al CE con un potencial inicial, que es registrado por el terminal de comunicaciones del entorno de desarrollo integrado (IDE) de Arduino. Un bucle se encarga de obtener el promedio de ocho muestras de tensión de los RE y WE. Después se leen los valores de potencial y corriente en ambos electrodos y se acumulan y guardan en un contador para ser divididos entre ocho. Una vez finalizado el bucle, se transforman matemáticamente am-

bos promedios a las unidades adecuadas y se guardan en el terminal en formato CSV. Para evitar deformar la señal de salida del CE, se recomienda agregar un delay si el barrido es demasiado lento o la resolución de la señal PWM no es suficiente. Luego se inicia un nuevo ciclo, ajustando el potencial según la fase del barrido. El programa de voltametría cíclica se desarrolló con el IDE de Arduino.

Análisis económico y comparación de costos

Para hacer un análisis económico y establecer una comparación de costos, se llevó a cabo un inventario de los componentes involucrados en el desarrollo del equipo. La evaluación se realizó únicamente con el último prototipo (versión 4.0) con el objeto de tener una idea clara de la inversión máxima requerida para un solo dispositivo, y considerando que en este modelo están integrados todos los componentes necesarios para su correcto funcionamiento. Los detalles del inventario necesario para la construcción del último prototipo de potenciostato se encuentran detallados en la tabla 3.

Tabla 3. Costos de producción del último prototipo de potenciostato.

Componente	Cantidad	Observación	Precio unitario (\$)	Costo total (\$)
Resistencia 10 kohm	1	Circuito RC PWM	0,2	0,2
Resistencia 100 kohm	4	OPAMP Offset SP	0,2	0,8
Resistencia 1 kohm	12	Demás OPAMP diferenciadores	0,2	2,4
Resistencia 100 ohm	1	Amplificación 1	0,2	0,2
Resistencia 50 kohm	1	Amplificación 2	0,2	0,2
Resistencia 10 kohm	1	Amplificación 3	0,2	0,2
Diodo Zener 5,1 V	2	Protección Arduino	2,0	4,0
OPAMP cuádruple LM324	2	OPAMP del circuito	2,6	5,2
Capacitor de 33 µF (PWM)	1	Circuito RC PWM	1,5	1,5
Arduino UNO	1	Controlador	10,0	10,0
Regulador de voltaje	2	Alimentación OPAMP	0,5	1,0
Resistencias de fuente	2	Alimentación OPAMP	0,2	0,4
Capacitor de fuente	2	Alimentación OPAMP	1,5	3,0
Cable jumper Arduino	6	Conexión de Arduino a circuito	0,2	1,0
Placa de cobre e impresión PCB	1	Imprimir en PCB	10,0	10,0
Caja de acrílico	1	Protección	2,0	2,0
Total				42,0

Adicionalmente se comparan, en la tabla 4, las diferentes variables que caracterizan a los potenciostatos con funciones similares encontradas en la bibliografía, incluyendo sus costos [2, 41–42] con

relación al Metrostat. La resolución ADC es la resolución del convertidor analógico a digital.

Tabla 4. Comparación de diferentes potenciostatos.

Nombre	Costo (\$)	Rango de voltaje (V)	Rango de corriente (mA)	Resolución ADC (bits)	Microcontrolador
PassStat 2.2	70	± 2,4	n/d	n/d	Teensy 3.6
PSoc-Stat	30(*)	± 2,0	0,10	12	(PSoc®) by Cypress Semiconductor
uMed **	25(**)	± 2,0	0,16	16	Atmega328 (Atmel)
DStat	120	± 1,5	10,00	24	ESP 32
CheapStat	80 - 135	± 1,0	0,05	12	XMEGA (Atmel)
Metrostat	< 50	± 2,5	1,52 µA ***	16	Arduino Uno

*Sólo el microprocesador.

** Asistido por un teléfono celular.

*** Para resistencias de transimpedancia de 100 ohm.

Resolución ADC: resolución del convertidor analógico a digital.

n/d: no disponible.

Conclusiones

Es posible construir potenciostatos de bajo costo y avanzados para investigación y docencia en el área electroquímica en la Universidad Metropolitana. Los resultados obtenidos de las pruebas con equipos y la comparación de los resultados con referencias bibliográficas, indican que se pueden comparar las versiones de 10 y 16 bits con dispositivos comerciales para garantizar la confiabilidad y fiabilidad del potenciostato construido.

El dispositivo es altamente sensible y específico para la realización de estudios de corrosión electroquímica. La resolución de 16 bits garantiza una alta precisión en las medidas. En los experimentos de corrosión se obtuvieron resultados que confirman la efectividad del inhibidor y la especificidad del potenciostato. En los estudios de oxidación de glucosa, se obtuvo un error dentro del límite aceptable según la FDA, lo que demuestra su utilidad para aplicaciones biomédicas, con margen de mejora en futuras optimizaciones.

La investigación de la tecnología existente permite conocer los diseños y componentes utilizados en la industria y seleccionar los más adecuados para construir un potenciostato de bajo costo. Por último, la selección de un prototipo de potenciostato basado en componentes de Arduino garantiza un bajo costo de producción y un mayor acceso a esta tecnología en Latinoamérica.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Decanato de Investigación y Desarrollo Académico por el financiamiento otorgado y al Departamento de Química de la Facultad de Ciencias y al Departamento de Energía y Automatización de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad Metropolitana en Caracas, Venezuela, por proporcionar las instalaciones necesarias.

