



TECNOLOGÍA *en marcha*

Revista trimestral
Abril-Junio 2021
Volumen 34 N° 2
ISSN 0379-3982 / ISSN-E 2215-3241



TEC | Tecnológico
de Costa Rica

Publicación y directorio en catálogos





Comisión Editorial

Alexa Ramírez Vega. Directora.
Instituto Tecnológico de Costa Rica

Juan Antonio Aguilar Garib
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Universidad Autónoma de Nuevo León.
México

Carlos Andrés Arredondo Orozco
Facultad de Ingenierías
Universidad de Medellín. Colombia

Lars Köhler
Experimenteller Botanischer Garten
Georg-August-Universität Göttingen.
Alemania

Jorge Solano Jiménez
Instituto Costarricense del Cemento
y del Concreto

Edición técnica

Alexa Ramírez Vega

Revisión filológica

Esperanza Buitrago Poveda

Diseño gráfico

Felipe Abarca Fedullo

Diagramación

Alexa Ramírez Vega

Diseño de cubierta

Felipe Abarca Fedullo

Imagen de cubierta

Felipe Abarca Fedullo

Datos de catalogación en publicación

Tecnología en Marcha / Editorial Tecnológica
de Costa Rica. - Vol. 34-2, Abril-Junio (2021)
-Cartago: la Editorial, 2021 - Trimestral
ISSN-E 2215-3241

1. Ciencia y Tecnología –
Publicaciones periódicas CDD:600



Apdo 159-7050 Cartago, Costa Rica
Tel.:(506) 2550-2297, 2550-2618
Correo electrónico: editorial@itcr.ac.cr
Web: editorial.tec.ac.cr
http://revistas.tec.ac.cr/tec_marcha



La Editorial Tecnológica de Costa Rica es una dependencia especializada del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Desde su creación, en 1978, se ha dedicado a la edición y publicación de obras en ciencia y tecnología. Las obras que se han editado abarcan distintos ámbitos respondiendo a la orientación general de la Institución.

Hasta el momento se han editado obras que abarcan distintos campos del conocimiento científico-tecnológico y han constituido aportes para los diferentes sectores de la comunidad nacional e internacional.

La principal motivación de la Editorial es recoger y difundir los conocimientos relevantes en ciencia y tecnología, llevándolos a los sectores de la comunidad que los requieren.

La revista *Tecnología en Marcha* es publicada por la Editorial Tecnológica de Costa Rica, con periodicidad trimestral. Su principal temática es la difusión de resultados de investigación en áreas de Ingeniería. El contenido de la revista está dirigido a investigadores, especialistas, docentes y estudiantes universitarios de todo el mundo.

Publicación y directorio en catálogos



TECNOLOGÍA *en marcha*

Contenidos

Materiales alternativos como oportunidad de reducción de impactos ambientales en el sector construcción

Alternative materials as an opportunity to reduce environmental impacts in the construction sector

María Fernanda Hernández-Zamora, Sebastián Jiménez-Martínez,

Juan Ignacio Sánchez-Monge 3

Manejo ambiental de residuos orgánicos: Estado del arte de la generación de compostaje a partir de residuos sólidos provenientes de sistemas de trampas de grasa y aceite

Environmental management of organic waste: State of the art of composting generation from solid waste of the grease and oil trap systems

Yuliana González-Jiménez, Josué Villalobos-Morales 11

Evaluación del desempeño en seguridad laboral en proyectos de construcción del Banco Mundial: caso TEC Costa Rica

Evaluation of work safety performance in World Bank construction projects: case TEC Costa Rica

Gabriela Hernández-Gómez, Gabriela Morales-Martínez, María G. Rodríguez-Zamora 23

Aplicación del valor de tono de color directo para el control cromático del proceso de recubrimiento de tabletas farmacéuticas

Application of the spot color tone value at pharmaceutical tablet coating process control

Mac Arturo Murillo-Fernández, Ernesto Montero-Zeledón, Dionisio Gutiérrez-Fallas, Manuel Melgosa-

Latorre, Jorge Pacheco-Molina 37

Potencial biotecnológico de los hongos marinos en las zonas costeras de Costa Rica

Biotechnological potential of marine fungi in coastal areas of Costa Rica

Stephannie Masís-Ramos, Paola Meléndez-Navarro, Erika Méndez-Rodríguez 48

Metodología para la inclusión de criterios ambientales en las compras públicas: Caso de estudio Instituto Tecnológico de Costa Rica

Methodology for the inclusion of environmental criteria in public procurement: Case study Instituto Tecnológico de Costa Rica

Juan José Gamboa-Castro, Teresa Salazar-Rojas 60

Impacto ambiental de diferentes sectores productivos de Costa Rica

Environmental impact of different productive sectors of Costa Rica

Kelvin Arce-Villalobos, Alejandro Arias-Castro, Karina Hernández-Ugalde, José Carlos Mora-Barrantes,

Rolando Sánchez-Gutiérrez 76

Evaluación de los parámetros físicos y químicos del agua de mar en los alrededores de la Isla Uvita, Limón, Costa Rica	
Evaluation of physical and chemical parameters of sea water in the surroundings of Uvita Island, Limon, Costa Rica	
<i>Jaime Alfaro-Sandí, Gilberto Piedra-Marín, Ana Y. Saravia-Arguedas, Lilliana Piedra-Castro</i>	88
Estudio fotoacústico de nanopartículas de oro por ablación láser	
Photoacoustic study of gold nanoparticles by laser ablation	
<i>Jesús Manuel Rivera-Esteban, Agustín Benigno Olivas-Alvarez</i>	96
Caracterización de bioinsumos producidos artesanalmente en Nicaragua	
Characterización of artisanally bioinoculant produced in Nicaragua	
<i>Johana O'Connor-Mendoza, Leandro Páramo-Aguilera, Griselda Martínez-Laguna, Laura Guillén-Rodríguez</i>	109
Evaluación de los riesgos químicos por inhalación de las sustancias utilizadas en una industria gráfica	
Evaluation of chemical risks by inhalation of substances used in a graphic industry	
<i>Wendy Villalobos-González, José Pablo Sibaja-Brenes, José Carlos Mora-Barrantes, Benjamín Álvarez-Garay</i>	122
Principales microorganismos entomopatógenos de <i>Tecia solanivora</i> y sus mecanismos de acción	
Main entomopathogenic microorganisms of <i>Tecia solanivora</i> and their mechanisms of action	
<i>Emmanuel Jose Guerra-Luran, Jovanna Acero-Godoy</i>	137
Revisión sistemática de literatura: aplicaciones de las comunicaciones moleculares	
Systematic review of literature: applications of molecular communications	
<i>Maximiliano Centeno-Romero, German Chacón-Arrieta, José Alexander Vega-Aguilar, Antonio González-Torres, Jason Leitón-Jiménez</i>	147
Producción de chile dulce en invernadero: correlación entre densidad de siembra y variables de rendimiento	
Sweet pepper production under greenhouse conditions: correlation among plant density and yield variables	
<i>José Eladio Monge-Pérez, Michelle Loría-Coto</i>	161
Establecimiento de un protocolo para la inducción de embriogénesis somática indirecta en <i>Allium Sativum</i> (Ajo Criollo Costarricense)	
Establishment of a protocol for the induction of indirect somatic embryogenesis in <i>Allium sativum</i> (Costa Rican Creole Gralic)	
<i>William Watson-Guido, Vilma Jimenez-Bonilla, Jaime Brenes-Madriz</i>	178
Food loss and waste in food services from educational institutions in Costa Rica	
Pérdida y desperdicio de alimentos en servicios de alimentación de instituciones educativas de Costa Rica	
<i>Julián Rojas-Vargas, Yanory Monge-Fernández, María Fernanda Jiménez-Morales, Laura Brenes-Peralta, Manrique Arguedas-Camacho, Cindy Hidalgo-Viquez, Marcela Peña-Vásquez, Blanca Vásquez-Rodríguez</i>	187

Materiales alternativos como oportunidad de reducción de impactos ambientales en el sector construcción

Alternative materials as an opportunity to reduce environmental impacts in the construction sector

María Fernanda Hernández-Zamora¹, Sebastián Jiménez-Martínez²,
Juan Ignacio Sánchez-Monge³

Fecha de recepción: 10 de marzo de 2020

Fecha de aprobación: 19 de junio de 2020

Hernández-Zamora, M.F; Jiménez-Martínez, S; Sánchez-Monge, J.I. Materiales alternativos como oportunidad de reducción de impactos ambientales en el sector construcción. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-2. Abril-Junio 2021. Pág 3-10.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i2.4831>



- 1 Ingeniera en Gestión Ambiental, consultora independiente, Costa Rica. Correo electrónico: ferherzam97@gmail.com
- 2 Ingeniero en Gestión Ambiental, consultor independiente, Costa Rica. Correo electrónico: sebastianjimenez222@hotmail.com
- 3 Ingeniero en Gestión Ambiental, Universidad Nacional, Costa Rica. Correo electrónico: juan.sanchez.monge@una.cr

Palabras clave

Bioconstrucción; Materiales Alternativos; Materiales Convencionales; Impacto Ambiental.

Resumen

Las construcciones se han convertido en un grave problema ambiental, debido a su alta exigencia de recursos naturales y la producción masiva de residuos de gran volumen que requieren un manejo especial. Debido a esto, es necesario replantear los materiales utilizados en el sector, junto con los métodos de extracción y producción, así como la aplicación de instrumentos que faciliten la disminución de los impactos asociados a las obras de construcción, desde la etapa del diseño u obtención de materias primas. De esta manera, se empleó una búsqueda bibliográfica de diversos documentos con carácter electrónico, principalmente de las bases de datos de la Universidad Nacional, entre otros buscadores académicos. El proceso metodológico se realizó a partir de una investigación cualitativa, donde la teoría y la revisión bibliográfica fueron el marco de referencia; bajo el objetivo de identificar algunos de los materiales alternativos, tales como el adobe, la madera, el cáñamo, la paja, el bambú y los ecoladrillos confeccionados con residuos domésticos, que pueden reemplazar el uso de materiales convencionales. En este sentido, la presente indagación bibliográfica permitió demostrar que los materiales alternativos son capaces de dar el mismo soporte estructural a una obra constructiva, en comparación con otros materiales convencionales. Asimismo, se destaca el valor agregado que estas opciones le otorgan al sector construcción, reduciendo las huellas ecológicas asociadas y mejorando el equilibrio ambiental, ya que se reducen los altos costos ambientales por la extracción de recursos y se minimizan los demás impactos ambientales negativos.

Keywords

Bioconstruction; Alternative Materials; Conventional Materials; Environmental Impact.

Abstract

The constructions have become a serious environmental problem, because the high demand for natural resources and the massive production of large-scale waste that require special management. It's necessary to rethink the materials used in the sector, and apply new technologies for extraction and production methods, as well as instruments that help in the reduction of the environment damages of constructions. In this way, was used a bibliographic search of various documents, mainly from the databases of the National University of Costa Rica, among other academic search engines. The methodological process was a qualitative investigation, where the theory and the literature review were the frame of reference. The objective was to identifying some of the alternative materials that can be replaced by the use of conventional materials, such as adobe, wood, hemp, straw, bamboo and eco-bricks made with household waste. The alternative materials are capable of giving the same structural support to a constructive work, in comparison with other conventional materials. This help to reduce the footprints of construction materials and improve the environmental materials that are low costs and other negative environmental impacts are minimized.

Introducción

El incremento de la densidad de población a nivel mundial ha repercutido en el desarrollo de un fenómeno caracterizado por el aumento de las urbanizaciones, las obras de construcción de diversa índole, así como el consumo de materia primas e insumos asociados a la implementación de dichas obras. Es así como las construcciones se han convertido en un grave problema ambiental debido a su alta exigencia de recursos naturales y la producción masiva de desechos de gran volumen que requieren un manejo especial. En efecto, se considera que el 50% de todos los materiales extraídos de la tierra se transforman en materiales de construcción y otros productos y que, a su vez, cuando estos materiales son desechados como residuos, representan hasta un 50% de todos los residuos generados [1].

Aunado a esto, en la construcción convencional la mayoría de los materiales utilizados poseen altos costes medioambientales debido a que requieren un alto gasto energético para su extracción, transporte y transformación. A su vez, la incorporación de sustancias químicas a dichos materiales para la mejora de sus características técnicas, sin la debida consideración de las repercusiones a nivel ambiental, perjudica tanto la salud de los ecosistemas como la de las personas [2].

En este sentido, es importante recalcar que, los materiales de construcción alternativos son aquellos que pueden emplearse en la construcción de ciertas estructuras, sin ser concebidos para tal fin, es decir, que no son diseñados específicamente para una construcción. De estos materiales se excluyen todos aquellos que son diseñados y planificados para las construcciones y que, generalmente es utilizado para todo tipo de obra, por lo que son considerados de uso convencional y suponen altos impactos asociados a su fabricación, como lo son: pétreos, vidrios, cerámicos, conglomerantes y conglomerados, metales, plásticos, pinturas y materiales bituminosos [3].

A nivel país, el sector construcción aporta de manera significativa a la economía nacional, razón por la cual se encuentra en un constante crecimiento. De esta forma, de acuerdo con un informe del Banco Central de Costa Rica en el 2017, el sector ha mostrado un aumento a una tasa interanual del 0,7%, lo cual se encuentra relacionado con la producción de una gran cantidad de residuos derivados de la construcción en donde, específicamente, se cuenta con una tasa de generación de residuos de 24,1 kg/m². A modo de ejemplificación se puede decir que para el año 2016, se generaron 250 360 toneladas de residuos de construcción [4].

Dicho esto, cabe destacar que, para evitar repercusiones negativas a nivel ambiental, es necesario replantear los materiales utilizados en el sector, junto con los métodos de extracción y producción, así como la aplicación de instrumentos que faciliten la disminución de los impactos asociados a las obras de construcción, desde la etapa del diseño u obtención de materias primas.

Ante esto surge como alternativa a la construcción convencional, la bioconstrucción la cual se puede conceptualizar como la creación de hábitats saludables y confortables a partir de recursos naturales de bajo impacto ambiental, tales como la madera, la tierra y la paja, entendiéndose impacto ambiental como un cambio en el medio ambiente como resultado de las actividades, productos o servicios de una organización [5].

Dicha corriente arquitectónica [6], [7] se basa en los siguientes criterios:

- La priorización de materiales de procedencia local y bajo coste energético.
- El uso de materiales que mejoren la salud de las personas, es decir, libres de toxicidad y que reduzcan la acumulación de partículas de polvo, la proliferación de microorganismos y la emisión de gases perjudiciales.

- El uso de materiales perdurables que al finalizar su vida útil se biodegraden con facilidad y/o pueden ser reutilizados.
- El uso de materiales que permitan regular la humedad del aire interior.
- El uso de materiales que faciliten el confort térmico de los ambientes interiores de una construcción sin el uso de equipos eléctricos, mecánicos o cualquier otro sistema activo.

Bajo dichas consideraciones, el presente artículo tiene por objetivo identificar materiales alternativos de construcción mediante una investigación cualitativa para su comparación, en términos de impacto ambiental, con materiales convencionales.

Materiales y métodos

La investigación se caracteriza por ser de carácter cualitativa, ya que la teoría y la revisión bibliográfica son el marco de referencia del presente artículo [8].

La metodología se basó en la búsqueda sistemática de información bibliográfica proveniente de artículos científicos, tesis y libros de carácter electrónico en las bases de datos de la Universidad Nacional, así como en buscadores académicos de renombre tales como Dialnet, Scielo, Science y Google Scholar. Cabe mencionar que como criterio de búsqueda se procuró que el año de publicación se encontrará entre el periodo de tiempo del 2008 al 2018, a excepción de referencias consideradas como clásicas, es decir, que no han perdido relevancia y pertinencia en el tiempo.

Resultados y discusión

Los seres humanos pasamos alrededor del 90% de nuestro tiempo en espacios interiores, en donde, según el Comité Científico de Riesgos Sanitarios y Ambientales de la Unión Europea, se pueden contener cantidades superiores a las 900 sustancias y partículas, tanto químicas como biológicas, con posibles efectos negativos sobre la salud [9].

De esta forma, los materiales de construcción convencionales se encuentran asociados a la liberación de sustancias tóxicas y cancerígenas como los formaldehidos y bencenos, los cuales son utilizados como adhesivos y solventes respectivamente. Asimismo el PVC, uno de los principales materiales de construcción, a razón de su composición química se encuentra relacionado con la generación de productos organoclorados los cuales provocan diversos efectos tóxicos en los seres vivos, incluyendo daños inmunológicos, reproductivos, endocrinos, así como sobre el sistema nervioso [9].

Aunado a dichos aspectos, los materiales de construcción poseen un alto impacto ambiental debido a la gran cantidad de energía empleada en su fabricación, así como las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a lo largo de su ciclo de vida, es decir, en la extracción de las materias primas, los procesos de transformación, así como el transporte de los mismos hasta su destino final de uso. A continuación se puede observar un listado de la cantidad de energía empleada a lo largo del ciclo de vida de distintos materiales de construcción, por metro cúbico de material, en donde se puede notar que los materiales alternativos (paja, arena, adobe y tierra) son los que requieren la menor cantidad de este recurso [6].

Cuadro 1. Cantidad de energía empleada en los ciclo de vida de diversos materiales.

Material	MJ/m3
Paja	30,5
Arena	232
Adobe	490
Bloque de tierra prensado	810
Piedra local	2030
Poliestireno expandido	2340
Concreto	3890
Ladrillo cerámico	5170
Teja cerámica	5250
Madera contrachapada	5720
Asfalto	7140
Cemento	15210
Poliuretano	44 400
Polipropileno	57600
PVC	93620
Acero	274570

Ante esto, la bioconstrucción apuesta por el uso de materiales de construcción con impactos ambientales de menor índole en búsqueda del desarrollo sostenible del sector construcción. Dentro de estos materiales se pueden mencionar:

El adobe

El adobe es una masa de tierra moldeada en forma de ladrillo y secada al sol, que se emplea en la construcción de paredes y muros. En la antigüedad, las primeras edificaciones se construyeron con tierra cruda, un material inocuo que se encuentra en abundancia en el planeta. El mismo no contiene sustancias tóxicas y puede ser reintegrado a la naturaleza al finalizar su vida útil. A su vez, cabe agregar que se puede obtener fácilmente de manera local, lo que disminuye su impacto ambiental asociado a emisiones de gases de efecto invernadero en transporte. Además, la construcción con dicho material no requiere altas temperaturas por lo que su gasto energético se considera bajo. Asimismo, su obtención es de bajo impacto debido a que carece de problemáticas como la deforestación o la minería extractiva que implican otros materiales constructivos [10], [9]

Por lo que respecta a sus propiedades, posee una gran capacidad de almacenar el calor y cederlo posteriormente (cualidad conocida como inercia térmica), por lo que se caracteriza por atenuar los cambios de temperatura externos y la creación de confort térmico, facilitando la eficiencia energética de las edificaciones al reducir las demandas de energía para refrescar o calentar las mismas. A su vez, posee propiedades de aislamiento acústico y de regulación de la humedad. Además, es un material no inflamable y económicamente asequible [10], [9].

La madera

Siempre que esté libre de tratamientos tóxicos y proceda de una gestión forestal sostenible, es considerado uno de los materiales de construcción con menor impacto ambiental. Actúa como regulador natural del ambiente interior ya que por su porosidad facilita la ventilación; estabiliza la humedad, filtra y purifica el aire. A su vez, posee propiedades aislantes, tanto a nivel térmico como acústico, así como permeabilidad a la radiación terrestre. Aunado a esto, se caracteriza por ser un material resistente, elástico y ligero, por lo que puede ser utilizado en diversos tipos de construcciones. Además, los productos derivados de la madera también poseen las mismas características, tales como el corcho y el caucho natural [3], [9].

El cáñamo

En la actualidad, se efectúan bloques a base de la parte leñosa del cáñamo, una planta de usos versátiles y de rápido crecimiento. Dicha planta es mejoradora de suelos y no precisa el uso de plaguicidas por lo que su cultivo se caracteriza por poseer un bajo impacto ambiental [11].

Dicho bloque se llama Cannabric y posee propiedades aislantes por lo que crea ambientes de alto confort térmico y acústico. A su vez, su porosidad facilita la ventilación, la regulación de la humedad y la limpieza del aire al funcionar como filtro y retenedor de contaminantes atmosféricos. Además, no es susceptible de ser atacado por parásitos debido a la ausencia de nutrientes en su composición. Por otra parte, es un material resistente y perdurable, no obstante puede ser reciclado al final de su ciclo de vida. Aunado a esto, se caracteriza por retener dióxido de carbono y por no contribuir a la emisión de gases de efecto invernadero durante su fabricación al consumir cantidades muy bajas de energía. Además, es un material de alta resistencia tanto mecánica como al fuego, por lo que puede ser utilizado en una amplia cantidad de edificaciones [11].

La paja

Es un material natural con alta disponibilidad a nivel mundial, que se caracteriza por ser compostable al finalizar su vida útil, por lo que, a diferencia de los materiales convencionales, no resulta una problemática relevante su disposición al finalizar una obra de construcción.

La utilización de las pacas de paja, como elemento estructural o bien, como relleno o material aislante; constituye a su vez, una alternativa en la construcción de edificios verdes con bajo consumo de energía, ya que el material contribuye a mantener la temperatura óptima dentro de un edificio por sus características de aislación térmica [12]. Además, para su producción y transporte, se necesitan hasta 77 veces menos cantidad de energía en comparación con materiales convencionales de construcción [12].

Se concluye que la paja [12], como material para construcción, es bastante durable y útil ya que aún existen muchas estructuras construidas en el siglo XIX que siguen en pie en la actualidad, encontrándose edificaciones con tiempos de vida cercanos a los 100 años. Además, al provenir de plantas de cereales, la paja al igual que la madera, el cáñamo y los materiales de construcción alternativos provenientes de especies vegetales, aportan de manera beneficiosa al medio ambiente al captar dióxido de carbono por medio del proceso de fotosíntesis en su fase de crecimiento [13].

El bambú

El bambú como alternativa para la construcción es óptima ya que se puede encontrar en todas las regiones del mundo. A su vez, sus especies son de rápido crecimiento propiciando beneficios tanto económicos como ambientales al facilitar su adquisición de manera local en las construcciones, disminuyendo los impactos negativos asociados a transporte del material.

Aunado a esto, el bambú aporta beneficios ecológicos a través del secuestro de dióxido de carbono a altas tasas en función del rápido crecimiento y producción biomásica. Con respecto a sus propiedades estructurales, el bambú es un material compuesto, con una distribución de sus fibras que aumenta desde el interior hacia el exterior, comportándose como un refuerzo similar al de barras de acero en concreto [14].

Por otra parte, haciendo énfasis en la comparación con materiales convencionales, las fibras del bambú presenta mayores ventajas que otras de origen sintético, ya que son renovables, biodegradables, menos abrasivas y presentan una menor demanda energética para su producción. Asimismo, es considerado un material versátil, a raíz de su alta relación resistencia-peso, facilidad de trabajo y disponibilidad; de esta manera, en ocasiones podría incluso reemplazar al concreto, la madera o el acero [14]. A su vez, el empleo de bambú aporta a la captación de dióxido de carbono, lo que favorece las condiciones de la calidad del aire.

Ecoladrillos confeccionados con residuos domésticos.

Se hace referencia sobre una nueva tendencia de materiales de construcción que se basa en ladrillos elaborados con botellas de plástico reciclado. Actualmente no poseen gran resistencia estructural, por lo que su utilización radica en construcción de muros o casas pequeñas. Los mismos son elaborados a partir de la introducción de arena u otros residuos no orgánicos, como papel, cartón o bolsas de plástico, donde el objetivo principal es rellenar botellas de plástico con materiales que aporten resistencia a las mismas [15].

Entre las ventajas de esta técnica se encuentran, que es una tecnología de reciclaje sencilla, que puede ser efectuada por personas que no cuenten con un amplio conocimiento técnico de reciclaje o construcción, de fácil de almacenaje y transportarse. A la vez, reducir el impacto en el proceso de construcción, permite reducir impactos asociados a la recolección de residuos, como el transporte y disposición final. Además, también presenta ventajas estructurales por ser un material totalmente aislante y antisísmico [16].

Conclusiones

Los materiales de construcción poseen un alto impacto ambiental a lo largo de su ciclo de vida, desde la extracción hasta la disposición final. Sin embargo, se determinó que existen materiales alternativos que pueden ser utilizados en diversas obras constructivas, con la misma capacidad estructural que poseen los materiales convencionales. A la vez, los materiales alternativos presentan ventajas, tales como la ausencia de sustancias tóxicas, lo que les permite reintegrarse a la naturaleza al finalizar su vida útil.

Se evidencia además que, en el sector construcción cada vez hay más esfuerzos en la tendencia de utilización de materiales alternativos, que son más amigables con el ambiente. En este sentido, la aplicación de estos materiales le brindan un valor agregado a las obras constructivas, ya que se genera una cultura de eficiencia en el uso de recursos, propiciando la racionalidad en su consumo en búsqueda del desarrollo sostenible.

La implementación de materiales alternativos genera un equilibrio ante los impactos ambientales que supone el sector constructivo convencional, de modo que las huellas ambientales por este efecto se disminuyen, contemplando la reducción de emisiones contaminantes, tasas de generación de residuos peligrosos y/o de manejo especial, entre otros.

Referencias

- [1] L. Abarca, "Nivel de importancia de las causas de generación de residuos en la construcción en Costa Rica", *Tecnología en Marcha*, 30(4), pp. 130-137, Diciembre 2017.

- [2] J. Morenilla, y F. Martínez, “Materiales para la bioconstrucción”, *Cercha* , 108 (1), 68-73, Junio 2011.
- [3] J. Ruiz, V. Cristini, y P. Madrigal. (2011, Julio 15). Materiales de construcción sostenibles y/o alternativos: base de datos generada con una plataforma cooperativa digital. [En línea] Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/53701/M211.pdf?sequence=1>
- [4] S. Rosales, “Residuos peligrosos de la construcción en Costa Rica y sus impactos al ambiente”, Tesis de Grado, Escuela de Química, Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, 2017.
- [5] INTECO. ISO 14001 Sistemas de gestión ambiental. Requisitos con orientación para su uso. Costa Rica: INTECO. 2015
- [6] E.Rocha, “Construcciones sostenibles: materiales, certificaciones y LCA”. *Revista nodo*, 11 (6), 99-116. Diciembre 2011
- [7] J. Morenilla y F. Martínez. Materiales para la bioconstrucción. *Cercha* , 108 (1), 68-73. 2011
- [8] R. Hernández. Fernández, C., & Baptista, P. Metodología de la investigación. 4 edición. Mc Graw Hill Interamericana. 600 p.
- [9] Escuela de Organización Industrial. (2011). Ecomateriales y Construcción Sostenible. Disponible en: <https://www.eoi.es/es/file/39025/download?token=X-Yw0M4n>.
- [10] J. González, (2014). Bioconstrucción Construcción Natural y Tecnologías Apropriadas (Trabajo de graduación). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- [11] B. Dobón, “Materiales de construcción reciclados y reutilizados para la arquitectura sostenible” (trabajo de graduación), Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, 2018.
- [12] M. Bernal, “Uso de la paja en la construcción de paneles aislantes o estructurales, aprovechamiento de residuos de cereales de la agricultura” (trabajo de graduación), Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia, 2018.
- [13] G. Minke, y F. Mahlke, *Manual de construcción con fardos de paja*. Alemania: Editorial EcoHabitar, 2018.
- [14] B. Torres, M. Segarra, y L. Bragança, “El bambú como alternativa de construcción sostenible”. *Extensionismo, innovación y transferencia tecnológica. Claves para el desarrollo.*, vol. 5, pp. 389-400, Agosto 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.30972/eitt.503787>.
- [15] A. Isan, (2018, Mayo 30). Ladrillos ecológicos: Qué son, tipos y ventajas. [En línea]. Disponible en: <https://www.ecologiaverde.com/ladrillos-ecologicos-que-son-tipos-y-ventajas-456.html>
- [16] Instituto Mesoamericano de Permacultura (IMAP). (2012, Agosto 17). Las ventajas del Eco-Ladrillo. [En línea]. Disponible en: <https://imapermacultura.wordpress.com/2012/08/17/las-ventajas-del-eco-ladrillo>

Manejo ambiental de residuos orgánicos: Estado del arte de la generación de compostaje a partir de residuos sólidos provenientes de sistemas de trampas de grasa y aceite

Environmental management of organic waste: State of the art of composting generation from solid waste of the grease and oil trap systems

Yuliana González-Jiménez¹, Josué Villalobos-Morales²

Fecha de recepción: 22 de diciembre de 2019
Fecha de aprobación: 28 de abril de 2020

González-Jiménez, Y; Villalobos-Morales, J. Manejo ambiental de residuos orgánicos: estado del arte de la generación de compostaje a partir de residuos sólidos provenientes de sistemas de trampas de grasa y aceite. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-2. Abril-Junio 2021. Pág 11-22.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i2.4843>



- 1 Profesora en la Universidad Técnica Nacional. Costa Rica. Correo electrónico: yuliana.gonzalezjimenez@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0003-4956-3720>
- 2 Químico en Chémica S.A. Costa Rica. Correo electrónico: jvillalobos-p@hotmail.es
 <https://orcid.org/0000-0002-0225-6873>

Palabras clave

Residuos; residuos orgánicos; residuos de trampas de grasas; *Pseudomonas*; compostaje.

Resumen

La inadecuada disposición de residuos trae consigo una serie de impactos ambientales negativos tanto para los seres humanos como para la biota en general. Uno de los residuos municipales que representa la principal fuente de impactos y riesgos ambientales adversos en los vertederos tradicionales es la fracción orgánica biodegradable, especialmente los residuos de las trampas de grasas y aceites. Las técnicas para su disminución en vertederos comprenden desde generación de biodiesel hasta el compostaje. En el presente estudio se realiza una descripción del estado del arte de algunas metodologías utilizadas a nivel mundial para llevar a cabo el compostaje de los residuos de las trampas de grasas y aceites; esto con la intención de lograr minimizar los impactos ambientales generados por la inadecuada disposición de los mismos. Se determinó que, por las condiciones climatológicas habituales de nuestro país, es posible utilizar los procesos de compostaje en el tratamiento de los residuos sólidos provenientes de sistemas de trampas de grasas y aceites.

Keywords

Waste; organic waste; grease trap residue; *Pseudomonas*; composting.

Abstract

The wrong disposal of waste brings with it a series of negative environmental impacts for both humans and biota in general. One of the municipal waste that represents the main source of environmental impact and risk in traditional landfills is the biodegradable organic fraction, especially residues from grease and oil traps. The techniques for its decrease in landfills is establish from biodiesel generation to composting. The present study, is a description of the state of the art of some methodologies used worldwide to carry out the composting of the residues of grease and oil traps. It was determined that due to the usual weather conditions in our country, it is possible to use composting processes in the treatment of solid waste from grease and oil trap systems.

Introducción

El incremento social, económico, tecnológico y demográfico, ha generado una mayor demanda de productos a nivel mundial, dando como resultado un mayor consumo y consecuentemente una alta generación de residuos. Se define residuo como cualquier material residual de origen industrial y actividades humanas que no tienen valor residual [1].

La generación de residuos y la inadecuada disposición de los mismos, trae consigo una serie de impactos ambientales que repercuten en la calidad del aire, agua y suelo, aunado a esto se desarrollan afectaciones en la salud de la población, las cuales son provocadas por las emanaciones de gases que producen desde malos olores hasta incendios. Además, se proporciona un aporte significativo en la generación de lixiviados que eventualmente podrían contaminar los mantos acuíferos, provocando así la proliferación de fauna nociva [2].

Otros autores describen que al existir una gestión inadecuada de residuos, la acumulación incontrolada de los mismos puede generar graves problemas, ya que son foco de infección y contaminación, destacando impactos como la proliferación de insectos y roedores, el desarrollo

de vectores de enfermedades para el hombre y otros animales, la aparición de malos olores y gases tóxicos procedentes de la descomposición de la materia orgánica, la generación de impacto paisajístico negativo por la acumulación de espacios no apropiados, contaminación del suelo y de aguas superficiales y subterráneas por la producción de lixiviados con un alto índice de toxicidad y una alta contaminación atmosférica por la fermentación de la materia orgánica en ausencia de aire, lo cual provoca gas metano (gas de efecto invernadero) [3].

La variabilidad tanto en los residuos como en el tiempo de degradación y los impactos generados por los mismos, deben ser considerados. Por ejemplo, aunque los materiales plásticos tienen un amplio uso, los desechos plásticos tienen un gran impacto en el medio ambiente porque en su mayoría no son biodegradables. Otro residuo importante es el papel, este material representa del 30 al 40% del total de desechos sólidos municipales. Por otra parte, los metales son materiales reciclables utilizados para obtener productos de alto valor, los cuales, al ser desechados de manera incorrecta pueden presentar problemas serios en el medio ambiente, bioacumulándose en ciertos organismos hasta llegar a ser ingeridos por los seres humanos. Otro material que puede reciclarse fácilmente es el vidrio, una ventaja para reciclar vidrio es la reducción en el consumo de energía en comparación con el uso de materia prima de sílice. Además, la composición de los desperdicios de comida y jardín es muy diversa, es por esto que su caracterización representa una limitante en la utilización de estos desechos y en la obtención de productos valiosos. Sin embargo, estos desechos tienen un alto potencial para ser reutilizados [1].

Los residuos urbanos, al tener una composición tan heterogénea, es necesario agrupar sus componentes en categorías inertes, fermentables y combustibles. Algunos ejemplos de residuos inertes son metales, vidrios, restos de reparaciones domésticas, suelo, escoria y cenizas. Por otra parte, los residuos fermentables se consideran como la fracción orgánica, la cual está compuesta por restos de comida, de jardinería, entre otros materiales fermentables. Finalmente, entre los residuos combustibles se pueden clasificar el papel, el cartón, los plásticos, las gomas, los cueros, los textiles y otros [3].

La fracción orgánica de residuos sólidos municipales, se conoce comúnmente como fracción orgánica biodegradable debido su origen y naturaleza. Estos se componen principalmente de residuos de alimentos, desechos de cocina (grasas y aceites) y sobras de residencias, restaurantes, cafeterías, comedores de fábricas y mercados. Dicha fracción se caracteriza por contener una alta humedad y una alta biodegradabilidad, por lo que se dice que la fracción orgánica biodegradable es la principal fuente de impactos y riesgos ambientales adversos en los vertederos tradicionales (olores, incendios, COV, contaminación del agua subterránea por lixiviados, cambios climáticos globales, etc.) [4].

Actualmente, ha surgido un gran interés en la producción, gestión y tratamiento de los residuos, así como en el aprovechamiento de fuentes de energías alternas mediante el desarrollo de nuevas tecnologías, o de la utilización de residuos generados en múltiples procesos productivos [5], [6]. Por lo cual se ha innovado en el tema de utilización de grasas y aceites (FOG) provenientes de los residuos de trampas de grasas generados en los restaurantes de comida, hogares y plantas de tratamiento de aguas residuales [5].

Los residuos de las trampas de grasas se derivan del pretratamiento de aguas residuales de restaurantes, cadenas de comida rápida y procesadores de alimentos. Se extraen las grasas de las trampas interceptoras de grasa con un contenido de sólidos entre 5 y 6% [7] (GTC). Las grasas y aceites, son subproductos generados en los procesos de cocción, contemplando tanto grasas animales como aceites vegetales. Las fuentes más comunes de dichos residuos son grasas de carne, manteca de cerdo, salsas, sebo, aceite de cocina, mantequilla, margarina,

aderezos, comida frita, productos horneados, quesos, entre otros. Estas grasas y aceites suelen estar presentes en estado sólido y en estado líquido viscoso, dependiendo del grado de saturación de las cadenas de carbono [5].

El tratamiento adecuado de las FOG provenientes de restaurantes y casas de habitación, aportan una serie de beneficios ambientales, ya que la descarga de dichos contaminantes en el sistema de alcantarillado genera procesos de acumulación y obstrucción de tuberías. Esto debido a los ácidos grasos libres (AGL) formados en el proceso de freír las grasas y aceites, donde estos materiales sufren un proceso de saponificación en presencia de los tensoactivos presentes en los jabones de cocina, los cuales al entrar a los sistemas de alcantarillado pueden sufrir procesos reversibles, formando nuevamente los AGL y obstruyendo el sistema de alcantarillado, incurriendo en la generación de problemas ambientales al tener que remediarlos [5], [8].

Otros problemas ambientales tales como el aumento de la materia orgánica y la eutrofización, generan la pérdida de la diversidad de estos ecosistemas, los cuales surgen con el vertimiento de estos residuos a fuentes de agua potable lo cual agrava la situación aún más [9].

A partir de estos factores, se enfatiza en la importancia de llevar a cabo el tratamiento de las grasas y aceites para la obtención de productos o como fuente de energía, ya que estos generalmente son tratados como desechos [10].

Este tipo de residuo se puede clasificar según su fuente de generación, en el caso de las grasas y aceites se dividen en dos tipos: aceites de cocina usada identificados típicamente como UCO por sus siglas en inglés y residuos de trampas de grasa (GTW), en donde principal diferencia es la composición de ácido graso libre, si este es menor al 15% se le cataloga como UCO y si este es mayor se identifica como GTW [10].

Tratamiento de residuos de grasas y aceites

A nivel nacional las grasas y aceites que son empleadas durante el proceso de fritura de alimentos en los servicios de alimentación al público, deberán tener un contenido menor o igual al 25% de compuestos polares totales (CPT), y aquellos que no cumplan con el límite CPT establecido, deben disponerse e incluirse en un programa de manejo integral de residuos conforme a lo estipulado en la Ley para la Gestión Integral de Residuos Ley N° 8839-S [11]. Es por esto que se muestra la importancia de generar nuevos ámbitos de conocimiento sobre la disposición y metodologías de tratamiento de los residuos de las trampas de grasas y aceites.