Referencias

[1] M. Larios López, J. A. Gutierrez-Gnecchi, J. L. Ramírez Reyes, A. C. Téllez Anguiano y J. C. González-Hernández, "Voltage Controlled Current Source for Atmospheric Corrosion Measurements", *ECS Transactions*, vol. 36, nro. 1, pp. 159–167, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1149/1.3660609>

[2] J. Somoza, R. Bistel, S. Pavoni y J. Eirez Izquierdo, "Diseño y construcción de un sistema de medición potenciométrico", presentado en el VI Simposio Internacional de Electrónica: Diseño, Aplicaciones, Técnicas Avanzadas y Retos Actuales, La Habana, Cuba, 2018.

[3] M. D. M. Dryden y A. R. Wheeler, "DStat: A Versatile, Open-Source Potentiostat for Electroanalysis and Integration", *PLoS ONE*, vol. 10, nro. 10, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0140349>

[4] B. Segura, F. N. Jiménez y L. Giraldo, "Prototipo de potenciostato con aplicaciones en procesos electroquímicos", *Entre Ciencia e Ingeniería*, vol. 10, nro. 19, pp. 61–69, 2016. Disponible en: <https://revistas.ucp.edu.co/index.php/entrecienciaingenieria/article/view/476>

[5] J. O'M. Bockris, A. K. N. Reddy y M. Gamboa-Aldeco, *Modern Electrochemistry: Fundamentals of Electrodrics*, vol. 2A, 2.a ed., New York, Kluwer Academic Publishers, 2002.

[6] A. J. Bard, L. R. Faulkner y H. S. White, *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*, 3.ª ed. NJ, John Wiley & Sons Ltd, 2022.

[7] Arduino, "Basics of PWM (Pulse Width Modulation)", 2022. [En línea]. Disponible en: <https://docs.arduino.cc/learn/microcontrollers/analog-output>

[8] R. L. Boylestad y L. Nashelsky, *Operational Amplifiers*, NJ, Pearson Education, 2008.

[9] S. Franco, *Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits*, 4.ª ed., McGraw-Hill Education, 2014.

[10] M. Sadiku y Ch. Alexander, *Fundamentos de Circuitos Eléctricos*, 5.ª ed. McGraw-Hill/Interamericana Editores, 2013.

[11] M. A. A. Mohamed, A. M. Elmahalawy y H. M. Harb, "Developing the pulse width modulation tool (PWMT) for two timer mechanism technique in microcontrollers", en 2013 *Second International Japan-Egypt Conference on Electronics, Communications and Computers (JEC-ECC)*, pp. 148–153, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1109/JEC-ECC.2013.6766403>

[12] J. Barrero, J. Amaya, A. Acevedo, J. Acevedo, G. Gonzalez y L. Morales, "Diseño y construcción de un prototipo de potenciostato galvanostato para el laboratorio de corrosión de la escuela de ingeniería metalúrgica", *Revista UIS Ingenierías*, vol. 3, nro. 1, pp. 29–40, 2004. Disponible en: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/2273>

[13] G. N. Meloni, "Building a Microcontroller Based Potentiostat: A Inexpensive and Versatile Platform for Teaching Electrochemistry and Instrumentation", *Journal of Chemical Education*, vol. 93, nro. 7, pp. 1320. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/acs.jchemed.5b00961>

[14] J. Crespo, S. Elliot, T. Hutter y H. Águas, "Development of a low-cost Arduino-based potentiostat", *The University of Texas at Austin*, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.26153/tsw/11698>

[15] K. Krorakai, S. Klangphukhiew, S. Kulchat y R. Patramanon, "Smartphone-Based NFC Potentiostat for Wireless Electrochemical Sensing", *Applied Sciences*, vol. 11, p. 392, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11010392>

[16] M. Alfaro y I. Alfaro, "Construcción de un potenciostato de bajo costo para estudios de inhibición de corrosión de acero: determinación del potencial de corrosión y mediciones cronoamperométricas", *Educación Química*, vol. 28, nro. 4, pp. 269–274, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eq.2017.05.006>

[17] A. Ramos y A. Hernández, "Un equipo de electroanálisis base Arduino y su uso en laboratorios de bajo costo", *Educación Química*, vol. 33, nro. 4, pp. 14–26, 2022. DOI: <https://doi.org/10.22201/10.22201/fq.18708404e.2022.4.0>

[18] R. M. D. P. K. Rathnayaka, D. D. C. Wanniarachchi, C. H. Manathunga, R. A. D. D. Dharmasiri y W. K. I. L. Wanniarachchi, "Edu-PotStat: Construction and testing of a low cost potentiostat", *Journal Of Applied Physics (IOSR-JAP)*, vol. 12, nro. 5, pp. 10-18, 2020. Disponible en: <https://repositories.lib.utexas.edu/items/e1539eb4-de9c-4ff0-a643-91a1160bd9da>