Los residuos de grasas y aceites obtenidos, poseen varias formas de tratamiento tales como disposición en rellenos sanitarios o vertederos, procesos de digestión anaeróbica y generación de biodiesel [12]oil, and grease (FOG. Actualmente, la disposición de estos residuos en rellenos sanitarios, es la técnica más empleada a nivel global, sin embargo, está siendo regulada por muchos países, fomentando el empleo de nuevas formas de tratamientos, los cuales generan formas más limpias de su uso [12]oil, and grease (FOG.

Según Rojas [13], en el tratamiento de los FOG, el compostaje es una aplicación adecuada, este proceso se basa en la descomposición biológica de los compuestos orgánicos que deben estar bajo condiciones aeróbicas controladas.

En definición, el compostaje consiste en un tratamiento aeróbico biológico en donde organismos mesofílicos y termofílicos transforman la materia orgánica en dióxido de carbono, agua, amoníaco y compost, el cual puede inferir en resultados positivos al medio ambiente debido a la eliminación amigable de este tipo de residuos, sin embargo, si el proceso no se

monitorea de manera adecuada genera la inhibición del crecimiento de la diversidad, además los lixiviados pueden contener la formación de sustancias tóxicas que generan problemas en el medio ambiente [14].

Se ha demostrado que el compostaje es un proceso de tratamiento muy exitoso para aceites minerales, como por ejemplo los hidrocarburos. Asimismo, para el proceso de compostaje, es posible utilizar residuos de procesos de extracción de aceite como el aceite de oliva. Sin embargo, el compostaje de residuos de alimentos ricos en aceites y grasas no es una práctica común [15].

En la producción de compostaje se deben considerar y controlar cuatro variables importantes como lo son la humedad, la temperatura, el pH y el tamaño de partículas (asociado con la oxigenación) [13]. El cuadro 1 resume las características de dichas variables.

Cuadro 1. Variables determinantes en la producción de compost.

Parámetro	Valor	Observación
Humedad (%)	60-80	Condiciones aeróbicas óptimas para los microorganismos
	< 60	Descomposición anaeróbica
	> 80	
Temperatura (°C)	40-70	Mayor rendimiento del compostaje
pH	Debe ser relativamente ácido o básico	Si el cambio de pH es muy drástico, se podría llevar a cabo el proceso de fermentación
Tamaño de partícula	Son ideales las de menor tamaño	El tamaño de las partículas determina la velocidad de descomposición de los materiales la cual aumenta conforme se presentan mayor cantidad de partículas de menor tamaño.

Fuente: Elaboración propia a partir de Rojas [13].

Los objetivos del compostaje pueden ser la reducción y la estabilización del volumen de la masa orgánica biodegradable, además de la eliminación de sustancias fitotóxicas, semillas de herbáceas colonizadoras, entre otros. El compostaje es también un método para la descontaminación de suelos [16].

Metodologías aplicadas para el compostaje a partir de los residuos de grasas y aceites

En el tratamiento de grasas y aceites provenientes de aguas residuales se han investigado métodos biológicos para procesos de compostaje, en donde se han llevado a cabo estudios de la actividad lipolítica de 3 cepas para la eliminación de aceites en aguas residuales; obteniéndose diferentes porcentajes de eficiencia según la cepa utilizada. La cepa *Flavobacterium* obtuvo un 30% de eficiencia, la *Acinetobacter* un 47% y la *Pseudomonas* un 95%. Ya que la cepa *Pseudomonas* obtuvo un mayor porcentaje de eficiencia, se realizaron

pruebas de enriquecimientos de nitrógeno. La implementación de compostaje a partir de este tipo de matrices requiere el enriquecimiento de nitrógeno para su óptimo funcionamiento, para ello se emplearon 7 tipos diferentes de nutrientes tales como: peptona, extracto de levadura, fosfato de amonio, sulfato de amonio, urea, nitrato de amonio y carbonato de amonio. Obteniendo el rendimiento máximo de eliminación al emplear el nitrato de amonio, mientras que, con carbonato de amonio se obtuvo un rendimiento mínimo de eliminación [17].

Es importante resaltar que el uso de nutrientes que generan o contienen amoniaco, provocan cambios de pH ácidos en el medio, los cuales pueden dificultar y reducir la actividad lipolítica. Con dicho estudio se logró determinar que la temperatura óptima de funcionamiento de las *Pseudomonas* varía entre los 25°C a 30°C (figura 1). A nivel general se obtuvieron resultados de eliminación del 96% de los residuos de aceite a tratar [17].

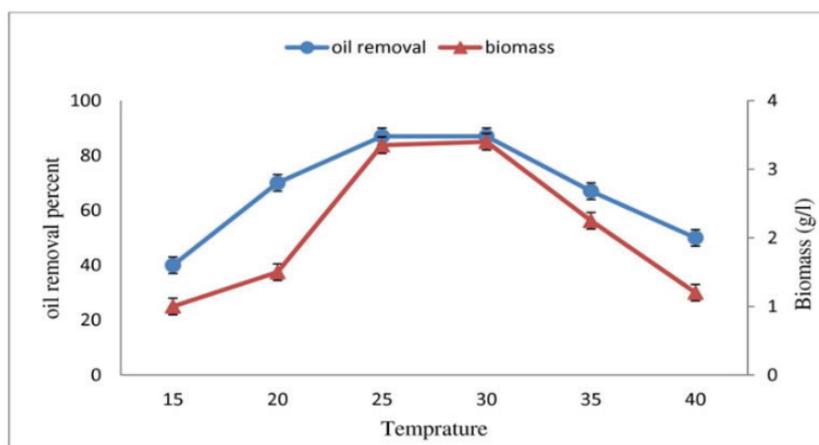


Figura 1. Efecto de la temperatura en la producción de biomasa a partir de *Pseudomonas* [17].

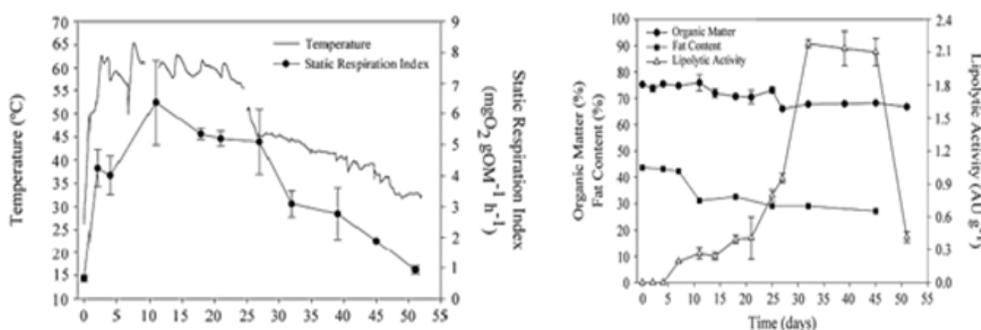


Figura 2. Resultados de compostaje para experimento estática: La temperatura y el índice de respiración estática (lado izquierdo la de figura) y el contenido de materia orgánica, contenido de grasa y la actividad lipolítica (lado derecho de la figura), durante el proceso de investigación [18].

Además, en otro estudio, se llevó a cabo un proceso de investigación en donde se evaluó el desempeño de procesos de compostaje estáticos. Para ello se utilizó una matriz a base de grasa de animal recolectada de un matadero, astillas de madera y lodo de aguas residuales anaeróbicas de la planta de tratamiento de aguas residuales de Granollers, España. Con el fin de mantener las condiciones óptimas en la matriz, se adicionaba agua de manera manual

con el fin de mantener una humedad constante y además se monitoreó el nivel de oxígeno para asegurarse que el mismo siempre sea mayor al 10% y garantizar la supervivencia de las bacterias [18].

Como se observa en la figura 2, la temperatura y el índice de respiración estática (SRI), se lograron en el momento en el que se alcanzaron las temperaturas termófilas (en el segundo día del proceso), las condiciones se mantuvieron durante los primeros 25 días. Posterior a ello, se observó una fase de enfriamiento y una etapa de maduración mesófila. En el día 30, la temperatura y el SRI disminuyeron considerablemente, lo que indica una reducción de la actividad biológica. Con lo que respecta al contenido de grasa, la materia orgánica y la actividad lipolítica, la reducción más significativa se observó en los primeros 11 días del proceso en donde posterior a ello sólo se produjo una ligera reducción, sin embargo, se registraron actividades hasta el día 25 debido a que se obtuvieron altas temperaturas y altos valores de SRI durante el desarrollo del estudio. Para evaluar la eficiencia de este método de compostaje, se realizó en paralelo un proceso de compostaje dinámico obteniendo un 92.6% de reducción de la grasa presente, y en proceso estático se obtuvo un 56.5% para este parámetro, además, se obtuvieron mayores problemas de lixiviación al momento de adicionar agua a la matriz, por lo que se concluye que este tipo de proceso genera un menor rendimiento y por lo tanto no es factible aplicarlo a una escala mayor [18].

El siguiente estudio realizado en Vancouver, Canadá, evaluó la biodegradación de residuos ricos en lípidos (lodos de trampa de grasa), esto cuando se composta en condiciones aeróbicas y utilizando dos sustratos diferentes: residuos de jardín y desechos sintéticos de alimentos. En este estudio se utilizaron matraces Dewar de acero inoxidable con volúmenes de 6 L, además, para los dos sustratos (residuos de jardín y desperdicio de comida sintética) se utilizaron dos tipos de mezclas, primero el subgrupo denominado como YG1 (residuos de jardín con 5% de lodos de trampa de grasa) y YG2 (residuos de jardín con 10% de lodos de trampa de grasa), y segundo el subgrupo FG1 (desperdicio de comida sintética con 5% de lodos de trampa de grasa) y FG2 (desperdicio de comida sintética con 10% de lodos de trampa de grasa). Finalmente, se obtuvo como resultado que el tratamiento YG1 presentó un mejor rendimiento en cuanto a la biodegradación de los residuos ricos en lípidos, estimado mediante el perfil de temperatura, la tasa y grado de biodegradación de sólidos y lípidos, la reducción de la masa húmeda y el contenido de agua, lo anterior en comparación con el compostaje de residuos de jardín solo. En cuanto al sustrato desechos sintéticos de alimentos, el tratamiento FG2 parecía inhibir el proceso de compostaje [15].

Por otra parte, se realizó un estudio sobre la implementación de una nueva tecnología de compostaje para residuos con alto contenido de grasas provenientes de aguas residuales decantadas, recolectadas de las trampas de grasa de la carne, pescado, plantas procesadoras de aceite vegetal y restaurantes; los desechos atrapados en dichas trampas están compuestos básicamente de grasas y aceites. En este estudio, las grasas se biodegradaron usando una composición bacteriana compuesta por los microorganismos activos *Enterobacter aerogenes* (E13) (capaces de degradar grasas), *Arthrobacter sp.* (N3) (capaz de degradar compuestos alifáticos) y cultivos de *Bacillus coagulans* (S1) (capaz de degradar los límites de péptidos complejos). Las cepas bacterianas se cultivaron en erlenmeyer de 750 ml con 70 ml de caldo de nutrientes ("Oxoid") por separado a 30°C y 200 rpm. en un agitador rotativo durante 16 horas. Se prepararon tres mezclas de compostaje con relación C/N de 30/1, 40/1 y 60/1, el proceso se llevó a cabo en reactores de 20 L en las condiciones óptimas de compostaje (ver cuadro 2.). Al finalizar el estudio se encontró que la relación C/N adecuada en estos procesos es de aproximadamente 30/1 en condiciones ideales de compostaje [19].

Otra metodología utilizada para el compostaje de residuos de trampas de grasa, consistió en la producción de biofertilizante mediante los residuos de grasas y aceites, añadiendo estiércol en diferentes proporciones por un periodo de 30 días. Para esto, se realizó inicialmente la caracterización del lodo (pH, humedad, cenizas, materia orgánica, grasas y aceites), una vez obtenido los valores se procedió a remediar los lodos mediante la degradación del aceite agregando estiércol. Antes del proceso de mezclado, se midió el porcentaje de humedad del estiércol y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) del lodo. Una vez definidos los parámetros se procedió a realizar el cálculo para la determinación del porcentaje de lodo y el porcentaje estiércol, considerando la cantidad de agua contenida en el estiércol y en el lodo; para un total de 500 gramos en masa de cada mezcla, se buscó que la relación de materia seca y agua fuera 1:1 [20].

Finalmente, como resultados del estudio, se obtuvo que solamente dos de las mezclas presentan resultados adecuado para el proceso de digestión, la primera contiene 30% estiércol y 70% lodo (E30 - L70), la segunda mezcla que mostró resultados favorables es la que contiene 40% estiércol y 60% lodo (E40 - L60). A partir de este momento, se realizaron pruebas de grasas y aceites sólo a estas relaciones de mezclas, en donde se obtuvo que la mezcla (E30 - L70) tiene una eficiencia de degradación de la grasa aproximada del 70%, y la mezcla (E40 - L60) tiene una eficiencia de degradación de grasas y aceites cercana al 92%. Los autores mencionan que, considerando los resultados se puede determinar que el proceso de remediación de los lodos es aceptable debido a que se consigue degradar más del 70% de aceite presente en los lodos [20].

También se han realizado investigaciones sobre el efecto de la adición de *Pseudomonas Putida* CP 1 a procesos de compostaje que contienen bacterias a *Bacillus* spp, para aumentar la degradación de grasas y aceites. Debido a que se logró observar que las bacterias solo pueden hidrolizar las grasas, pero no metabolizarlas, la adición de las *Pseudomonas* genera un proceso de metabolización y se obtienen mejores resultados en procesos de compostaje [21].

Para esta investigación se trabajó con dos tipos de sustratos, el primero contiene mantequilla con una composición basada en un 66% de ácidos grasos saturados y el segundo sustrato contiene aceite con una composición de 85% ácidos grasos insaturados, estudios anteriores han demostrado que entre más saturada sean los ácidos grasos más difícil de degradar [21].

Este proceso se monitoreó por 14 días, en donde se realizaron 2 tipos de pruebas para cada sustrato uno sin la adicción de la cepa de *Pseudomonas* y otra con la adicción de la misma. Finalmente, se logró observar que en ambas pruebas se eliminó hasta el 94% del sustrato, sin embargo, la adición de las *Pseudomonas* logra reducir hasta en un 45% el tiempo de eliminación de las grasas y aceites, dejando reflejado la cooperación exitosa al introducir *Pseudomonas* en el tratamiento degradación de grasas en trampas de grasa [21].

En otro artículo, se investigó la actividad de la enzima lipasa inmovilizada derivada en tres tipos bacterias; para ver el efecto de degradación de FOG y el tratamiento de aguas residuales en trampas generadas en una cafetería, además de la evaluación la eficiencia del método continuo y discontinuo en este proceso, para esto se analizó el DBO_5 , el pH y los sólidos solubles antes y después del tratamiento. Los resultados demuestran que la *Pseudomonas aeruginosa* presentó la mayor actividad de la enzima lipasa en aguas residuales, seguida de la *Bacillus subtilis* y la *Staphylococcus epidermidis*, respectivamente. Sin embargo, la mayor eficacia del tratamiento para la disminución de DBO_5 se encontró en *B. subtilis*, seguido de *S. epidermidis* y *P. aeruginosa*, respectivamente. Con respecto a la evaluación de los métodos discontinuos y continuos, se indica que la actividad de la lipasa en el sistema de inmovilización en el método continuo fue mayor que el método discontinuo [22].

El siguiente estudio desarrollado en Costa Rica, específicamente en la Universidad Nacional, tuvo como objetivo evaluar los residuos de las trampas de grasa de los lodos provenientes de las sodas que funcionan en dicha universidad. Lo anterior mediante la técnica de compostaje enzimático para su posterior aprovechamiento como enmienda.

Cuadro 2. Resumen de metodologías para el compostaje a partir de trampas de grasas y aceites.

Estudio	Metodología	VARIABLES CRÍTICAS	Resultado principal
Azhdarpoor, Mortazavi y Moussavi [17]	Estudios de la actividad lipolítica de 3 cepas para la eliminación de aceites en aguas residuales	Nutrientes, pH, temperatura	Eliminación del 96% de residuos por el uso de <i>Pseudomonas</i>
Ruggieri, Artola, Gea y Sánchez [18]	Evaluación del desempeño de procesos de compostaje estáticos.	Humedad del sistema, nivel de oxígeno	El compostaje estático presenta una menor eficiencia de reducción de grasas y aceites
Lemus, Lau, Branion y V. Lo [15]	Evaluación de la biodegradación de residuos de jardín y desechos sintéticos de alimentos, ricos en lípidos en condiciones aeróbicas	Porcentaje de lodos en las trampas de grasa	El tratamiento de residuos de jardín con 5% de lodos de trampa de grasa presentó un mejor rendimiento
Stanaitiene, et al. [19]	Implementación de una nueva tecnología de compostaje para residuos con alto contenido de grasas	Relación carbono/nitrógeno, temperatura	La relación C/N adecuada es de aproximadamente 30/1 en condiciones ideales de compostaje
Alfonso, Carpinteyro, Vélez y Teón [20]	Producción de biofertilizante añadiendo estiércol	pH, humedad, cenizas, materia orgánica, DBO ₅ , grasas y aceites	Eficiencia de degradación: Mezcla (E30 - L70) 70% Mezcla (E40 - L60) 92%.
Tzirita, Papanikolaou, y Quilty [21]	Adición de <i>Pseudomonas Putida</i> CP 1 a procesos de compostaje que contienen bacterias a <i>Bacillus</i> spp	Producción de biomasa, actividad de lipasa	La adición de las <i>Pseudomonas</i> logra reducir el tiempo de eliminación de las grasas y aceites
Lauprasert, Chansirattana y Paengjan [22]	Utilización de <i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Bacillus subtilis</i> y <i>Staphylococcus epidermidis</i> , en la degradación de grasas y aceites	DBO ₅ , pH y sólidos solubles	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> presenta mayor actividad de la enzima lipasa La actividad de la lipasa fue mayor en el método continuo
Rojas [13]	Fabricación de compost utilizando el tratamiento enzimático y no enzimático	Tasa de generación, humedad, % de grasas, capacidad calorífica, metales pesados, la materia orgánica, el carbono y el nitrógeno	Es recomendable la utilización de ambos abonos (con y sin enzimas)

Fuente: Elaboración propia a partir de Azhdarpoor et al. [17], Ruggieri et al. [18], Lemus et al. [15], Stanaitiene et al. [19], Alfonso et al. [20], Tzirita, et al. [21], Lauprasert, et al. [22] y Rojas [13].

En la metodología se recolectaron lodos provenientes de las sodas durante un periodo de 7 meses, analizando posteriormente en dicha matriz la tasa de generación, la humedad, el porcentaje de grasas, la capacidad calorífica, el contenido de micronutrientes (Zn y Cu), el contenido de macronutrientes (P, K, Mn y Ca), los metales pesados (Pb, Cd, Hg y Ni), la materia orgánica, el carbono y el nitrógeno. Dichos lodos se compostaron utilizando el tratamiento de compostaje enzimático y sin enzimas [13].