- [19] A. W. Colburn, K. J. Levey, D. O'Hare y J. V. Macpherson, "Lifting the lid on the potentiostat: a beginner's guide to understanding electrochemical circuitry and practical operation", *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. 23, nro. 14, pp. 8100–8117, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1039/D1CP00661D>
- [20] S. Eberlein y O. Vázquez, "Amplificador Operacional IDEAL (Edición 2017.1)", en A-15 - Dispositivos y Circuitos Electrónicos II, Rosario, Escuela de Ingeniería Electrónica, Universidad Nacional de Rosario Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, 2017. Disponible en: [https://www.fceia.unr.edu.ar/dce2/Files/Apuntes/AO%20IDEAL%20-%20Notas%20de%20Clase%20\(v-2017-1\).pdf](https://www.fceia.unr.edu.ar/dce2/Files/Apuntes/AO%20IDEAL%20-%20Notas%20de%20Clase%20(v-2017-1).pdf)
- [21] J. M. Drake Moyano, "Modelo del amplificador operacional real", en *Instrumentación Electrónica de Comunicaciones (5º Curso Ingeniería de Telecomunicación)*, Tema II, Santander, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, Universidad de Cantabria, 2005. Disponible en: https://www.ctr.unican.es/asignaturas/instrumentacion_5_it/iec_2.pdf
- [22] A. T. Ortega, L. Barrantes, B. D. Casallas y N. Cortés, "Aplicación de inhibidores verdes para el control de la corrosión en metales. revisión", *DYNA*, vol. 88, nro. 217, pp. 160–168, 2021. DOI: <https://doi.org/10.15446/dyna.v88n217.93871>
- [23] H. Ashassi-Sorkhabi, B. Shaabani y D. Seifzadeh, "Corrosion inhibition of mild steel by some Schiff base compounds in hydrochloric acid", *Applied Surface Science*, vol. 239, nro. 2, pp. 154–164, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apusc.2004.05.143>
- [24] N. Barc'h, J. M. Grossel, P. Looten y M. Mathlouthi, "Kinetic study of the mutarotation of D-glucose in concentrated aqueous solution by gas-liquid chromatography", *Food Chemistry*, vol. 74, pp. 119–124, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(01\)00139-X](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(01)00139-X)
- [25] J. Gonzalo-Ruiz, M. A. Alonso-Lomillo y F. J. Muñoz, "Screen-printed biosensors for glucose determination in grape juice", *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 22, nro. 7, pp. 1517–1521, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bios.2006.07.020>
- [26] T. Soranzo et al., "Electrochemical biosensing of glucose based on the enzymatic reduction of glucose", *Sensors*, vol. 22, nro. 19, p. 7105, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22197105>
- [27] J. M. Hobbs, N. N. Patel, D. W. Kim, J. K. Rugutt y A. K. Wane-kaya, "Glucose determination in beverages using carbon nanotube modified biosensor: An experiment for the undergraduate laboratory", *Journal of Chemical Education*, vol. 90, nro. 9, pp. 1222–1226, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1021/ed300429a>
- [28] J. J. Gooding, W. Yang y M. Situmorang, "Bioanalytical experiments for the undergraduate laboratory: Monitoring glucose in sports drinks", *Journal of Chemical Education*, vol. 78, nro. 8, p. 788, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1021/ed078p788>
- [29] O. Amor-Gutiérrez, E. Costa-Rama y M. T. Fernández Abedul, "Determination of glucose with an enzymatic paper-based sensor", in *Laboratory Methods in Dynamic Electroanalysis*, Ed. Elsevier, 2020, pp. 257–265. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815932-3.00025-5>
- [30] R. G. Compton y C. E. Banks, *Understanding Voltammetry*, 3.ª ed., World Scientific Publishing Company, 2018.
- [31] C. H. Hamann, A. Hamnett y W. Vielstich, *Electrochemistry*, Wiley, 2007.
- [32] A. M. Pisoschi, A. F. Danet y S. Kalinowski, "Ascorbic Acid Determination in Commercial Fruit Juice Samples by Cyclic Voltammetry", *Journal of Automated Methods and Management in Chemistry*, pp. 1–8, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1155/2008/937651>
- [33] M. Motahary, S. M. Ghoreishi, M. Behpour y M. Salavati-Niasari, "Electrochemical determination of ascorbic acid at the surface of a graphite electrode modified with multi-walled carbon nanotubes/tetradecyltrimethylammonium bromide", *Journal of Applied Electrochemistry*, vol. 40, nro. 4, pp. 841–847, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10800-009-0067-0>
- [34] M. A. Caretto y S. A. Braslavsky, *Theoretical and Applied Aspects of Bioinorganic Chemistry*, Springer, 1986.
- [35] K. Suliborska, M. Baranowska, A. Bartoszek, W. Chrzanowski y J. Namieśnik, "Determination of Antioxidant Activity of Vitamin C by Voltammetric Methods", *Proceedings*, vol. 11, nro. 1, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/proceedings2019011023>
- [36] C. Lefrou, R. P. Nogueira, F. Huet y H. Takenouti, "Electrochemistry", *Shreir's Corrosion*, vol. 1, pp. 13–51, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52787-5.00003-2>
- [37] R. W. Revie y H. H. Uhlig, *Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering*, John Wiley & Sons, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470277270>
- [38] E. E. Ventura, J. N. Davis y M. I. Goran, "Sugar content of popular sweetened beverages based on objective laboratory analysis: focus on fructose content", *Obesity*, vol. 19, nro. 4, pp. 868–874, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1038/oby.2010.255>
- [39] Food and Drug Administration, "Self-Monitoring Blood Glucose Test Systems for Over-the-Counter Use; Guidance for Industry and Food and Drug Administration Staff", 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.fda.gov/downloads/medicaldevices/deviceregulationandguidance/guidancedocuments/ucm380327.pdf>
- [40] A. M. Silva, E. C. da Silva y C. O. da Silva, "A theoretical study of glucose mutarotation in aqueous solution", *Carbohydrate Research*, vol. 341, nro. 8, pp. 1029–1040, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carres.2006.02.035>
- [41] P. Lopin y K. V. Lopin, "PSoC-Stat: A single chip open source potentiostat based on a Programmable System on a Chip", *PLoS ONE*, vol. 13, nro. 7, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201353>
- [42] I. Anshori et al., "ESPotensio: A Low-Cost and Portable Potentiostat With Multi-Channel and Multi-Analysis Electrochemical Measurements". *IEEE Access*, vol. 10, pp. 112578–112593, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3213725>