En dicho estudio se evaluó el compostaje de los lodos por medio de composteras rotatorias, deshidratando los biosólidos en un lecho de secado por desnivel y aplicando un tratamiento con óxido de calcio, para ayudar a la estabilización, la reducción de la humedad y aumentar la superficie de exposición. Los residuos de las trampas de grasa se acumularon por 30 días y se deshidrataron por otros 30 días, esto con la finalidad de obtener una estructura semisólida del material y asegurar su utilización en las composteras. Posteriormente, se realizaron mezclas 80:20 lodo-sustrato, donde el sustrato estaba compuesto por pellets de aserrín seco. Se utilizaron enzimas degradadoras de grasa para el proceso de compostaje con el fin de comparar ambos biofertilizantes. Finalmente, se obtuvo como resultado una mayor reducción del porcentaje de grasas para la muestra de compost tratada con enzimas, sin embargo, el autor menciona que en ambos tratamientos (con enzimas y sin enzimas) se observa una disminución importante respecto al lodo crudo. Concluyendo que es recomendable la utilización de ambos abonos (con y sin enzimas) para su posterior aprovechamiento como enmienda orgánica [13].

Las distintas metodologías utilizadas en la producción de compostaje con la finalidad de minimizar los efectos de una inadecuada disposición de los residuos de trampas de grasas y aceites, se resumen en el cuadro 2.

Conclusiones

La implementación de los procesos de compostaje de grasas y aceites a nivel nacional, generaría procesos más cíclicos con respecto a estos residuos, y se implementarían formas más adecuadas para su disposición final a las que actualmente se efectúan a nivel nacional en la mayoría de los casos.

La actividad lipolítica de las *Pseudomonas*, presentó una gran eficiencia en el proceso de eliminación de grasas y aceites, dicha metodología se puede adecuar al país, ya que su temperatura óptima de funcionamiento (25°C-30°C) se ajusta a las condiciones climatológicas habituales en Costa Rica.

Los procesos estáticos de compostajes presentan menores rendimientos para la eliminación de las grasas y aceites, además de presentar mayores inconvenientes en el proceso de hidratación de la matriz de compostaje, debido a procesos de lixiviación.

Al agregar residuos de jardín en el compostaje de lodos de trampas de grasas, se aporta un mayor rendimiento para la degradación de los lípidos, además de proveer una alternativa adecuada para la disposición final de los desechos de residuos de jardín.

Se demostró que la relación adecuada de C/N en procesos de compostaje es aproximadamente 30/1, ya que con dicha relación las bacterias (*Enterobacter aerogenes*, *Arthrobacter sp.* y *Bacillus coagulans*) demostraron una mayor actividad al degradar las grasas y aceites.

Se puede mejorar la eficiencia de degradación de grasas y aceites en el compostaje si se adicionan proporciones 40% estiércol y 60% lodos de trampas de grasas, además de contribuir con la minimización de la contaminación generada por los residuos de excretas.

Agregar *Pseudomonas* en el proceso de degradación de grasas logra reducir hasta en un 45% el tiempo de eliminación de las grasas y aceites, es por esto que se recomienda su utilización para la producción de compostaje a partir de trampas de grasas y aceites.

El estudio desarrollado en las sodas de la Universidad Nacional, demuestra que la utilización de ambos abonos (con y sin enzimas), es una metodología recomendable, ya que en estos tratamientos se observó una disminución importante del porcentaje de grasas respecto al lodo crudo.

Al revisar un total de 8 artículos relacionados con el compostaje a partir de trampas de grasa, se recomienda la utilización de *Pseudomonas*, ya que además de presentar una gran disponibilidad, su utilización genera altos rendimientos en la disminución de los lípidos y una reducción importante en el tiempo de eliminación de las grasas y aceites.

Referencias

- [1] J. E. Santibañez-Aguilar, J. M. Ponce-Ortega, J. Betzabe González-Campos, M. Serna-González, and M. M. El-Halwagi, "Optimal planning for the sustainable utilization of municipal solid waste", *Waste Manag.*, vol. 33, no. 12, pp. 2607–2622, 2013.
- [2] M. Ibararán, I. Islas, and E. Mayett, *Valoración económica del impacto ambiental del manejo de residuos sólidos municipales: estudio de caso*, ISSN 1405-2849, N° 67, Instituto Nacional de Ecología, 2009. Recuperado de <https://ebookcentral.proquest.com/lib/biblioutnsp/detail.action?docID=3182339>
- [3] J. Moreno, R. Moral, J. García, J. Pascual, and M. Bernal, *De residuo a recurso: El camino hacia la sostenibilidad*. Madrid: Mundi Prensa S.A, 2014, pp 20-24.
- [4] F. Girotto, L. Alibardi, and R. Cossu, "Food waste generation and industrial uses: A review", *Waste Manag.*, vol. 45, no. January 2016, pp. 32–41, 2015.
- [5] I. A. F. Husain, M. F. Alkhatib, M. S. Jami, M. E. S. Mirghani, Z. Bin Zainudin, and A. Hoda, "Problems, control, and treatment of fat, oil, and grease (FOG): A review", *J. Oleo Sci.*, vol. 63, no. 8, pp. 747–752, 2014.
- [6] D. Gibbons and T. P. Curran, "Assessing the efficacy of Dublin City Council 's Fat , Oil and Grease (FOG) Programme through the quantification of FOG waste recovered", no. April, 2015.
- [7] K. Wilkinson, D. Beardsell, E. Tee, V. Hood, G. Hepworth, and C. Hudson, "Effect of Maturation of Grease Trap Compost On Plant Growth", *Compost Sci. Util.*, vol. 17, no. 1, pp. 40–47, 2009.
- [8] M. S. F. Hussin, M. A. Shamsuddin, R. Jumaidin, A. A. Zakaria, and N. Jenal, "Portable grease trap for wastewater management system: A conceptual design approach", *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.*, vol. 49, no. 1, pp. 18–24, 2018.
- [9] Z. Rodriguez-Mateus, B. Agualimpia, and G. Zafra, "Isolation and Molecular characterization of microorganisms with potential for the degradation of oil and grease from palm oil refinery wastes", *Chem. Eng. Trans.*, vol. 49, no. April, pp. 517–522, 2016.
- [10] T. Wallace, D. Gibbons, M. O'Dwyer, and T. P. Curran, "International evolution of fat, oil and grease (FOG) waste management – A review", *J. Environ. Manage.*, vol. 187, pp. 424–435, 2017.
- [11] Poder Ejecutivo, *Reglamento para los Servicios de Alimentación al Público* No.37308-S. 2012. Recuperado de http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=73436&nValor3=90132&strTipM=TC
- [12] X. He, F. L. de los Reyes, and J. J. Ducoste, "A critical review of fat, oil, and grease (FOG) in sewer collection systems: Challenges and control", *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, vol. 47, no. 13, pp. 1191–1217, 2017.
- [13] J. Rojas, "Evaluación de los residuos de las trampas de grasa de los lodos provenientes de las sodas de la Universidad Nacional mediante técnica de compostaje enzimático para su posterior aprovechamiento como enmienda orgánica", Tesis de Maestría, Universidad Nacional, Heredia, 2019.
- [14] D. K. Grgić, M. V. Domanovac, T. Domanovac, M. Šabić, M. Cvetnić, and V. O. Bulatović, "Influence of *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas aeruginosa* BSW and Clinoptilolite Addition on the Biowaste Composting Process," *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 44, no. 6, pp. 5399–5409, 2019.
- [15] G. R. Lemus, A. K. Lau, R. M. R. Branion, and K. V. Lo, "Bench-scale study of the biodegradation of grease trap sludge with yard trimmings or synthetic food waste via composting," *J. Environ. Eng. Sci.*, vol. 3, no. 6, pp. 485–494, 2004.

- [16] H. Jördenin, and J. Winter, *Environmental Biotechnology: Concepts and Applications*, Alemania: Editorial WILEY-VCH VerlagGmbH., Co. KGaA, Weinheim, 2005, pp. 333-354.
- [17] A. Azhdarpoor, B. Mortazavi, and G. Moussavi, "Oily wastewaters treatment using *Pseudomonas* sp. isolated from the compost fertilizer," *J. Environ. Heal. Sci. Eng.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–7, 2014.
- [18] L. Ruggieri, A. Artola, T. Gea, and A. Sánchez, "Biodegradation of animal fats in a co-composting process with wastewater sludge," *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, vol. 62, no. 3, pp. 297–303, 2008.
- [19] J. Aikaite-Stanaitiene, S. Grigiskis, D. Levisauskas, V. Cipinyte, E. Baskys, and V. Kackyte, "Development of fatty waste composting technology using bacterial preparation with lipolytic activity," *J. Environ. Eng. Landsc. Manag.*, vol. 18, no. 4, pp. 296–305, 2010.
- [20] J. Alfonso, M. Carpinteyro, A. Vélez and A. Teón, "Obtención de un biofertilizante a partir de lodos provenientes de trampas de grasa," vol. 4, no. 13, pp. 46–57, 2017.
- [21] M. Tzirita, S. Papanikolaou, and B. Quilty, "Enhanced fat degradation following the addition of a *Pseudomonas* species to a bioaugmentation product used in grease traps," *J. Environ. Sci. (China)*, vol. 77, pp. 174–188, 2019.
- [22] P. Lauprasert, J. Chansirattana, and J. Paengjan, "Effect of Selected Bacteria As Bioremediation on the Degradation of Fats Oils and Greases in Wastewater From Cafeteria Grease Traps," *Eur. J. Sustain. Dev.*, vol. 6, no. 2, pp. 181–186, 2017.

Evaluación del desempeño en seguridad laboral en proyectos de construcción del Banco Mundial: caso TEC Costa Rica¹

Evaluation of work safety performance in World Bank construction projects: case TEC Costa Rica

Gabriela Hernández-Gómez², Gabriela Morales-Martínez³,
María G. Rodríguez-Zamora⁴

Fecha de recepción: 19 de enero de 2020

Fecha de aprobación: 14 de junio de 2020

Hernández-Gómez, G; Morales-Martínez, G;
Rodríguez-Zamora, M.G. Evaluación del desempeño en seguridad laboral en proyectos de construcción del Banco Mundial: caso TEC Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-2. Abril-Junio 2021. Pág 23-36.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i2.4845>



- 1 Los autores recibieron financiamiento de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica (5402-1353-3001).
- 2 Profesora e Investigadora, Máster en Administración de Proyectos, Escuela de Ingeniería en Seguridad Laboral e Higiene Ambiental, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: gabriela.hernandez@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-8863-2368>
- 3 Profesora e Investigadora, Máster en Gestión de Proyectos, Escuela de Ingeniería en Seguridad Laboral e Higiene Ambiental, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: gmorales@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-0120-5588>
- 4 Profesora e Investigadora, Máster en Salud Ocupacional, Escuela de Ingeniería en Seguridad Laboral e Higiene Ambiental, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: garodriguez@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-8852-5976>

Palabras clave

Accidentes de trabajo; capacitación; industria de la construcción; seguridad, salud laboral.

Resumen

El sector construcción históricamente ha registrado en el mundo la tasa más alta de accidentes, lesiones incapacitantes y muertes. Los objetivos de este estudio fueron: (i) evaluar el desempeño de los contratistas de seis construcciones de edificios completos en el Instituto Tecnológico de Costa Rica, financiados por el Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento, y supervisados por el cliente, a través de la Salvaguarda Ambiental y Social; (ii) proponer una metodología de evaluación del desempeño en seguridad laboral. Se analizó si: (i) el número total de accidentes disminuía conforme aumentaba la cantidad de procedimientos de seguridad laboral; (ii) existía asociación entre la cantidad de procedimientos y las capacitaciones brindadas; (iii) disminuía el índice de incidencia de accidentes al incrementarse el número de capacitaciones; (iv) el cumplimiento en aspectos de seguridad laboral se afectaba por el área de construcción, cantidad de procedimientos, índice de incidencia de accidentabilidad y años de experiencia del profesional a cargo. Los hallazgos ratifican el rol del cliente en la gestión de la seguridad laboral y su impacto positivo sobre el desempeño de los contratistas. De forma paralela, se presenta una propuesta metodológica para la evaluación del desempeño, aplicable a proyectos de construcción de esta naturaleza.

Keywords

Accidents at work; training; construction industry; safety; occupational health.

Abstract

The construction sector has historically registered in the world the highest rate of accidents, disabling injuries and deaths. The objectives of this study were: (i) to evaluate the performance of the contractors of six complete building constructions at the Technological Institute of Costa Rica, financed by the International Bank for Reconstruction and Development, and supervised by the client, through the Environmental and Social Safeguard; (ii) propose a performance evaluation methodology in occupational safety. It was analyzed if: (i) the total number of accidents decreased as the number of occupational safety procedures increased; (ii) there was an association between the number of procedures and the training provided; (iii) the accident incidence rate decreased as the number of trainings increased; (iv) compliance in aspects of occupational safety was affected by the construction area, number of procedures, accident rate and years of experience of the professional in charge. The findings confirm the client's role in the management of occupational safety and its positive impact on the performance of contractors. In parallel, a methodological proposal is presented for performance evaluation, applicable to construction projects of this nature.

Introducción

La industria de la construcción tiene un papel fundamental a nivel mundial en el aumento de la economía; sin embargo, históricamente registra la tasa más alta de accidentes entre las industrias [1], [2] y la mayor tasa de lesiones incapacitantes y muertes [3]. Los accidentes de trabajo pueden generarse por causas inmediatas, que están conformadas por actos inseguros (falta de conocimientos o de formación, por error de juicio, descuido, apatía o imprudencia de los trabajadores) y condiciones inseguras (deficientes condiciones del lugar de trabajo, falta

de supervisión en seguridad laboral y de medios para llevar a cabo la tarea con seguridad); y causas básicas, que están integradas por factores personales (hábitos de trabajo incorrectos) y factores del trabajo (supervisión y liderazgo deficiente, planificación y ejecución inadecuada de la obra) [4]. Un accidente de trabajo tiende a ser el resultado de la desafortunada combinación de factores y circunstancias, que repercute negativamente en la economía del país y de las empresas, al involucrar el pago de indemnizaciones por concepto de absentismo laboral, incapacidades y atención médica, disminución en la productividad y en la motivación del personal [5], [6].

Por la naturaleza dinámica del sector construcción, éste se considera como una industria peligrosa debido a la descentralización y movilidad de los trabajadores, ya que el sitio donde se llevan a cabo los procesos productivos cambia frecuentemente de ubicación e implica que los empleados cambien de empresa constructora con mayor frecuencia que los de otras industrias. En consecuencia, el desempeño en seguridad laboral del sector construcción se ve afectado por la variabilidad de las operaciones, el carácter transitorio, el corto plazo de las construcciones, la falta de un ambiente de trabajo controlado, la inminente rotación del personal, la poca o nula especialización o tecnicidad de los oficios, y la diversidad de tamaño de las organizaciones [7].

En este contexto, existe un aumento en la necesidad de desarrollar e implementar programas escritos de seguridad laboral para todos los lugares de trabajo, que conllevarían a una disminución de los accidentes e incidentes ocupacionales que resultan en lesión, enfermedad o daño a la propiedad [8], [9]. En un estudio previo se establecieron siete factores críticos que pueden representar el 80 % de la implementación exitosa de programas de seguridad laboral en las empresas de construcción: (i) apoyo a la gestión, (ii) objetivos claros y razonables, (iii) actitud correcta hacia la seguridad, (iv) trabajo en equipo, (v) aplicación efectiva, (vi) capacitación en seguridad y (vii) supervisión adecuada [3].

A pesar de que la responsabilidad legal y directa de la seguridad laboral de los proyectos de construcción es de la empresa ejecutora, actualmente se está resaltando el papel relevante del propietario del inmueble y de los subcontratistas en la prevención de los accidentes, lo cual se puede lograr imponiendo requerimientos de seguridad en los contratos y supervisando meticulosamente su posterior cumplimiento [10].

En el ámbito centroamericano, se desconoce la existencia de una metodología que permita al cliente (i) auditar el rendimiento en seguridad laboral del contratista a cargo del proyecto de construcción y (ii) generar registros históricos de su desempeño, que sirva posteriormente como criterio de selección adicional para la adjudicación de los contratos, más allá de las variables tradicionales de costo, tiempo y alcance [11].

En el caso particular del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), universidad estatal, se ejecutaron 10 iniciativas de infraestructura, enmarcadas dentro del Plan de Mejoramiento Institucional (PMI) y financiadas con recursos del Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento (BIRF) o Banco Mundial (BM). La Salvaguarda Ambiental y Social, adscrita a la Unidad Coordinadora del Proyecto Institucional (UCPI), era la responsable de supervisar y auditar la seguridad ocupacional de estos proyectos de construcción de edificios completos [12], en los que, por primera vez a nivel institucional, la participación del propietario del inmueble se amplió, al involucrarse proactivamente en promover acciones a favor de la seguridad laboral en las obras, como parte del marco definido por el BM a la universidad en las negociaciones del préstamo. Debido a que el recurso más valioso que se administra en la construcción es el humano, los objetivos de este estudio fueron: (i) evaluar el desempeño en seguridad laboral de los contratistas del TEC a cargo de los proyectos de construcción PMI-BM, a la luz de la incorporación del cliente en la supervisión de la seguridad de los trabajadores de las obras; y

(ii) proponer una metodología de evaluación del desempeño de las constructoras, que aporte información histórica de las empresas que pueda consultarse previo a la adjudicación de los contratos administrativos.

Materiales y Métodos

La investigación fue de tipo descriptiva con una duración de dos años (2015-2016). La selección de la muestra se hizo considerando como marco poblacional seis edificaciones del TEC, englobadas en el Proyecto de Mejoramiento Institucional, financiado con fondos del Banco Mundial. De las 10 iniciativas de infraestructura iniciales, se excluyeron cuatro proyectos, cuya fecha de inicio y ejecución estuvo fuera del período de estudio.

Tres de los proyectos de construcción se ubicaron en la sede central de la universidad, en la provincia de Cartago, uno en el Centro Académico de San José y el último en la Sede Regional de San Carlos en Alajuela. Cabe destacar que dos de los edificios de la muestra se licitaron en un solo cartel, por lo que se construyeron por la empresa adjudicataria del contrato, siendo el caso que para este estudio se consideraron ambas obras como un único proyecto. Las iniciativas de infraestructura se codificaron para resguardar la confidencialidad de las empresas con la sigla PBM (Proyecto Banco Mundial) y un consecutivo de números arábigos.

La primera parte de esta sección contiene las herramientas de diagnóstico que permitieron recopilar la información necesaria para llevar a cabo el análisis estadístico de los datos, cuyos resultados se retomarán más adelante.

Herramientas de diagnóstico

Revisión de fuentes

La revisión de fuentes incluyó: (i) los procedimientos de seguridad laboral implementados por los contratistas en los proyectos de construcción (que conformaban el Programa de Seguridad Ocupacional de cada iniciativa de infraestructura, integrado en el Plan de Manejo Ambiental presentado al inicio de cada proyecto), (ii) los registros de capacitaciones de seguridad laboral, (iii) los reportes de accidentes y (iv) los registros de las planillas del personal del ciclo de vida de los proyectos. Esta información era parte de los requerimientos cartelarios aceptados por los contratistas, quienes debían presentarla mensualmente a la Salvaguarda Ambiental y Social. Se contó con los planos arquitectónicos desarrollados por la Oficina de Ingeniería del TEC para determinar las áreas de construcción de las obras.