Citación del artículo:

J. C. Calderon Araujo, J. M. Barriola Damborenea, N. Conforti de Pérez, R. M. Rodríguez Bengoechea, R. Réquiza Cordero y M. M. Pérez Hernández, "Metrostat: desarrollo de potencióstato asequible con Arduino para experimentos electroquímicos", *Rev. Colomb. Quim.*, vol. 53, nro. 1, pp. 37–44, 2024. DOI: <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v53n1.115961>



Analysis of the presence of microplastics in different brands of bottled water in region 6 - Ecuador

Abstract

Due to the excessive use of plastics in the human food chain, the aim of this investigation was to evaluate the presence of microplastics in bottled water in region 6 of Ecuador. For this purpose, 72 samples from four different brands of bottled water were analyzed, various plastic particles (fibers and fragments) were found, which were subsequently confirmed through FTIR (Fourier-transform infrared spectroscopy). A full range of fragment sizes, from 4.4 to 248.29 μm , and fiber sizes, from 102.64 to 840.20 μm , were identified, which were classified as secondary microplastics. A statistical analysis was conducted to determine the means of fibers and fragments found in each brand and it was established that brand B had the highest quantity of microplastics, with an average of 233.1 particles per liter. Finally, polyethylene was identified as the most recurrent type of particle detected by FTIR, suggesting that the bottles themselves may be a source of contamination.

Keywords: bottled water; FTIR; microplastics; polyethylene.

Análisis de la presencia de microplásticos en diferentes marcas de agua embotellada en la región 6 - Ecuador

Resumen

Debido al uso excesivo de plásticos en la cadena alimenticia humana, el objetivo de esta investigación fue evaluar la presencia de microplásticos en agua embotellada en la región 6 de Ecuador. Para ello, se analizaron 72 muestras de cuatro marcas diferentes de agua embotellada, se encontraron diversas partículas plásticas (fibras y fragmentos), las cuales fueron confirmadas mediante FTIR (espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier). Se identificó un rango completo de tamaños de fragmentos, de 4,4 a 248,29 μm , y de fibras, de 102,64 a 840,20 μm , que se clasificaron como microplásticos secundarios. Se realizó un análisis estadístico de los promedios de fibras y fragmentos encontrados en cada marca y se estableció que la marca B contenía una mayor cantidad de microplásticos, con un promedio de 233,1 partículas por litro. Finalmente, se identificó el polietileno como el tipo de partícula más recurrente detectada por FTIR, lo cual sugiere que las botellas pueden ser una fuente de contaminación.

Palabras clave: agua embotellada; FTIR; microplásticos; polietileno.

Análise da presença de microplásticos em diferentes marcas de água engarrafada na região 6 - Equador

Resumo

Atribuível ao uso excessivo de plásticos na cadeia alimentar humana, o objetivo desta investigação foi avaliar a presença de microplásticos em água engarrafada na região 6 do Equador. Para isso, foram analisadas 72 amostras de quatro marcas diferentes de água engarrafada, e foram encontradas várias partículas plásticas (fibras e fragmentos), que foram posteriormente confirmadas através da FTIR (espectroscopia infravermelho por transformada de Fourier). Um intervalo completo de tamanhos de fragmentos, de 4,4 a 248,29 μm , e de tamanhos de fibras, de 102,64 a 840,20 μm , foram identificados e classificados como microplásticos secundários. Uma análise estatística foi realizada para determinar as médias de fibras e fragmentos encontrados em cada marca, estabelecendo que a marca B continha a maior quantidade de microplásticos, com uma média de 233,1 partículas por litro. Finalmente, o polietileno foi identificado como o tipo mais recorrente de partícula detectada pelo FTIR, sugerindo que as próprias garrafas podem ser uma fonte de contaminação.

Palavras-chave: água engarrafada; FTIR; microplásticos; polietileno.

Introduction

In recent years, plastics have aggressively irrupted into the food chain, impacting both human life cycles and ecosystems. The global demand for plastics has increased due to their physicochemical properties and low production costs, making them almost irreplaceable in the manufacturing of domestic and industrial goods [1]. Microplastics, solid particles ranging from 20 μm to 5 mm in diameter, accumulate in the environment and can be primary or secondary [2]. Primary microplastics, ranging from 5 to 1 mm, are used in the manufacture of industrial pellets and personal care products, while secondary microplastics, ranging from 1 mm to 20 μm , are generated by the fragmentation of plastics through photo-oxidative and mechanical processes.