La cantidad de accidentes absolutos se definió a partir de los informes mensuales de gestión ambiental y salud ocupacional presentados a la Salvaguarda Ambiental y Social, los cuales incluían los reportes de investigación. El estudio de la accidentabilidad se efectuó con los datos de 19 meses del PBM01, 21 meses del PBM02, 18 meses del PBM03, 14 meses del PBM04 y 13 meses del PBM05. Dicho estudio también incluyó una clasificación de los accidentes para determinar el tipo de lesión y su frecuencia.

La cantidad de capacitaciones también se definió en los mismos períodos antes mencionados, considerando únicamente el número de temas mensuales enfocados en seguridad laboral. A partir del listado de capacitaciones, se realizó un control cruzado para determinar la existencia de correspondencia o no entre los procedimientos de seguridad laboral identificados y los temas impartidos en las capacitaciones de cada proyecto.

Lista de verificación

Para el diseño de la lista de verificación de aspectos de seguridad laboral, se revisaron fuentes bibliográficas relacionadas con el tema en estudio, entre ellas: estándares OSHA de seguridad en construcción y reglamentación costarricense aplicable. A partir de esta revisión, se creó una herramienta compuesta por 227 ítems divididos en 23 apartados.

Este instrumento se validó en un proyecto de construcción de un edificio del campus universitario, con características similares a los edificios que conformaron la muestra, lo que permitió realizar los ajustes respectivos a fin de evitar errores producidos por el observador.

La lista de verificación de aspectos de seguridad laboral se aplicó en distintas etapas del ciclo de vida de las obras, con al menos un mes de separación entre cada aplicación: en los proyectos PBM01, PBM02 y PBM03 se aplicó cuatro veces, mientras que en PBM04 y PBM05 sólo tres veces. Esta herramienta permitió registrar conformidades y no conformidades en los proyectos, a fin de obtener porcentajes de cumplimiento de seguridad laboral en tres líneas: (i) por proyecto, (ii) por día de aplicación y (iii) por apartado. En este estudio se tomó como referencia para calificar una obra de construcción con bajo rendimiento los resultados iguales o inferiores a 75 %.

Entrevistas semiestructuradas

Se aplicaron dos entrevistas semiestructuradas a los responsables de seguridad laboral de cada proyecto de construcción, quienes laboraban a tiempo completo. La primera entrevista iba dirigida a conocer la existencia, cantidad y temas de los procedimientos de seguridad laboral aplicados en las obras, mientras que la segunda entrevista se enfocó en recopilar información acerca de la formación base y experiencia de estos profesionales.

Análisis estadístico

Se determinó el índice de incidencia de accidentes del primer año como la cantidad de accidentes reportados por cada mil trabajadores expuestos. El primer año se definió a partir de la fecha de orden de inicio de las obras.

Se realizaron correlaciones de Spearman asociando los siguientes datos obtenidos de cada proyecto: (i) cantidad de procedimientos de seguridad laboral y número total de accidentes, (ii) cantidad de procedimientos de seguridad laboral y número de capacitaciones impartidas, (iii) número de capacitaciones e índice de incidencia en el primer año, (iv) porcentajes de cumplimiento en aspectos de seguridad laboral y área de construcción, (v) cantidad de procedimientos de seguridad laboral y porcentajes de cumplimiento, (vi) porcentajes de cumplimiento e índice de incidencia del primer año, y (vii) porcentajes de cumplimiento y años de experiencia del profesional de seguridad laboral.

Resultados

En este estudio, el concepto de desempeño en seguridad laboral se definió a partir de las variables establecidas en el cuadro 1, indispensables para realizar las correlaciones.

En la figura 1, se presenta la distribución mensual del personal que laboró en cada obra de construcción, donde se observa que PBM02 necesitó más trabajadores a lo largo del ciclo de vida de ejecución de la obra (proyecto con la mayor área constructiva), en contraposición con PBM03, que fue el que menos personal requirió (proyecto con la menor área constructiva).

Cuadro 1. Información recolectada de los proyectos de construcción BM-TEC.

Proyecto	Procedimientos de seguridad (n)	Accidentes (n)	Capacitaciones (n)	Índice de incidencia de accidentabilidad ^a	Área de construcción (m ²)	Cumplimiento promedio por proyecto (%)	Experiencia del profesional de seguridad laboral (años)
PBM01	1	23	97	169	6532	89,5	7
PBM02	8	14	43	62	9402	90,8	7
PBM03	13	7	66	142	1500	81,9	18
PBM04	7	17	69	279	2115	90,7	6
PBM05	14	4	12	59	2200	92,4	8

^a Datos del primer año de cada proyecto.

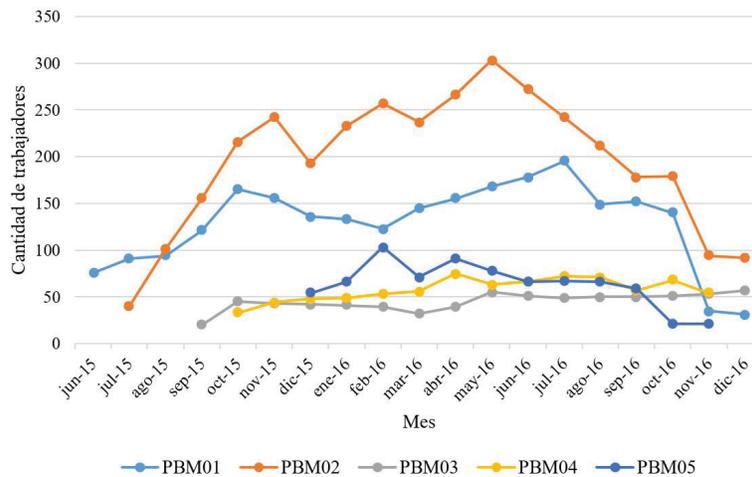


Figura 1. Distribución mensual de trabajadores por proyecto de construcción.

Asociación entre la cantidad de procedimientos y la accidentabilidad

La cantidad de procedimientos de seguridad laboral se asoció inversamente con el número total de accidentes ($r=-0,99$; $p<0,01$).

De acuerdo con la figura 2, claramente se evidencia que los golpes fueron el tipo de lesión que se presentó con mayor frecuencia en los proyectos de construcción (ocho en PBM01, cinco en PBM02, tres en PBM03 y dos en PBM04), seguido por caída a nivel (cuatro en PBM01, dos en PBM02, uno en PBM03 y tres en PBM04) y lesión lumbar (cinco en PBM01, uno en PBM04 y uno en PBM05).

También hubo accidentes que ocurrieron sólo una vez, como aplastamiento, fractura y trauma por impacto (todos en PBM02), electrocución (PBM03) y torcedura de tobillo (PBM04).

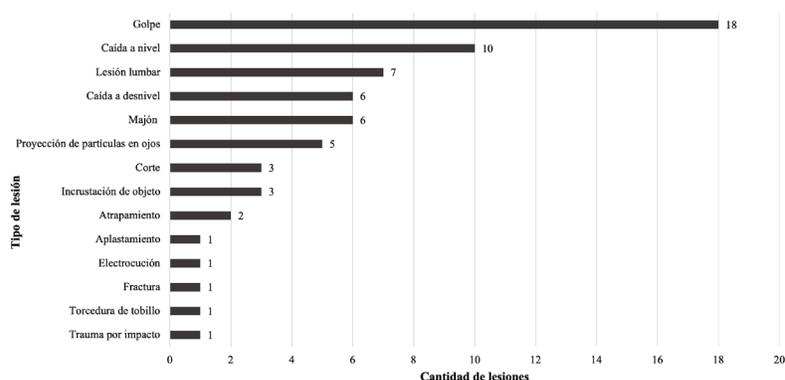


Figura 2. Cantidad de accidentes por tipo de lesión.

Asociación entre la cantidad de procedimientos y de capacitaciones impartidas

No hubo asociación significativa entre la cantidad de procedimientos de seguridad y la cantidad de capacitaciones impartidas al personal ($r=-0,78$; $p=0,12$).

En el cuadro 2 se muestra el número de temas de seguridad laboral incluidos en las capacitaciones, donde PBM03 y PBM04 lideraron en cantidad (ambos proyectos fueron ejecutados por la misma empresa). La duración de las capacitaciones varió considerablemente entre los proyectos de construcción, así como el número de procedimientos abordados en las capacitaciones.

Cuadro 2. Cantidad de procedimientos de seguridad laboral abordados en temas de capacitación y rango de duración.

Proyecto	Temas de capacitación en seguridad laboral (n)	Intervalo de duración de las capacitaciones en temas de seguridad laboral (min)	Procedimientos abordados en las capacitaciones (n)	Procedimientos no abordados en las capacitaciones (n)
PBM01	4	15-284	1	0
PBM02	4	45-387	1	7
PBM03	10	41-290	3	10
PBM04	9	15-30	4	3
PBM05	1	60	1	13

La capacitación de primeros auxilios básicos fue la de mayor duración (impartida en PBM02 dos veces a seis colaboradores y en PBM03 una sola vez a ocho personas). En PBM03, el uso de extintores fue la capacitación de menor duración (impartido dos veces a seis colaboradores), en tanto que en PBM04 fue el tema que requirió más tiempo (dado una vez a quince personas). En PBM01 el tema de menor duración fue la preparación previa al simulacro (impartido una vez a 44 personas), mientras que la inducción de ingreso de personal nuevo fue la capacitación de más duración (brindada 26 veces a 184 personas en total). En PBM03, la planificación de actividades con seguridad fue el tema de menor duración (dado dos veces a 16 trabajadores), en tanto que en PBM04 fue el de prevención de riesgos eléctricos en construcción (impartido una vez a 26 personas). En PBM05 la única capacitación fue la de manejo seguro de sustancias químicas (impartida una vez a dos trabajadores).

Asociación entre las capacitaciones brindadas y el índice de incidencia de accidentes

Se halló una correlación positiva entre el número de capacitaciones y el índice de incidencia de accidentabilidad del primer año ($r=0,89$; $p=0,04$).

Asociaciones de los porcentajes de cumplimiento en seguridad laboral con las dimensiones de los proyectos, cantidad de procedimientos e índice de incidencia de accidentabilidad

El cuadro 3 resume por proyecto el cumplimiento en aspectos de seguridad laboral obtenido de las evaluaciones en cada visita a través de la lista de verificación. Cabe destacar que PBM03 reportó los porcentajes de cumplimiento más bajos en comparación con el resto de los proyectos, cuyos resultados oscilaron entre 74,4 % - 96,2 %.

Cuadro 3. Cumplimiento en aspectos de seguridad laboral de los proyectos por visita.

	Proyecto				
	PBM01	PBM02	PBM03	PBM04	PBM05
Cumplimiento de aspectos de seguridad laboral por visita (%)	83,3	93,0	74,4	93,3	96,2
	84,5	95,3	88,7	86,1	93,1
	93,5	92,7	84,5	93,0	88,0
	94,6	82,4	79,5	--	--

En la figura 3 se muestra el comportamiento de los proyectos de construcción en cuanto al cumplimiento promedio en seguridad laboral de los 23 apartados de la lista de verificación. Se presentaron tendencias similares en los resultados de aspectos como: gestión de la obra, manejo manual de cargas, extintores portátiles, señalización, equipo de protección personal (EPP), sistemas de protección para caída de objetos, trabajos en altura, andamios móviles y fijos, escaleras fijas, grúas, zanjas y excavaciones.

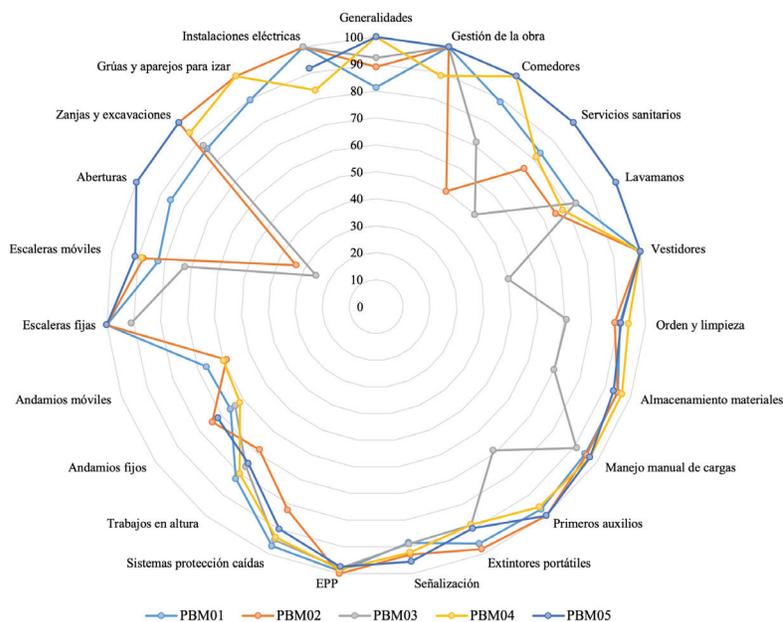


Figura 3. Porcentajes de cumplimiento promedio en seguridad laboral de los proyectos por apartado.

Se obtuvieron correlaciones débiles al asociar (i) porcentajes de cumplimiento promedio en aspectos de seguridad laboral y áreas de construcción ($r=0,34$), (ii) cantidad de procedimientos y porcentajes de cumplimiento promedio ($r=-0,24$) y (iii) porcentajes de cumplimiento promedio e índice de incidencia del primer año ($r=-0,12$).

Asociación entre los porcentajes de cumplimiento de seguridad laboral y los años de experiencia del profesional a cargo

Se identificó asociación inversa entre los porcentajes de cumplimiento promedio en aspectos de seguridad laboral y los años de experiencia del profesional de seguridad laboral ($r=-0,94$; $p= 0,02$).

Discusión

A continuación, se discuten los resultados más relevantes del estudio, en donde los procedimientos de seguridad laboral tuvieron un papel fundamental en la disminución de la accidentabilidad ocupacional de los proyectos de construcción.

Asociación entre la cantidad de procedimientos y la accidentabilidad

El análisis estadístico de los datos evidenció una asociación inversa entre la cantidad de procedimientos de seguridad laboral y el número total de accidentes, siendo así que aquellos proyectos que contaron con más procedimientos fueron los que presentaron menor accidentabilidad, por lo que es necesario que las empresas constructoras cuenten con documentación en materia de seguridad laboral que brinde pautas para desarrollar procesos productivos bajo estándares establecidos en normativa y documentación vigente [3]. Lo anterior se respalda porque entre los proyectos de construcción estudiados, el PBM01 presentó más accidentes ($n=23$) y solamente un procedimiento de seguridad laboral; a diferencia de PBM05, que tuvo menor accidentabilidad ($n=4$) y mayor cantidad de procedimientos ($n=14$).

Asociación entre la cantidad de procedimientos y de capacitaciones impartidas

Hubo una tendencia inversa, pero no significativa, entre la cantidad de procedimientos de seguridad laboral y las capacitaciones impartidas, que podría explicarse debido a la existencia de vasta documentación escrita que no fue necesariamente traducida en capacitaciones y la presencia de procedimientos no acordes a las realidades identificadas en las construcciones. A lo largo del ciclo de vida de los proyectos se presentaron modificaciones de diseño o selección de otros procesos constructivos, cuyas alteraciones debieron haber obligado a los profesionales de seguridad laboral a ajustar y actualizar la documentación, a fin de atender nuevas necesidades u omisiones, pero en la práctica no se ejecutó este proceso iterativo de mejora continua.

Dentro del Plan de Manejo Ambiental de cada proyecto de construcción, estaba definido el Programa de Seguridad Ocupacional, compuesto por procedimientos en el área establecidos por los profesionales de seguridad laboral de cada empresa, como una herramienta para la administración de la obra. La entrega de este documento a la Salvaguarda Ambiental y Social, previo a la fecha de inicio de obra, estaba definido en el cartel de licitación, ya que sin este requisito el cliente no daba su aprobación para comenzar el proyecto. Se pidió a los profesionales de seguridad laboral la revisión y actualización periódica de la documentación; no obstante, solamente PBM02 cumplió con esta solicitud, al final del primer año de ejecución del proyecto (mitad del término de la obra de construcción).

En lo concerniente a las capacitaciones, PBM01 fue el que registró mayor cantidad ($n=97$), a pesar de haber contado con un único procedimiento durante el ciclo de vida del proyecto, como

se mencionó anteriormente; en contraposición con PBM05 que tuvo menos capacitaciones ($n=12$) y presentó la mayor cantidad de procedimientos ($n=14$). Es importante indicar que el profesional de seguridad laboral de PBM01 estaba enfocado en trasladarle conocimiento al trabajador, en lugar de generar documentación para la empresa, ya que fue contratado exclusivamente para cumplir con un requisito cartelario (al igual que los profesionales de PBM02, PBM03 y PBM04) y el procedimiento que elaboró era para la grúa torre, que requería de medidas de seguridad especiales. En el caso del profesional de PBM05, éste generó distintos procedimientos a lo largo de los tres años laborados para la misma empresa, que no tradujo en capacitaciones para el personal, por lo que su esfuerzo quedó restringido sólo a documentar.

Cabe destacar la poca correspondencia entre la cantidad de procedimientos de seguridad laboral y los temas abordados en las capacitaciones, ya que existieron temas sin vínculo a ningún procedimiento de seguridad laboral, y viceversa. En PBM02, PBM03, PBM04 y PBM05 quedaron procedimientos sin atender en las capacitaciones, cuyo caso crítico fue PBM05 que sólo brindó un tema de capacitación asociado a un procedimiento, quedando 13 procedimientos sin ninguna capacitación.

Es importante señalar que el profesional de seguridad laboral de cada proyecto era responsable de: (i) identificar los temas de capacitación, (ii) establecer su duración y (iii) definir su frecuencia; por ende, el número de capacitaciones y temas abarcados en éstas varió entre cada obra de construcción, por lo que no existió concordancia entre los procedimientos de seguridad laboral documentados y las necesidades de capacitación detectadas en campo. La duración de los temas de capacitación de seguridad laboral varió considerablemente entre los proyectos de construcción, así como el número de personas que asistieron a las mismas y la cantidad de veces que se impartió determinado tema.

Asociación entre las capacitaciones brindadas y el índice de incidencia de accidentes

Se presentó asociación significativa entre el número de capacitaciones y el índice de incidencia de accidentabilidad en el primer año, siendo así que a mayor cantidad de capacitaciones también aumentaba el índice de incidencia, lo que podría evidenciar que las capacitaciones no aportaron el impacto positivo requerido en los trabajadores, ya que los temas de capacitación no respondieron a la información contenida en los procedimientos de seguridad laboral de los proyectos, como se comentó anteriormente. En consecuencia, los temas de capacitación deberían seleccionarse, entre otros aspectos, a partir de necesidades detectadas en los sitios de trabajo e innovaciones en los procesos constructivos, que conllevarían a riesgos que no fueron contemplados.