Many microplastics arise from the decomposition of bulky plastics such as polyethylene (from bags and bottles), polystyrene (from food containers), nylon, polypropylene (from fabrics), and polyvinyl chloride (from pipes) [3]. Polyethylene, in particular, has been demonstrated to negatively impact human health due to its ability to release toxic chemicals. These substances, when ingested or absorbed over time, can interfere with the body's natural processes, potentially leading to disruptions in the endocrine system and impairments in immune function. Prolonged exposure to these chemicals raises concerns about their cumulative effects, as they may contribute to hormonal imbalances and weakened defense mechanisms, posing significant risks to overall health [4]. These particles have become ubiquitous, found everywhere from the deepest parts of the ocean, such as the Mariana Trench, to the highest peaks like Mount Everest, and even in the food we consume every day [5]. Despite South America being the region that produces the least amount of plastic, it ranks third, after Asia and Africa, in the amount of plastic that ends up in the ocean via rivers [6].

Microplastics are present in oceans and continental habitats, affecting marine animals and products such as sugar, salt, beer, and milk, as well as sources of drinking water [7]. These particles can act as disease vectors, impacting the health of terrestrial animals and soil, acquiring harmful properties as they degrade [8]. Fish, the most studied marine animals regarding microplastic ingestion, suffer from malnutrition, starvation, and population decline due to impacts on their reproduction [9].

The presence and impact of microplastics in aquatic environments is an emerging global issue. Although research on this topic is more advanced in marine environments, it has only recently begun to be studied in continental waters and those intended for human consumption. Current efforts focus on reducing primary production of microplastics by regulating their use in the manufacture of other products. However, the greatest challenge remains managing microplastics generated from the degradation of existing plastics in water. In response to this issue, legislation has begun to limit the use of single-use plastics [10].

Microplastics may contain toxic substances such as bisphenol A, phthalates, and heavy metals, which are risky if ingested [11]. These particles can introduce harmful elements into the food chain, leading to unpredictable ecological effects due to bioaccumulation and biomagnification [12]. Exposure can occur through ingestion of contaminated food and water, or inhalation of airborne particles [13]. Since water is essential for life, its contamination with microplastics raises concerns about long-term toxic effects on human health [14].

Several detection techniques have been successfully applied in research on microplastics. These include Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), which allows the identification and character-

ization of microplastics by measuring the absorption of different wavelengths, and fluorescence microscopy, which is useful for detecting microplastics in complex samples such as water and food. These techniques are crucial for the accurate identification of microplastics and their characterization, enhancing our understanding of their presence and the potential risks they pose to human health and the environment.

This study aims to investigate the presence of microplastics in bottled water in region 6, Ecuador, and to increase awareness and understanding of the potential health and environmental risks associated with plastic pollution.

Materials and methods

Sample preparation

Different water samples (around 18 per brand) were collected from the most commercial areas of Azuay, Cañar and Morona Santiago, 500 mL of each sample were taken and heated to 60 °C in a water bath to improve their fluidity characteristics during the process. After this process, the samples were filtered through a 90 μm stainless steel sieve. The names of the brands have been replaced with A, B, C, and D to avoid issues with their privacy policies.

Oxidation

The residue from the 90 μm stainless steel sieve was rinsed with 500 mL of type I water before being placed in a glass container and treated with 50 mL of 30% hydrogen peroxide. The filtrate was placed in a 1000 mL Erlenmeyer flask with 50 mL of 30% hydrogen peroxide. Both containers were left to stand at room temperature for 72 h.

Vacuum microfiltration

After 72 h, the oxidized material was filtered through a polytetrafluoroethylene (PTFE) membrane with a pore size of 1 μm and a diameter of 47 mm. It was then left to dry at room temperature for 24 h.

Observation under inverted microscope and identification of microplastic profile

The PTFE membrane filter was placed between two glass slides, and the presence of microplastics was observed using a 10X lens [18]. Through the NIS image analysis program, the lengths and shapes of the fragments and fibers observed under the inverted microscope were recorded [19]. The identification of microplastic profile was carried out using the FTIR equipment with the attenuated total reflectance (ATR) analyzer, identifying the type of microplastics through the OMNIC Spectra software.

Statistical analysis

To improve the accuracy and clarity of the results, Excel and R were used, enabling the creation of tables, graphs, and the execution of relevant hypothesis tests adjusted to the specific context of this study.

Results and discussion

Determination of the size of observed particles

The dimensions of the observed particles were then determined. Using an inverted microscope with a 10x magnification, plastic particles, fragments, and fibers were observed. With the aid of the NIS image analysis software, the dimensions were obtained as shown in figures 1 and 2.

With the measured dimensions and the dispersion of the particles, the range was calculated to indicate the interval between the maximum and minimum values of the samples. The values should be between 1 and 250 μm [20].

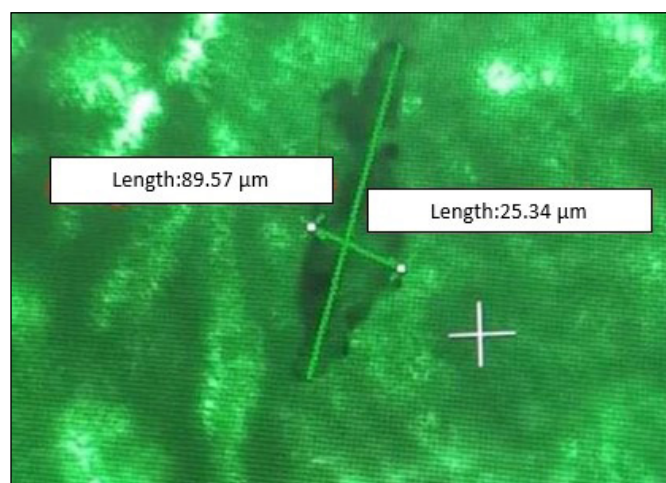


Figure 1. Measurement of a microplastic fiber using an inverted microscope (10× magnification). The fiber dimensions were obtained with NIS image analysis software. The sample was analyzed under fluorescence illumination.



Figure 2. Dimension of a microplastic fragment using an inverted microscope (10× magnification). The fragment dimensions were obtained with NIS image analysis software. The sample was analyzed under fluorescence illumination.

Table 1 shows four brands of bottled water along with the size of the fibers and fragments found. The size of the fragment ranges from 4.4 to 248.29 μm , confirming that they fall within the specified range (1 to 250 μm). Conversely, a specific range for fibers was not determined due to their variable length and thickness of a few microns. However, they are considered microplastics because they are smaller than 5 mm [21].

In a study, three liters of bottled mineral water were analyzed, revealing synthetic fibers ranging from 1 μm to 5 mm [22]. In contrast, the samples from the brands studied in the present research contained fibers ranging from 102.64 to 840.20 μm , concluding that they fall within the established range (< 5 mm) as in other studies [21].

Table 1. Size distribution range of microparticles found.

Bottled water brands				
Polymers found	A	B	C	D
Fibers (μm)	102.64 – 840.20	192.00 – 800.06	136.47 – 830.50	274.53 – 829.06
Fragments (μm)	4.50 – 131.60	10.36 – 146.87	4.40 – 248.29	6.03 – 240.05

During the research process, the statistical technique analysis of variance (ANOVA) was performed to determine which brand of bottled water contains the highest amount of microplastics (**table 2**). The obtained p -value is less than 0.05, thus rejecting the null hypothesis.

Table 2. Analysis of variance of bottled water brands.

	GL	Sum Sq	Mean Sq	F value	P value
Factor	3	390974	130325	72,86	0,000
Error	68	121636	17789		
Total	71	512611			

Consequently, the Tukey method was applied to identify which of the four brands behaves similarly or differently. After comparing the samples of each brand using the Tukey method, three groups were identified based on the means as shown in **table 3**. Group 1 includes brand B. Group 2 consists of brand A and C. Finally, group 3 includes brand A and D. The means that do not share a letter are significantly different, indicating considerable variability between brands.

Table 3. Comparison of the samples from each brand using the Tukey method.

	Brand A	Brand B	Brand C	Brand D
Mean	70.78	233.10	95.00	40.61
		G1		
Groups	G2		G2	
	G3			G3

G1: group 1. G2: group 2. G3: group 3.

Upon analyzing the samples from the four brands of bottled water in region 6, it was concluded that 100% of the samples contain microplastic particles, averaging 12.2 particles per liter of water. This finding indicates a ubiquitous presence of microplastics in bottled water within this region.

Comparatively, the study reported by Mason *et al.* [23] analyzed eleven brands of bottled water worldwide and found that 93% of the samples contained microplastics, with an average of 10.4 particles per liter of water. The results from our research, therefore, show a higher average of plastic particles per liter of water compared to the global study.

This discrepancy may be attributed to factors such as differences in the manufacturing processes, bottle materials, and environmental conditions. The higher average of plastic particles in our study suggests that bottled water in region 6 may be more susceptible to microplastic contamination.

The high prevalence of polyethylene (PE) observed in our samples (shown in the next section) suggests that local manufacturing practices may have a significant role in microplastic contamination. PE is a common material for bottled water packaging, and it can degrade or shed microplastics during production, filling, sealing, and transportation [24]. Variations in manufacturing standards or machinery quality between regions may lead to higher rates of plastic particle release in bottled water from region 6. In addition, the specific types of plastic and additives used in bottles may also influence microplastic prevalence. Some plastic additives can accelerate degradation of plastic, increasing particle shedding. Region variations in regulations around plastic manufacturing could contribute to these differences.

Moreover, this region is subject to unique environmental pressures that could contribute to increased microplastic levels. For example, higher temperatures and UV radiation levels could accelerate polymer degradation in the bottles during storage and distribution, particularly if stored in open or unshaded conditions [25]. Further investigation into manufacturing protocols and environmental exposure in region 6 could provide more insights into the sources and mechanisms of microplastic release in bottled water.

Identification of microplastic profile using FTIR

After observing the samples from each brand through the inverted microscope, particles larger than 130 µm were identified and characterized, as FTIR analysis is not suitable for particles smaller than this size because it may face challenges in detecting extremely small particles due to its limited spatial resolution and the efficiency of infrared light scattering [26]. The PTFE membrane composition was determined through the emitted spectrum, followed by spectral subtraction. Using the OMNIC software, the samples from the analyzed brands produced a spectrum different from that of the filter. These results were compared with the library in the OMNIC Spectra software, leading to the identification of various types of polymers as shown in **figure 3**.