A partir de información más reciente, aportada por el Consejo de Salud Ocupacional (CSO) para el año 2018, el índice de incidencia en la subactividad económica denominada construcción de edificios completos fue de 225,7. En el presente estudio, únicamente PBM04 sobrepasó el índice registrado por esta entidad (279), a pesar de haber sido el segundo proyecto de construcción en impartir más capacitaciones, aunque de baja duración; en tanto que PBM01 fue el que brindó más capacitaciones, pero presentó el segundo índice de incidencia más alto (segundo lugar en área constructiva y mano de obra contratada).

Por otro lado, los índices de incidencia más bajos se presentaron en PBM02 (en primera posición en cuanto a área de construcción y cantidad de trabajadores) y PBM05 (en tercer puesto en área constructiva y cuarto en empleo de mano de obra), que estuvieron en los últimos dos puestos en cuanto a cantidad de capacitaciones impartidas a trabajadores.

Asociaciones de los porcentajes de cumplimiento en seguridad laboral con las dimensiones de los proyectos, cantidad de procedimientos e índice de incidencia de accidentabilidad

Se hallaron comportamientos similares entre los proyectos de construcción en 12 de los 23 apartados evaluados con la lista de verificación. Los aspectos donde las empresas tuvieron bajo rendimiento fueron trabajos en alturas, andamios móviles y fijos; por lo que, para futuras contrataciones, el TEC deberá solicitar al contratista reforzar los procedimientos de seguridad laboral y las capacitaciones de estos aspectos en las obras de construcción.

En lo referente a gestión de la obra, manejo manual de cargas, extintores portátiles, señalización, EPP, sistemas de protección para caída de objetos, escaleras fijas, grúas, zanjas y excavaciones, los proyectos de construcción en estudio presentaron porcentajes de cumplimiento superiores a 85, lo que demostró que hubo más seguimiento y control de estos aspectos por parte de los profesionales de seguridad laboral.

Por otro lado, también hubo resultados de cumplimiento dispares entre los proyectos de construcción, con diferencias incluso de 75 %, en áreas como comedores, servicios sanitarios, lavamanos, vestidores, orden y limpieza, almacenamiento de materiales, primeros auxilios, escaleras móviles, aberturas en piso e instalaciones eléctricas; que requerirán necesariamente incrementar control y supervisión de los mismos. El aspecto de aberturas en piso fue el que tuvo las calificaciones más bajas reportadas (33 % en PBM02 y 25 % en PBM03).

Se presentó una asociación débil entre porcentajes de cumplimiento en aspectos de seguridad laboral y áreas de construcción, a pesar de que la tendencia esperada era que la exposición a riesgos ocupacionales hubiese sido mayor conforme aumentaran los metros cuadrados de construcción.

También hubo correlación débil entre la cantidad de procedimientos y los porcentajes de cumplimiento en aspectos de seguridad laboral. Los datos recopilados dejaron entrever que, a mayor cantidad de procedimientos, el cumplimiento con los aspectos de la lista de verificación era menor. Los procedimientos en sí documentan la forma segura de realizar las actividades involucradas en los procesos constructivos; lo ideal hubiese sido que, a mayor cantidad de procedimientos, existiese un mejor desempeño en la seguridad laboral de las obras; por el contrario, en los proyectos estudiados, los profesionales responsables de la seguridad laboral no acertaron en el seguimiento y control de las especificaciones definidas en los procedimientos y tampoco llevaron a cabo la actualización de la documentación requerida para la gestión de la salud ocupacional de la obra, a la luz de las necesidades detectadas en su entorno de trabajo.

De la misma forma, se obtuvo una asociación débil entre los porcentajes de cumplimiento en aspectos de seguridad laboral y el índice de incidencia de accidentabilidad del primer año; a pesar de que los proyectos mostraron un rendimiento aceptable en seguridad laboral e índices de incidencia inferiores al reportado por el CSO para este sector (excepto en PBM04) [13].

Asociación entre los porcentajes de cumplimiento de seguridad laboral y los años de experiencia del profesional a cargo

Se encontró una correlación inversa entre los porcentajes de cumplimiento y los años de experiencia del profesional de seguridad laboral designado en las obras de construcción. Se esperaba, por el contrario, que el cumplimiento en aspectos de seguridad laboral estuviera influenciado positivamente en función de la experiencia acumulada por el profesional, quien aportaría su conocimiento en la prevención de los riesgos. Un caso particular se presentó en PBM03, cuyo profesional contaba con más de 10 años de experiencia, en comparación con los demás profesionales de los otros proyectos, y presentó los porcentajes de cumplimiento más bajos en las aplicaciones de la lista de verificación (74,4 % y 79,5 %), lo que demostró que los

años de experiencia del profesional, no garantizaban el éxito de la gestión en seguridad laboral, sino que hubo otras variables que podrían explicar estos resultados y que no se incluyeron en este estudio.

Es importante aclarar que la inclusión del cliente en las iniciativas de infraestructura financiadas con recursos del BM, a pesar de haberse planteado inicialmente como un requisito para atender una solicitud del prestamista, fue el primer paso para demostrar a nivel institucional el papel trascendental de la seguridad laboral en las obras de construcción. Antes de la ejecución de esta serie de iniciativas de infraestructura, el TEC ha desarrollado obras de remodelación, ampliación y construcción sin especificaciones de seguridad laboral claras a nivel de los carteles de licitación, que condicione a los contratistas a incorporar en sus equipos de trabajo a un profesional en seguridad laboral a cargo de la obra, y sin una estricta supervisión por parte del propietario del inmueble, a través de un equipo de profesionales en la disciplina que sean contraparte de la empresa y velen por los intereses de la institución.

Los hallazgos obtenidos en la evaluación del desempeño de los contratistas obedecen a la gestión de la seguridad laboral del TEC, a través de la Salvaguarda Ambiental y Social, y ratifican el rol del cliente en la prevención de accidentes y su impacto positivo para la obtención de buenos rendimientos de seguridad laboral en las empresas a cargo de los proyectos de construcción PMI-BM.

La propuesta metodológica de evaluación del desempeño en seguridad laboral se presenta en el apéndice 1, la cual podría ser de utilidad para otras instituciones que contraten obras de esta índole y deseen analizar el rendimiento de las empresas. Se hace hincapié en que las variables que soportan esta metodología responden a algunos de los datos recopilados de las constructoras, por lo que se abre la posibilidad para que otros investigadores adicione aspectos que complementen el concepto de desempeño.

Agradecimientos

Se reconoce con gratitud la apertura de las empresas constructoras que participaron en el estudio, a través de sus profesionales en seguridad laboral. Los autores también agradecen el apoyo del Lic. David Benavides Ramírez, Coordinador de la Salvaguarda Ambiental y Social de la UCPI al momento de la investigación.

Referencias

- [1] R. G. Solís-Carcaño y A. R. Sosa-Chagoyán, «Gestión de riesgos de seguridad y salud en trabajos de construcción», *Rev. Educ. En Ing.*, vol. 8, n.º 16, pp. 161-175, 2013.
- [2] V. Sousa, N. M. Almeida, y L. A. Dias, «Risk-based management of occupational safety and health in the construction industry—Part 1: Background knowledge», *Saf. Sci.*, vol. 66, pp. 75-86, 2014.
- [3] S. Al Haadir y K. Panuwatwanich, «Critical success factors for safety program implementation among construction companies in Saudi Arabia», *Procedia Eng.*, vol. 14, pp. 148-155, 2011.
- [4] A. González, J. Bonilla, M. Quintero, C. Reyes, y A. Chavarro, «Análisis de las causas y consecuencias de los accidentes laborales ocurridos en dos proyectos de construcción», *Rev. Ing. Constr.*, vol. 31, n.º 1, pp. 05-16, 2016.
- [5] M. Curbelo-Martínez, D. Pérez-Fernández, y R. Gómez-Dorta, «Procedimiento para el análisis de la accidentalidad laboral con énfasis en modelos matemáticos», *Ing. Ind.*, vol. 36, n.º 1, pp. 17-28, 2015.
- [6] K. Acevedo González y M. Yáñez Contreras, «Costos de los accidentes laborales: Cartagena-Colombia, 2009-2012», *Cienc. Psicológicas*, vol. 10, n.º 1, pp. 31-41, 2016.
- [7] Ó. Rodríguez, «Construcción y agro registran la mayoría de accidentes laborales», *La Nación, Grupo Nación*, San José, Costa Rica, jul. 16, 2016.
- [8] C. D. Reese, *Occupational health and safety management: a practical approach*. CRC press, 2018.

- [9] R. Moreira, M. Morejón, y D. Torres, «Adaptabilidad social y el éxito en la administración de seguridad industrial en obras de construcción civil», 2017.
- [10] J. A. Blázquez Román, «El marco jurídico en la prevención de riesgos laborales en el sector de la construcción: subcontratación y coordinación de actividades en las obras», *Proy. Investig.*, 2016.
- [11] K. H. Rose, «A guide to the project management body of knowledge (PMBOK® Guide)—Fifth Edition», *Proj. Manag. J.*, vol. 3, n.o 44, pp. e1-e1, 2013.
- [12] CONARE, «Marco de Gestión Ambiental y Social del Proyecto Mejoramiento de la Educación Superior (Proyecto N° P123146-CR)», Consejo Nacional de Rectores, jul. 2012. Accedido: ago. 25, 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.tec.ac.cr/sites/default/files/media/doc/marco_de_gestion_ambiental_y_social-pmes-costa_rica.pdf.
- [13] N. Sánchez y E. Ulloa, «Estadísticas de Salud Ocupacional, Costa Rica. Resumen, 2018.», Consejo de Salud Ocupacional, Costa Rica, 2019.

Apéndice

Apéndice 1. Metodología para la evaluación del desempeño

MÉTODOS	DATOS	RESULTADOS
Revisión documental de: Procedimientos de seguridad laboral Registros de capacitaciones Reportes de accidentes Planos arquitectónicos Registros de planillas	Procedimientos de seguridad laboral Registros de capacitaciones Reportes de accidentes Planos arquitectónicos Registros de planillas	(1) Cantidad procedimientos de seguridad laboral (2) Cantidad de capacitaciones (3) Cantidad de accidentes y clasificación por tipo de lesión (4) Áreas de construcción (5) Cantidad de trabajadores
Aplicación de lista de verificación de aspectos de seguridad laboral Cálculo de cumplimiento	Número de conformidades	Porcentajes de cumplimiento
Entrevistas semiestructuradas a profesionales de seguridad laboral	Experiencia en el sector construcción	Años de experiencia
Análisis estadístico	Cantidad de procedimientos de seguridad laboral Número total de accidentes	Asociación procedimientos de seguridad laboral y accidentabilidad
	Cantidad de procedimientos de seguridad laboral Número de capacitaciones impartidas	Asociación procedimientos de seguridad laboral y capacitaciones
	Número de capacitaciones impartidas Índice de incidencia de accidentabilidad	Asociación capacitaciones e índice de incidencia
	Porcentajes de cumplimiento en aspectos de seguridad laboral Áreas de construcción Cantidad de procedimientos Índice de incidencia	Asociaciones entre porcentajes de cumplimiento y áreas, procedimientos e índice de incidencia
	Porcentaje de cumplimiento en aspectos de seguridad laboral Años de experiencia del profesional de seguridad laboral	Asociación porcentajes de cumplimiento y años de experiencia

Aplicación del valor de tono de color directo para el control cromático del proceso de recubrimiento de tabletas farmacéuticas

Application of the spot color tone value at pharmaceutical tablet coating process control

Mac Arturo Murillo-Fernández¹, Ernesto Montero-Zeledón², Dionisio Gutiérrez-Fallas³, Manuel Melgosa-Latorre⁴, Jorge Pacheco-Molina⁵

Fecha de recepción: 26 de febrero de 2020
Fecha de aprobación: 23 de mayo de 2020

Murillo-Fernández, M.A; Montero-Zeledón, E; Gutiérrez-Fallas, D; Melgosa-Latorre, M; Pacheco-Molina, J. Aplicación del valor de tono de color directo para el control cromático del proceso de recubrimiento de tabletas farmacéuticas. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-2. Abril-Junio 2021. Pág 37-47.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i2.5016>



- 1 Escuela de Física, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: macarturo61@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-6913-3472>
- 2 Físico, Escuela de Física, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: emontero@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-4545-5805>
- 3 Físico, Escuela de Física, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: dgutierrez@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-7190-8858>
- 4 Físico, Departamento de Óptica, Universidad de Granada, España.
 <https://orcid.org/0000-0002-7226-4190>
- 5 Farmacéutico, Facultad de Farmacia, Universidad de Costa Rica. Costa Rica.

Palabras clave

Valor de Tono de Color Directo; Murray-Davies; Yule-Nielsen; CIEDE2000; *Poder de Dispersión*; *Kubelka Munk*.

Resumen

Se propone una aplicación novedosa de la fórmula SCTV (*Spot Color Tone Value*) proveniente de la industria de reproducción gráfica, para el control de la calidad del proceso de recubrimiento de tabletas farmacéuticas. Se analizan dos procedimientos: uno mediante la obtención de los espectros de reflectancia, de los cuales se pueden derivar los atributos cromáticos, y otro a partir de la obtención de las coordenadas de color de una imagen fotográfica calibrada. Nuestro objetivo es reducir la necesidad de intervención, extracción y destrucción de tabletas durante el control de calidad, además de facilitar el control y evaluación del proceso de forma remota, generando respuestas en tiempo real para la toma de decisiones.

Keywords

Spot Color Tone Value; Murray-Davies; Yule-Nielsen; CIEDE2000; *Scattering Capability*; *Kubelka Munk*.

Abstract

A novel application of the SCTV (Spot Color Tone Value) formula from the graphic reproduction industry is proposed for the quality control of the pharmaceutical tablet coating process. Two procedures are analyzed: one by obtaining reflectance spectra, from which the chromatic attributes can be derived, and the other from obtaining the color coordinates of a calibrated photographic image. Our goal is to reduce the intervention, extraction and destruction of tablets during quality control, as well as simplify the control and evaluation of the process remotely, generating real-time responses for taking decisions.

Introducción

Tradicionalmente, la valoración del tono en el proceso de impresión en la industria gráfica se ha realizado a través de las conocidas fórmulas del porcentaje de tono y ganancia de punto de Murray-Davies (M-D) [1] y de Yule-Nielsen (Y-N) [2], o sus modificaciones cromáticas propuestas por Neugebauer [3]. Sin embargo, el uso de la fórmula SCTV (*Spot Color Tone Value*) se ha convertido muy recientemente en la base del estándar internacional ISO-20654 para el control de la impresión a color en la industria gráfica. En esta investigación se analiza la utilidad de esta fórmula en el seguimiento y control de las variables del proceso de recubrimiento de tabletas farmacéuticas. Esta propuesta es acorde con los objetivos PAT (*Process Analytical Technology*) trazados por la FDA (*Food & Drug Administration*) de los Estados Unidos de América en 2004 [4] para la industria de fármacos [5]. En dichos objetivos se indica que la manufactura debe realizarse en un ambiente séptico completamente controlado, mediante procesos automatizados, sin la extracción y destrucción de las muestras de control. A pesar de los esfuerzos, en la actualidad estos objetivos no se cumplen en su totalidad, sobre todo en industrias medianas donde las inversiones en tecnología son limitadas y las soluciones impactan en los costos, razón por la cual aún persiste la utilización de métodos de valoración visual.

La fórmula del SCTV, recientemente reconocida como un estándar internacional ISO [6], fue ideada para el control cromático en la reproducción de los tonos de tintas no incluidas en el

modelo sustractivo CMYK convencional [7], lo cual corresponde justamente a los tonos que habitualmente se utilizan en las mezclas de recubrimiento de las tabletas farmacéuticas. Esta característica permite pensar en la posible aplicación de esta fórmula al análisis de la evolución de las coordenadas cromáticas en el proceso de recubrimiento de las tabletas.

El punto de partida, para el uso de la fórmula SCTV en la evaluación del proceso de recubrimiento de tabletas farmacéuticas, son las variables cromáticas de claridad (L^*), junto con las coordenadas a^* y b^* del espacio de color CIELAB [8]. Para obtener estas variables, primero se toman los espectros de reflectancia de las tabletas recubiertas en diferentes instantes del proceso, luego, a partir de los espectros de reflectancia se derivan las coordenadas de color CIELAB, y, por último, se determinan los valores SCTV. Se debe indicar que en el cálculo de los valores SCTV se consideran dos conjuntos de coordenadas más: las de las tabletas sin recubrir (los núcleos) y las de las tabletas que han alcanzado la coloración final (color en el nivel de saturación).

Los valores SCTV proporcionan medidas porcentuales de los tonos de saturación, se relacionan con los valores de recubrimiento a lo largo del proceso, y son un indicador del espesor de la capa de tinta o, según esta investigación, del espesor de la capa de recubrimiento de la tableta y, consecuentemente, del incremento de volumen o masa del recubrimiento en un instante de tiempo, a partir del inicio del proceso.

Puesto que la reflectancia es la base del cálculo de los valores SCTV, conviene establecer su relación con la teoría de Kubelka-Munk (K-M) [9], que ha sido durante años de gran utilidad en la industria de textiles [10] o de cerámica [11]. Por ejemplo, se ha usado K-M para la predicción del color en mezclas de óxidos con arcillas [12], así como para la determinación de la concentración y la estimación de la densidad de pigmentos o mezcla de pigmentos, en muestras no convencionales.

Sin embargo, en la práctica resulta técnicamente complejo obtener la reflectancia de las tabletas durante el recubrimiento desde el bombo. Por ello, la reflectancia se determinó con tabletas extraídas para distintos tiempos de recubrimiento, las cuales se analizaron mediante un sistema de fibra óptica que brinda la reflectancia total. Por otra parte, también se determinaron las coordenadas de color de las tabletas de forma directa utilizando un sistema calibrado de análisis de imágenes DigiEye®, mediante el cual fue posible identificar los valores R, G, B de la superficie de las tabletas y transformarlos a coordenadas CIELAB, brindando mediciones cromáticas precisas [13].

Adicionalmente, el sistema CIELAB proporciona herramientas útiles para determinar las diferencias de color mediante la fórmula CIEDE2000 (ΔE_{00}) en series de muestras, como el caso que nos ocupa, en conformidad con la percepción visual. De ahí que la vinculación de los porcentajes SCTV y la evolución de las diferencias de las variables cromáticas durante el proceso de recubrimiento, pueda resultar de gran beneficio para la validación de los resultados y como herramienta de control del proceso.