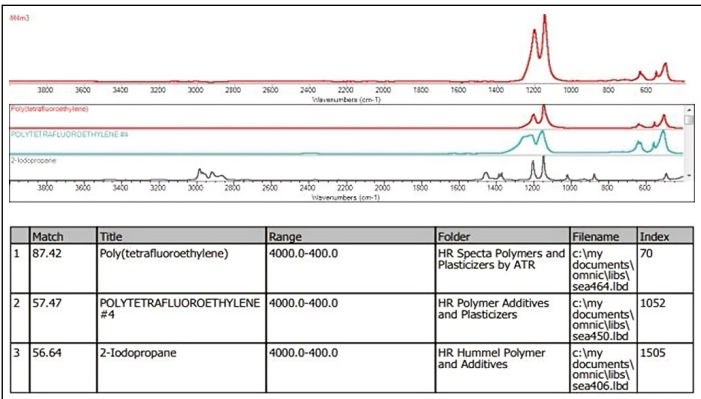


Figure 3. Spectrum search results from one particle found in sample 3 – Brand D.

In addition to **figure 3**, which serves as an illustrative example of the analysis process, the full data across all samples is provided in **table 4**. This table provides a comprehensive overview of the microplastic measurements obtained from each bottled water brand. Approximately four particles from each sample were analyzed, and it can be observed that PE is the most present polymer in all brands.

Table 4. Percentage of polymers found in different brands of bottled water.

Bottled water brands				
Polymers found	A	B	C	D
Polyethylene	69.40	89.60	60.00	81.70
High density polyethylene			30.30	
Polypropylene		10.40		18.30
Polyamide			9.70	
Cellophane	20.83			
Nylon	9.77			

According to Zhou *et al.* [27], in the analysis of 23 brands of bottled water they identified the presence of various polymers, cellulose and polyamide were the most prevalent polymers found. In contrast, our research, as shown in **table 4**, indicates that PE is the most likely polymer present in bottled water samples, with a detection range of 60.0 to 89.6%. This significant presence of PE suggests that a substantial portion of the microplastics detected in the water may originate from the degradation or shedding of the bottle material itself. PE's prevalence highlights potential contamination sources from bottle materials, supporting the hypothesis that manufacturing practices significantly contribute to microplastic contamination in bottled water.

This discrepancy between our findings and those of other studies highlights the variability in polymer prevalence across different studies and geographic locations. The predominance of PE in our analysis aligns with the common use of this polymer in the production of

plastic bottles that are distributed in the region, further supporting the hypothesis that bottle material is a primary source of microplastic contamination.

Conclusions

Microparticles are present in all brands of bottled water, appearing as both fragments and fibers. This finding underscores a significant concern regarding the purity and safety of bottled drinking water, highlighting the pervasive issue of microplastic pollution. The particle sizes determined using the inverted microscope and the NIS image analysis program showed that the fragments ranged from 4.40 to 248.29 µm, falling within the established range from 1 to 250 µm. This confirms the presence of microplastics within the expected size range.

Of the brands analyzed, brand B had the highest quantity of particles, fibers, and fragments, with an average of 233.1 particles per liter of water. In stark contrast, brand D had the lowest quantity, with an average of 40.61 particles per liter of water. This significant disparity highlights the variability in contamination levels across different brands of bottled water, pointing to inconsistencies in manufacturing practices and quality control measures.

Furthermore, the FTIR analysis identified PE as the most likely type of microplastic present in the bottled water samples from all four brands. This suggests that PE, a common secondary plastic, is a major contaminant, potentially originating from the decomposition of the bottle material itself. This finding is particularly alarming as it indicates that the very containers meant to provide safe drinking water are a source of pollution. PE has been shown to have adverse effects on human health, as it can release harmful chemicals into the body, potentially disrupting endocrine and immune functions when ingested over time.

Overall, the research hypothesis is confirmed: microplastics are indeed present in bottled water in region 6 of Ecuador. This finding highlights the necessity for stricter quality control and regulatory measures to ensure the safety and purity of bottled water. The presence of microplastics implies potential health risks, so addressing this issue is crucial for protecting consumer health, and immediate action is required to mitigate the impact of microplastic pollution on our water supply.

In addition to the findings, it is crucial to highlight the urgent need to review and modify manufacturing practices in the bottled water industry. A transition towards more sustainable production methods must be implemented, reducing the release of microplastics and other contaminants in the final products. This call to action aims to promote more responsible policies and practices in the manufacturing of consumer goods, in order to protect both public health and the environment.

References

[1] A. Koelmans, N. Mohamen Nor, E. Hermesen, M. Kooi, S. Mintenig and J. de France, "Microplastics in freshwaters and drinking water: Critical review and assessment of data quality", *Water Research*, vol. 155, pp. 410–422, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.02.054>

[2] A. Lusher, M. McHugh and R. Thompson, "Occurrence of microplastics in the gastrointestinal tract of pelagic and demersal fish from the English Channel", *Marine Pollution Bulletin*, vol. 67, no. 1–2, pp. 94–99, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.11.028>

[3] B. E. Obmann, G. Sarau, H. Holtmannspötter, M. Pischetsrieder, S. H. Christiansen and W. Dicke, "Small-sized microplastics and pigmented particles in bottled mineral water", *Water Research*, vol. 141, pp. 307–316, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.027>

- [4] L. Parker, "¿Qué daños producen los microplásticos para el ser humano?", National Geographic, 2022. [Online]. Available: <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2022/04/danos-producen-microplasticos-salud-personas>.
- [5] A. Cruz, A. Vázquez and J. Álvarez, "Microplásticos en playas: realidad y percepción", *Ciencia*, vol. 73, no. 2, pp. 36–41, 2022. Available: https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/73_2/PDF/07_73_2_1435_ResiduosSolidos.pdf
- [6] G. Castañeta, A. Gutiérrez, F. Nacaratte and C. Manzano, "Microplastics: a contaminant that grows in all environmental areas, its characteristics and possible risks to public health from exposure", *Revista Boliviana de Química*, vol. 37, no. 3, 2020. DOI: <https://doi.org/10.34098/2078-3949.37.3.4>
- [7] R. Sarria and J. Gallo, "La gran problemática ambiental de los residuos plásticos: Microplásticos", *Journal de Ciencia e Ingeniería*, vol. 8, no. 1, pp. 21–27, 2016. Available: <https://jci.uniautoma.edu.co/2016/2016-3.pdf>
- [8] R. Pazos, T. Maiztegui, D. Colautti, A. Paracampo and N. Gomez, "Microplastics in gut contents of coastal freshwater fish from Río de la Plata estuary", *Marine Pollution Bulletin*, vol. 122, no. 1–2, pp. 85–90, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.06.007>
- [9] G. Acosta, D. Carrillo and A. Caballero, "Microplásticos en agua y en organismos", *Ciencia*, vol. 73, no. 2, pp. 14–21, 2022. Available: <https://shorturl.at/8hCML>
- [10] C. Bollain and D. Agulló, "Presencia de microplásticos en aguas y su potencial impacto en la salud pública", *Revista Española de Salud Pública*, no. 93, 2020. Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=17066277062>
- [11] M. Beltrán and A. Marcilla, *Tecnología de polímeros. Procesado y propiedades*, Universidad de Alicante, 2012.
- [12] A. Herrera, P. Polania, C. Otálora and P. Tigreros, "Distribución espacial y temporal de microplásticos flotantes en aguas del Caribe central colombiano", *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, vol. 46, no. 179, 2023. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.12010/32123>
- [13] F. Perilla and J. Quiroz, "Microplásticos, una amenaza invisible para la salud humana y ambiente", *Revista Cubana de Salud Pública*, vol. 49, no. 4, 2024. Available: <https://revsaludpublica.sld.cu/index.php/spu/article/view/18019>
- [14] J. Donoso, "Cuantificación de la presencia de microplástico en la cuenca alta del Río Guayllabamba", Universidad de las Américas, tesis de grado, Universidad de las Américas, 2018.
- [15] K. Cox, G. Covernton, H. Davies, J. Dower, F. Juanes and S. Dudas, "Human Consumption of Microplastics", *Environmental Science & Technology*, vol. 53, no. 12, pp. 7068–7074, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01517>
- [16] S. Chandra and K. Walsh, "Microplastics in water: Occurrence, fate and removal", *Journal of contaminant hydrology*, vol. 264, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2024.104360>
- [17] N. Hirt and M. Body-Malapel, "Immunotoxicity and intestinal effects of nano- and microplastics: a review of the literature", *Part Fibre Toxicol*, vol. 17, no. 1, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12989-020-00387-7>
- [18] L. Sierra, M. Chialanza, R. Faccio, D. Carrizo, L. Fornaro and A. Perez, "Identification of microplastics in wastewater samples by means of polarized light optical microscopy", *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 27, no. 7, pp. 7409–7419, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07011-y>
- [19] J. Flores and K. Orozco, "Evaluación de la presencia de microplásticos en agua embotellada en la regional 6", tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana, 2022.
- [20] V. Shruti, F. Perez and G. Kutralam, "Metro station free drinking water fountain– A potential "microplastics hotspot" for human consumption", *Environmental Pollution*, vol. 216, p. 114227, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114227>
- [21] J. Ding et al., "Separation and Identification of Microplastics in Digestive System of Bivalves", *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, vol. 46, no. 5, pp. 690–697, 2018. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1872-2040\(18\)61086-2](https://doi.org/10.1016/S1872-2040(18)61086-2)
- [22] A. Wiesheu, P. Anger, T. Baumann, R. Niessner and N. Ivleva, "Raman microspectroscopic analysis of fibers in beverages", *Analytical Methods*, vol. 8, no. 28, pp. 5722–5725, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1039/C6AY01184E>
- [23] S. Mason, V. Welch and J. Neratko, "Synthetic Polymer Contamination in Bottled Water", *Frontiers in Chemistry*, vol. 6, p. 407, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00407>
- [24] CIEL, *Plastic & Health: The Hidden Costs of a Plastic Planet*, Broad Reach Fund of the Maine Community Foundation, 2019.
- [25] Mexpolimeros, "Degradación de los polímeros", 2021. [Online]. Available: <https://www.mexpolimeros.com/poly/degradaci%C3%B3n.html>
- [26] P. Arévalo, V. Orellana, P. Brito and X. Cajamarca, "Influence of Geographic Separation Between Urban Centers and Microplastic Burden on Bees (*Apis mellifera*)", *One Ecosystem*, vol. 9, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3897/oneeco.9.e127698>
- [27] X. Zhou, J. Wang, H. Li, H. Zhang, J. Hua-Jiang and D. Zhang, "Microplastic pollution of bottled water in China", *Journal of Water Process Engineering*, vol. 40, p. 101884, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101884>

Citación del artículo:

P. W. Arévalo Moscoso, X. J. Cajamarca Rivadeneira, K. G. Orozco Gualoto, J. E. Flores Calle and P. G. Brito Lopez, "Analysis of the presence of microplastics in different brands of bottled water in region 6 - Ecuador", *Rev. Colomb. Quim.*, vol. 53, no. 1, pp. 45–49, 2024. DOI: <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v53n1.116512>