Materiales y métodos

La mezcla de excipientes (sin principios activos) utilizada en la fabricación de los núcleos fue obtenida mediante el método de granulado húmedo, con una composición de 50 % de lactosa anhidra, 18 % de celulosa microcristalina, 7 % de polivinilpirrolidona K30, 24 % de almidón de maíz, 0,5 % de estearato de magnesio y 0,5 % de talco. Los núcleos cilíndricos, con caras superior e inferior biconvexas de 6,5 mm de diámetro, fueron manufacturados en una *tableteadora* rotativa de mesa GMP Junior Express de diez estaciones, de fabricación argentina. Para la mezcla de recubrimiento, se utilizó 8 % de hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC), 0,6 % de

polietilenglicol (PEG) 6000, 0,6 % de dióxido de titanio, 0,4 % de distintos pigmentos específicos y agua csp 90,4 %. Para los recubrimientos, se utilizaron las premezclas OpaDry® amarillo FD&C N°6 y azul FD&C N°1 de ColorCon® y el amarillo tartrazina. El proceso de recubrimiento se realizó bajo condiciones controladas de laboratorio en un equipo de recubrimiento Hüttling-Bosh®, con el software de control Bosh-SolidLab1®, de fabricación alemana.

En el proceso de recubrimiento se extrajeron grupos de 20 tabletas cada 10 min, desde el inicio del proceso hasta un tiempo de 190 min. Se procuró que la cantidad total de tabletas extraídas durante al final del proceso no superara el 5 % de la cantidad inicial, de modo que las condiciones en que quedaban las tabletas del bombo fueran casi constantes.

La medición de la reflectancia espectral se realizó con un espectrofotómetro Avantes® conformado por la fuente de luz “AvaLight® DH-S-Deuterium-Halogen”, el receptor analizador de luz “AvaSpec-ULS2048L-USB2® and EVO®”, y dos fibras ópticas “FCR-7UVIR400-2-BX/ME®”, que conecta ambos elementos con la esfera integradora “AvaSphere 50-RFL®”. La reflectancia espectral se midió entre 380 nm y 780 nm, considerando valores a intervalos de 10 nm, para el posterior cálculo de las coordenadas de color. En su configuración para medición de color, el Ava-Soft Color® generó resultados de valores tristímulo (X,Y,Z) y coordenadas CIELAB ($L^*, a^*, b^*, C_{ab}^*, h^\circ$), bajo los estándares de la CIE (*Commission Internationale de l’Eclairage*).

Como se mencionó, también se utilizó el DigiEye®, de la compañía británica VeriVide®, para la medición de color por imagen. Este instrumento consta de una cámara cúbica cerrada de iluminación difusa, con las siguientes características: espacio para muestras de tamaño A4 (210 x 297) mm, profundidad de campo hasta 200 mm, cabina DigiEye® de 690mm X 730mm, iluminación difusa, luz estandarizada para diferentes tipos de iluminante, (CIE D65 con matriz LED, tecnología SpectraTUNE® de calibración). La captura de la imagen se realiza mediante una cámara Nikon D90, adaptada al ordenador por cable USB, con el sistema DigiTizer® para calibración (Chromasensor® 5), y estándares de referencia blanco y color. El instrumento dispone también de un monitor Eizo CG2446W.

La fórmula de diferencia de color CIEDE2000 (ΔE_{00}) [8] es la recomendada actualmente por ISO y CIE, y no solamente toma en cuenta los valores de las coordenadas cromáticas L^*, a^* y b^* , sino que incluye factores paramétricos, índices de compensación, y un término de rotación que actúa en áreas específicas del espacio de color:

$$\Delta E_{00} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{K_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{K_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{K_H S_H}\right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C'}{K_C S_C}\right) \left(\frac{\Delta H'}{K_H S_H}\right)} \quad (1)$$

donde $\Delta L'$ es la diferencia de claridad, $\Delta C'$ la diferencia de croma y $\Delta H'$ la diferencia de tono entre dos muestras; K_L, K_C y K_H son los factores paramétricos, que bajo unas ‘condiciones de referencia’ establecidas valen 1; S_L, S_C y S_H son los factores de peso de las diferencias en claridad, croma y tono, respectivamente; R_T es el factor de rotación, que se utiliza para tratar la problemática de la región azul (ángulos de tono cercanos a 275°).

La ecuación del promedio de las diferencias de color respecto al color medio (*MCDM: Mean Color Difference to the Mean*) [14] es un recurso estadístico muy utilizado para determinar un valor representativo de la dispersión de un grupo de medidas de color según el sistema CIELAB, ya sea que se midan diferentes muestras de un mismo lote o repeticiones de una sola muestra (ecuación 2).

$$MCDM = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{(L_i^* - \bar{L}^*)^2 + (a_i^* - \bar{a}^*)^2 + (b_i^* - \bar{b}^*)^2}}{n} \quad (2)$$

donde “n” es el número de muestras, L_i^* , a_i^* y b_i^* son las coordenadas CIELAB de las muestras, y \bar{L}^* , \bar{a}^* y \bar{b}^* son los valores promedio del grupo considerado.

La fórmula SCTV describe, en términos porcentuales, el valor de un tono específico definido en coordenadas X, Y, Z, como el “peso” visual sobre un sustrato, de tal manera que cada porcentaje describe diferentes grados del contenido saturado:

$$SCTV = 100 \sqrt{\frac{(V_{xt} - V_{xp})^2 + (V_{yt} - V_{yp})^2 + (V_{zt} - V_{zp})^2}{(V_{xs} - V_{xp})^2 + (V_{ys} - V_{yp})^2 + (V_{zs} - V_{zp})^2}} \quad (3)$$

donde V_{xs} , V_{ys} , V_{zs} son los valores V_x , V_y , V_z calculados para las muestras de tinta sólida; , , son los valores V_x , V_y , V_z calculados para el sustrato (en nuestro caso el núcleo sobre el cual va a ser depositada la capa de recubrimiento); , , son los valores V_x , V_y , V_z calculados para un punto de tono intermedio, que en nuestro caso corresponde a estados intermedios durante el proceso de recubrimiento.

Los componentes de valor V_x , V_y , V_z son definidos de forma similar o complementaria a la claridad del sistema CIELAB [8], conforme a las siguientes ecuaciones [6]:

$$V_x = L^* + \frac{116 * a^*}{500} \quad V_y = L^* \quad V_z = L^* - \frac{116 * b^*}{200} \quad (4)$$

El estándar para iluminación en la industria gráfica, según las normas ISO 20654 e ISO 13655 sobre impresión y pruebas, es el iluminante CIE D50 con observador patrón de 2° (CIE 1931). Sin embargo, en este trabajo se utilizó el iluminante CIE D65 con observador patrón de 10° (CIE 1964), debido a que la CIE recomienda utilizar este iluminante siempre que se pueda. En la industria farmacéutica, las guías ICH (*International Council for Harmonisation of Technical Requirements for Pharmaceuticals for Human Use*), farmacopea europea, farmacopea USA, las guías de la FDA para la industria farmacéutica, las escalas visuales de color de Gardner, y otros documentos clave para la industria usan el iluminante CIE D65 como el estándar de referencia preferido.

La fórmula de Murray-Davies (M-D) permite el cálculo del área efectiva “a” de medios tonos a partir de los valores de reflectancia medida $R(\lambda)$, la reflectancia de saturación total $R_{t(\lambda)}$ y la reflectancia del sustrato $R_{s(\lambda)}$ relacionados por la ecuación 5

$$R(\lambda) = aR_{t(\lambda)} + (1 - a)R_{s(\lambda)} \quad (5)$$

de tal manera que el área efectiva de cubrimiento es:

$$a = \frac{R(\lambda) - R_{s(\lambda)}}{R_{t(\lambda)} - R_{s(\lambda)}} \quad (6)$$

La fórmula de Yule-Nielsen (Y-N) introduce el parámetro empírico n en la fórmula de M-D, como se indica en la ecuación 7

$$R_{(\lambda)}^{\frac{1}{n}} = aR_{t(\lambda)}^{\frac{1}{n}} + (1 - a)R_{s(\lambda)}^{\frac{1}{n}} \quad (7)$$

El formalismo de Kubelka-Munk (K-M) introduce el cociente k/s , donde k es el coeficiente de absorción y s el coeficiente de dispersión o esparcimiento (scattering) [9], de modo que para una capa de grosor infinito de reflectancia R_{∞} se cumple:

$$\frac{k}{s} = \frac{(1 - R_{\infty})^2}{2R_{\infty}} \quad (8)$$

Los gráficos resultantes del coeficiente k/s se utilizan para identificar los niveles de menor reflectancia (por tanto, de mayor absorbancia) de una superficie dada.

Para los casos donde la capa es finita [15], es decir, grosores intermedios donde la reflectancia R no haya llegado a su máximo valor, se puede obtener una ecuación para el producto sX , que se denomina "poder de dispersión" de la muestra, que incluye el coeficiente de dispersión (s) y el espesor de la muestra (X) (ecuación 9):

$$sX = \frac{1}{b} \left(\operatorname{Arctth} b \frac{a - R}{b} - \operatorname{Arcoth} \frac{a - R_s}{b} \right) \quad (9)$$

donde R_s es la reflectancia del sustrato y

$$a = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{\infty}} + R_{\infty} \right) \quad b = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{\infty}} - R_{\infty} \right) \quad (10)$$

Resultados

Se tomaron cinco tabletas de cada uno de los grupos extraídos cada 10 min, y para varios de ellos se realizaron tres medidas de reflectancia espectral por cada tableta. Las reflectancias promedio de las tabletas recubiertas con FD&C N°6 se muestran en la figura 1, que incluye las reflectancias espectrales de los núcleos.

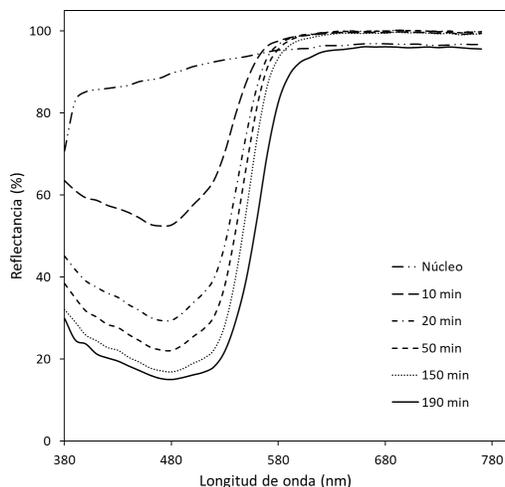


Figura 1. Reflectancias espectrales promedio del núcleo y de tabletas recubiertas durante ciertos tiempos con amarillo FD&C N° 6.

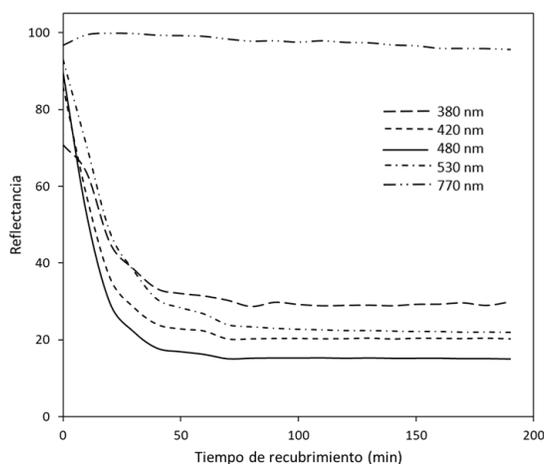


Figura 2. Variación de la reflectancia de tabletas recubiertas con amarillo FD&C N°6 en ciertas longitudes de onda durante el proceso de recubrimiento.

En la figura 2 se aprecia que, para la longitud de onda de 480 nm, la reflectancia experimenta la máxima variación, lo cual está acorde con lo mostrado en la figura 1. Este resultado también concuerda con el mínimo que muestra el cociente k/s de la teoría K-M, representado en la figura 3. Asimismo, para el caso de las tabletas coloreadas con una mezcla de azul FD&C N°1 y amarillo tartrazina, la máxima variación de las reflectancias se produce para una longitud de onda de 640 nm (se omiten las gráficas correspondientes, por ser análogas a las de las figuras 1 y 2), resultado que también concuerda con el mínimo relativo que se observa en la figura 3. Es decir, los mínimos de la gráfica de coeficientes k/s se relacionan con las longitudes de onda donde se produce la máxima variación de la reflectancia del recubrimiento.

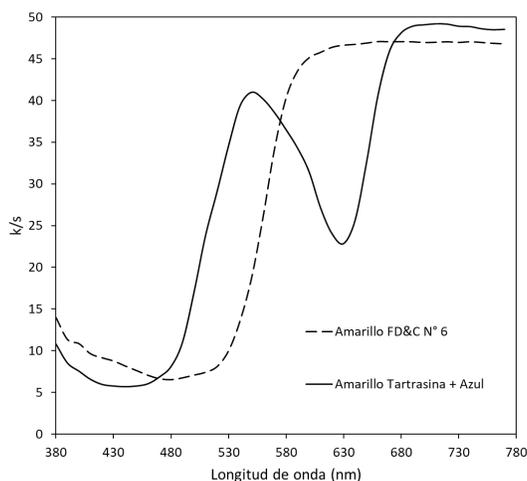


Figura 3. Valores k/s según la teoría K-M, para tabletas con recubrimientos saturados (190 min) con amarillo FD&C N° 6 y con una mezcla de amarillo tartrazina y azul FD&C N° 1.

Mediante la determinación del poder de dispersión de la capa de recubrimiento (sX), que nos da la teoría K-M (ver ecuaciones 9-10), en su mayor nivel de absorción (a 480 nm) se calcula el porcentaje ($\%sX$) del poder de dispersión a lo largo del proceso de recubrimiento de tabletas farmacéuticas (figura 4) con respecto a los valores obtenidos en la máxima saturación (190 min). De esta forma se puede estimar el cambio porcentual del espesor de la capa de recubrimiento (X), pues se supone que el coeficiente de dispersión (s) en este caso es constante.

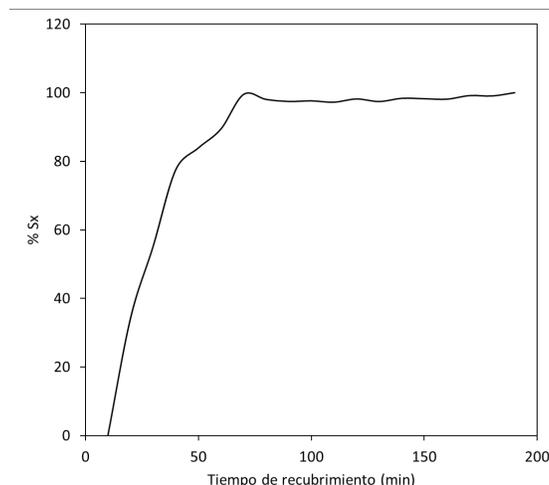


Figura 4. Evolución temporal del porcentaje del poder de dispersión ($\%sX$), respecto al nivel de saturación (190 min), en la longitud de onda donde el pigmento amarillo FD&C N°6 experimenta el mayor cambio en la reflectancia (480 nm).

Al trasladar los valores de sX (480 nm) a términos porcentuales (figura 4), tomando como referencia el poder dispersivo en 190 min (equiparable al valor de R_{∞} de la teoría K-M), se puede decir que el resultado es equiparable a los porcentajes de recubrimiento medidos a través de los modelos de M-D y Y-N (ecuaciones 5 y 7, respectivamente). Para comparar los distintos resultados, en la figura 5 se muestran las curvas porcentuales del poder de dispersión ($\%sX$), los resultados de los modelos M-D, Y-N ($n=2$) y la curva SCTV.

Según la figura 5, las estimaciones realizadas del porcentaje de recubrimiento con los valores colorimétricos SCTV son muy similares a las obtenidas a partir del $\%sX$ según K-M. Por su parte, en la figura 5 la curva obtenida con el modelo M-D se encuentra en la posición más distante, mientras que el modelo Y-N (que es una derivación del modelo M-D) con $n=2$, tampoco reproduce con precisión los valores de $\%sX$ ni los valores de SCTV. Utilizando valores de $n \geq 2$ en el modelo de Y-N se logra mejorar la semejanza con la curva SCTV, pero no se alcanzan curvas idénticas.

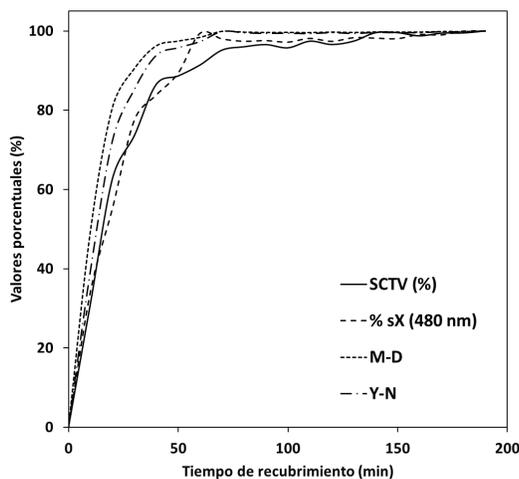


Figura 5. Evolución temporal de los valores porcentuales de recubrimiento con respecto al nivel de saturación (190 min), según SCTV, M-D, Y-N ($n=2$) y K-M ($\%sX$ en 480 nm), para las tabletas con pigmento amarillo FD&C N° 6.

Al considerar la evolución temporal de las coordenadas CIELAB de las tabletas recubiertas con amarillo FD&C N° 6, obtenidas a partir de las reflectancias (figura 6-A), se observa un comportamiento asintótico del croma (C_{ab}^*), la claridad (L^*) y el ángulo de tono (h°). No obstante, también hay diferencias importantes, conforme aumenta el tiempo de recubrimiento el croma crece (o sea, se pierde el color blanco de los núcleos), mientras que la claridad y el ángulo de tono decrecen. Este comportamiento asintótico explica la disminución de las desviaciones estándar de las reflectancias en varias longitudes de onda y en los valores de MCDM (unidades CIELAB), que disminuyen conforme aumenta el tiempo de recubrimiento de las tabletas (figura 6-B).

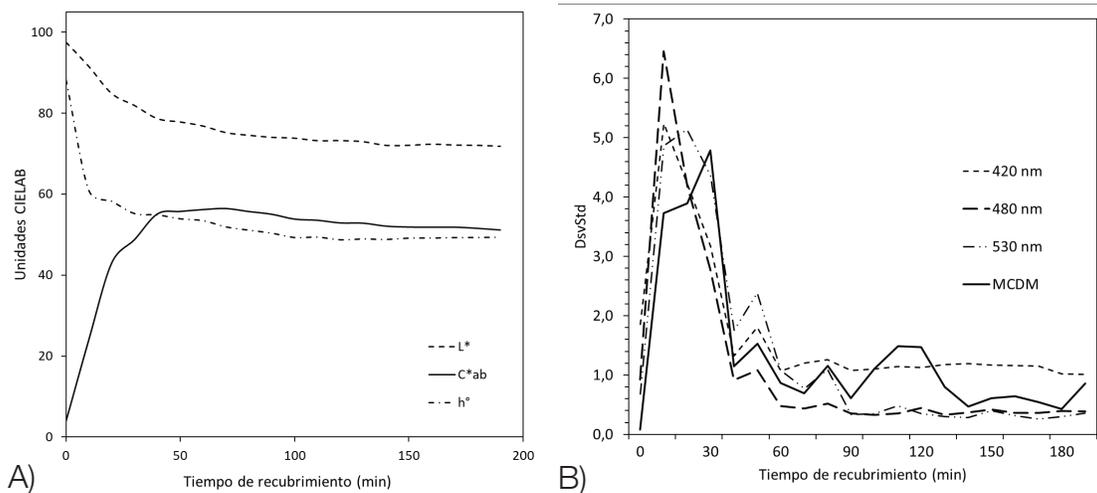


Figura 6. (A) Evolución temporal de las coordenadas CIELAB obtenidas a partir de las reflectancias de las tabletas recubiertas con amarillo FD&C N° 6. (B) Evolución temporal de la dispersión (DsvStd) de las medidas de reflectancia en tres longitudes de onda, y de los valores de MCDM (unidades CIELAB).

Para el caso de aspersión de los núcleos con la mezcla de pigmentos azul FD&C N° 1 y amarillo tartrazina, los valores de croma, claridad y ángulo de tono CIELAB (figura 7-A) también muestran una tendencia asintótica. Este resultado también implica que las diferencias de color tienden a estabilizarse conforme avanza el proceso de recubrimiento, como muestra la figura 7-B.

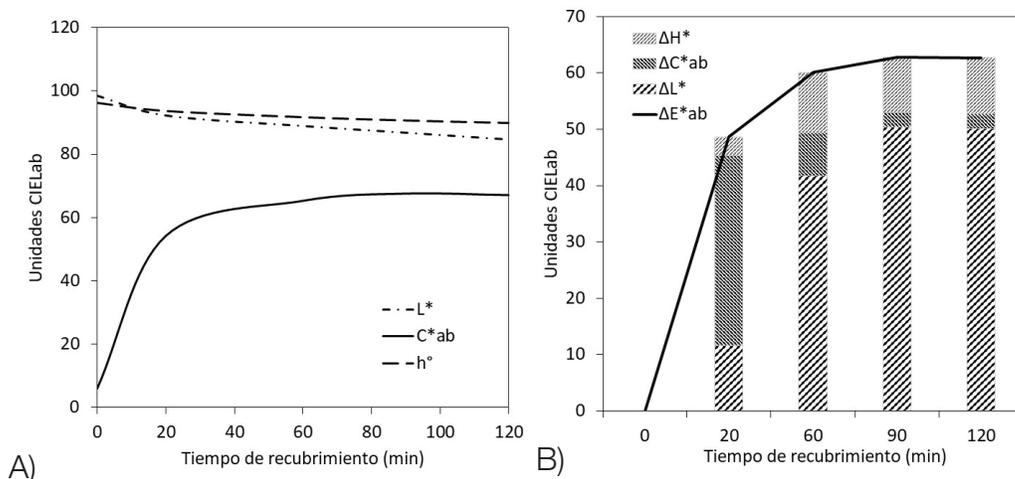


Figura 7. Evolución temporal de las coordenadas cromáticas L^* , C_{ab}^* , h° , (A) y de las diferencias de color ΔE_{ab}^* (B) en el proceso de recubrimiento de las tabletas con la mezcla de pigmentos azul FD&C N°1 con amarillo tartrazina.

Si además se comparan los resultados de las diferencias de color ΔE_{00} y ΔE_{ab}^* con los obtenidos mediante la fórmula de SCTV (ecuación 3) se aprecia un comportamiento cualitativo similar (figura 8), aunque también existen diferencias importantes. Por ejemplo, en la figura 8 podemos ver que mientras que las diferencias de color muestran comportamientos prácticamente estables a partir de 40 min y 70 min, la fórmula SCTV da valores que alcanzan la estabilidad para tiempos mayores a 100 min, partiendo de las coordenadas CIELAB calculadas usando las reflectancias espectrales o de las medidas directas realizadas mediante DigiEye®.

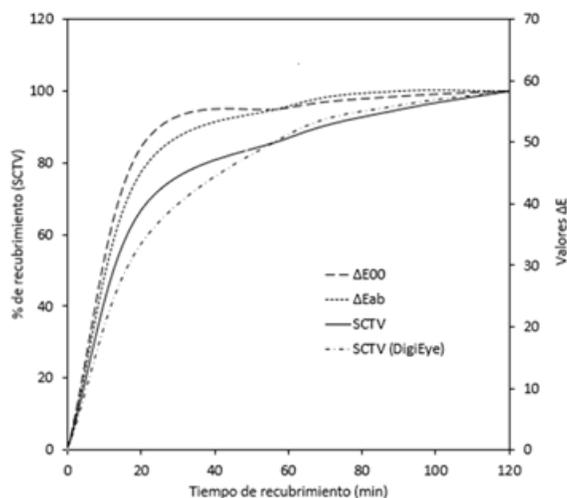


Figura 8. Evolución temporal de las diferencias de color ΔE_{00} y ΔE_{ab}^* y del SCTV (medido con el espectrofotómetro Avantes® y con el DigiEye®) de tabletas recubiertas con una mezcla de azul FD&C N°1 y amarillo tartrazina respecto del nivel de saturación (120 min).

Si comparamos el resultado de la evolución de SCTV con mediciones cromáticas obtenidas a partir de las reflectancias y a partir de mediciones directas obtenidas con el DigiEye®, se aprecia una pequeña diferencia que puede tener su origen, al menos en parte, en las discrepancias que suelen obtenerse al medir el color con diferentes instrumentos.

Conclusiones

A partir de reflectancias de dos tipos de recubrimientos coloreados, es posible identificar patrones asintóticos en las coordenadas cromáticas en el proceso de recubrimiento de las tabletas farmacéuticas. Esto evidencia una relación entre el color, la reflectancia y el tiempo del proceso de recubrimiento. Por lo tanto, a partir de tal relación es posible generar un modelo que prediga el grosor de la capa de recubrimiento partiendo de mediciones ópticas y satisfaciendo, a la vez, los objetivos PAT trazados por la FDA.

El estudio de los distintos métodos de valoración de la capa de recubrimiento indica que todos tienen un comportamiento similar y, en apariencia, satisfactorio. Las reflectancias espectrales de las tabletas ofrecen la posibilidad de calcular las coordenadas de color utilizadas en la norma SCTV, pero también permiten aplicar la teoría K-M (poder de dispersión) y los modelos M-D y Y-N sobre la evolución del color de la capa de recubrimiento. No obstante, el equipo DigiEye facilita la obtención rápida, directa y reproducible de las coordenadas de color, lo que favorece la aplicación del método SCTV.

Por otra parte, la disminución de la dispersión de la reflectancia de los recubrimientos conforme avanza el proceso, se explica por la tendencia asintótica de las variables cromáticas, asociadas con el aumento del grosor del recubrimiento y con la saturación de su color.

La evolución del proceso de recubrimiento evaluado con los diferentes métodos, se puede expresar en valores porcentuales, lo que permite su comparación y valoración cualitativa. La descripción del proceso de recubrimiento con los distintos modelos genera resultados semejantes, para los dos tipos de recubrimiento examinados. Las discrepancias entre los modelos de M-D y Y-N, con $n=2$, y las curvas SCTV y %sX no son relevantes, más bien hacen pensar en la posible ampliación del estudio utilizando otros pigmentos y formas de tabletas, lo cual se deja para un trabajo posterior.

Al comparar los valores SCTV con los valores obtenidos a partir de los valores porcentuales del ΔE_{00} y ΔE_{ab}^* , se encuentra que los valores SCTV subestiman la saturación del color de la capa de recubrimiento.

La aplicación de una herramienta de la industria de reproducción gráfica (fórmula SCTV) al proceso de recubrimiento de tabletas farmacéuticas, es una nueva forma de control del proceso en esta industria. Los resultados demuestran que la curva SCTV es una posible herramienta para el control de calidad en los procesos de recubrimiento de tabletas farmacéuticas, en donde las mediciones del SCTV se pueden complementar con la ayuda de K-M.

Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración al Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España (PID2019-107816GB-I00 / AEI / 10.13039/501100011033)

Referencias

- [1] A. Murray, «Monochrome Reproduction in Photoengraving,» *Journal of the Franklin Institute*, 221, pp. 721-744, 1936.
- [2] J. Yule, W. Nielsen, «The Penetration of Light into Paper and its Effect on Halftone Reproductions,» *TAGA Proceedings*, 3, pp. 65-76, 1951.
- [3] H. Neugebauer, «Die theoretischen Grundlagen des mehrfarbendrucks,» *Zeitschrift für wissenschaftliche Photographie*, 36, p. 73-89, 1937.
- [4] H. D.C., «Process analytical technologies in the pharmaceutical industry: the FDA's PAT initiative,» *Anal Bioanal Chem* 384, n° 384, p. 1036-1042, 2006.
- [5] D. Reitter, FDA Draft Guidance Document Comments on Use of Inks, Pigments, Flavors and Taggants to Guard Against Counterfeiting, ColorCon Inc, 2009.
- [6] ISO, 20654, Verner, Geneva: ISO copyright office, 2018.
- [7] K. Deshpande y P. Green, «A simplified method of predicting the colorimetry of spot color overprints,» de 18th Color Imaging Conference Final Program and Proceedings, London, UK., 2010.
- [8] C. 15, «Technical Report Colorimetry,» Commission Internationale de l'éclairage, CIE, Vienna, Austria, 2018.
- [9] P. Kubelka y F. Munk, «An Article on Optics of Paint Layers,» *Zeit. Für Tekn. Physik*, p. 593, 1931.
- [10] B. Becerir., «Color Concept in Textiles: A Review.,» *Journal of Textile Engineering & Fashion Technology*, vol. 1, n° 6, pp. 1-5, 2017.
- [11] B. F. Schabbach, «Colouring of opaque ceramic glaze with zircon pigments: Formulation with simplified Kubelka-Munk model.,» *Journal of the European Ceramic Society*, 31, pp. 659-664, 2011.
- [12] V. Barron, «Predicción del color en mezclas de arcillas con óxidos de hierro: aplicación del análisis de Kubelka - Munk,» *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidrio*, pp. 299-304, 1987.
- [13] M. Murillo, F. Rodríguez, F. Heredia, M. Melgosa, J. Pacheco, E. Montero y D. Gutiérrez., «Color evolution during a coating process of pharmaceutical tablet cores by random spraying,» *CR&A*, 44, pp. 160-167, 2019.
- [14] R. S. Berns, Billmeyer and Saltzman's Principles of Color Technology, Rochester, NY: Wiley, 2000.
- [15] J. Artigas, «Teoría de Kubelka-Munk,» de *Tecnología del Color*, Zaragoza, Valencia, Universitat de Valencia, 2002, pp. 291-294.

Potencial biotecnológico de los hongos marinos en las zonas costeras de Costa Rica

Biotechnological potential of marine fungi in coastal areas of Costa Rica

Stephannie Masís-Ramos¹, Paola Meléndez-Navarro²,
Erika Méndez-Rodríguez³

Fecha de recepción: 6 de marzo de 2020

Fecha de aprobación: 16 de junio de 2020

Masís-Ramos, S; Meléndez-Navarro, P; Méndez-Rodríguez, E. Potencial biotecnológico de los hongos marinos en las zonas costeras de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-2. Abril-Junio 2021. Pág 48-59.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i2.4430>

- 1 Ingeniera en Biotecnología, egresada, Escuela de Biología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: stephie.masis1529@gmail.com
- 2 Ingeniera en Biotecnología, egresada, Escuela de Biología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: pmelnavarro@gmail.com
- 3 Ingeniera en Biotecnología, egresada, Escuela de Biología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: erri1416@gmail.com



Palabras clave

Micología marina; micoflora; metabolitos; esponjas marinas; algas; manglares.

Resumen

La micología marina consiste en un grupo diverso, cuyas características de sobrevivencia en ambientes hostiles y sus adaptaciones los convierte en atractivo para la obtención de metabolitos y diversas aplicaciones biotecnológicas. Dentro de sus utilidades, se reporta la producción de alcaloides, lípidos, enzimas, pigmentos, compuestos con aplicación médica, entre otros. Estos hongos habitan generalmente en climas tropicales, subtropicales y templados; por lo que, debido al clima tropical y posición geográfica que posee Costa Rica, el país es prometedor para la exploración y explotación de la diversidad micológica asociada a los organismos en los que suelen hospedarse los hongos marinos, como lo son las esponjas marinas, algas y plantas situadas en el mar o manglares. De esta manera, el presente artículo evidencia el potencial biotecnológico que presenta la micoflora en las zonas costeras de Costa Rica.

Keywords

Marine mycology; mycoflora; metabolites; marine sponges; algae; mangroves.

Abstract

Marine mycology consists a diverse group, whose characteristic of survival in hostile environments and their adaptations makes them attractive for obtaining metabolites and diverse biotechnological applications. Among its utilities, it is reported the production of alkaloids, lipids, enzymes, pigments, compounds with medical application, within others. These fungi usually inhabit tropical, subtropical, and temperate climates; therefore, due to the tropical climate and geographical position that Costa Rica possesses, the country is promising for the exploration and exploitation of the mycological diversity associated to the organisms in which marine fungi usually lodge, such as marine sponges, algae and plants located in the sea or mangroves. Thus, this article aims to highlight the biotechnological potential of mycoflora in the coastal areas of Costa Rica.

Introducción

Durante las últimas décadas, científicos del mundo se han sentido atraídos por la exploración de productos naturales marinos [1]. Esto ha provocado un progreso considerable en la documentación, ocurrencia, distribución y el desarrollo de aplicaciones biotecnológicas potenciales para el empleo de hongos marinos [2].

Según Jones y Pang [2], los hongos marinos fueron reportados por primera vez entre 1840 y 1880, pero sus primeros estudios se relacionaban a su condición como huéspedes de algas marinas. Posteriormente, las investigaciones se basaron en la identificación de micología marina en zonas tropicales, o manglares, y descripción de especies basadas en características morfológicas, acompañadas de observaciones ultraestructurales.

No obstante, debido a la dificultad en la clasificación del reino Fungi, en la última década estos microorganismos se han reclasificado basándose en datos de secuenciación y el descubrimiento de nuevos linajes [2], [3]. Aun así, se han logrado identificar 1,112 especies (de 472 géneros), de las cuales, 805 especies pertenecen al filo Ascomycota, 21 especies al

Basidiomycota y 26 especies al Quitridiomycota y otros filos relacionados [3]. Esta información confirma que las fuentes marinas son un foco diverso cuando se refiere a hongos, lo que se traduce en diversas aplicaciones de carácter biotecnológico.

Numerosas investigaciones se inclinan por definir a la micoflora marina como un grupo variado y una excelente fuente de productos naturales. A pesar de que muchos hongos son cosmopolitas y viven tanto en el mar como en otros hábitats de suelo y agua dulce, se ha obtenido evidencia de que, bajo las condiciones del ambiente marino, los hongos producen un perfil de metabolitos diferente en comparación con la situación del agua dulce [4]. En adición, otros autores consideran que estos microorganismos, más que un grupo taxonómico, son un grupo ecológico; estas especies viven en un hábitat estresante, bajo condiciones de alta presión, frías, ausencia de luz, e inclusive estrés mecánico, y su capacidad para sobrevivir en diferentes condiciones ambientales los vuelven atractivos para el aislamiento nuevas moléculas [5].

Recientes estudios han demostrado que las cepas fúngicas marinas son potentes productores de alcaloides derivados de policétidos, terpenos y compuestos de biosíntesis mixtos [1], también se ha evidenciado la producción de aminoácidos, lípidos, enzimas, antibióticos, compuestos anticancerígenos, alcoholes de azúcar y diversos componentes celulares, de membrana y pared, a partir de hongos marinos [6].

El potencial que tienen estos organismos es contundente para el sector biotecnológico, tanto en la investigación como en el desarrollo de productos y procesos de utilidad, especialmente para aquellos países que poseen una rica diversidad marina. Costa Rica es parte del puente terrestre centroamericano, que separa el este del Océano Pacífico del Mar Caribe, y conecta al continente norteamericano con el suramericano. El país tiene el privilegio de tener dos costas, una de 212 km del Caribe, y otra de 1,254 km del Pacífico, lo que otorga acceso a una vasta diversidad marina, entre la cual se distinguen los hongos, que se han logrado identificar en zonas manglares [7].

El objetivo general de la presente revisión bibliográfica consiste en evidenciar el potencial biotecnológico que posee la micoflora presente en las zonas costeras de Costa Rica, así como su utilidad en la obtención de productos de interés para diversas industrias de relevancia económica y social.

Generalidades de los hongos marinos

Los hongos que habitan en aguas marinas tienen una distribución geográfica diferencial, generalmente son de climas tropicales/subtropicales y templados. Su diversidad se encuentra condicionada por numerosos factores, entre estos, biológicos, químicos y físicos, incluyendo la naturaleza y disponibilidad de sustrato para colonización, interferencia de competencia, temperatura del agua, pH y salinidad. Sin embargo, la temperatura es considerada como el factor físico más importante para controlar la ocurrencia de estos microorganismos marinos en distintas zonas geográficas [2].

Si bien estos organismos poseen una amplia distribución, sólo un reducido porcentaje de ellos ha sido exitosamente cultivado. Un recuento de las especies cultivadas sugiere que únicamente existen 467 aislamientos recuperados de ambientes marinos, pertenecientes a 244 géneros. Esto podría implicar que sólo alrededor del 0,6% de los hongos estudiados se derivan del ambiente marino, a pesar de que los hábitats marinos representan el 70% de la superficie del globo terráqueo, y que albergan hongos desde la interfaz de la superficie del aire hasta profundidades de kilómetros [8].

El estudio de estos hongos, cultivo y propagación generalmente se ejecuta a partir del aislamiento de muestras ambientales terrestres, lo cual es un enfoque limitante porque generalmente son superados por hongos terrestres contaminantes también presentes en las muestras ambientales, o alternativamente, su ciclo de vida depende de una interacción simbiótica [9]. Adicionalmente, las dificultades en el estudio de hongos marinos se atribuyen a que el cultivo de aislados fúngicos a partir de muestras marinas a menudo conduce a la recuperación de microbios no fúngicos, que son ecológica, morfológica y tróficamente similares. También a que, las preferencias ecológicas de la mayoría de los hongos sugieren que, aquellos en los ecosistemas marinos, probablemente residen en organismos hospedantes o en ambientes bentónicos, incluidos los sedimentos de aguas profundas, que son difíciles de examinar por microscopía y en algunos casos presentan graves dificultades de muestreo [8].

A pesar de esto, y debido al potencial que define la micología marina, el desarrollo de investigación en el campo se ha enfocado en definir técnicas de aislamiento y extracción de metabolitos secundarios y otros productos de interés. Por tanto, se ha recurrido al aislamiento de estos microorganismos en suspensión libre, de material marino floculado, de sedimentos marinos, en superficies vivas y no vivas o como socios en simbiosis o en comensalismo [10]. También se ha asociado micoflora con corales, detritos de macrófitos marinos, manglares y caparzones de ciertos moluscos [11].

Es importante destacar que el sitio de origen de los hongos marinos influye en la producción de nuevos compuestos naturales, por ejemplo, Bugni y Ireland [12] afirman que de los compuestos extraídos a partir de estos, la mayoría proviene de hongos aislados de esponjas y algas (un 33 y 24 % respectivamente); esto coincide con lo expuesto por Li y Wang [13], quienes afirman que la mayoría de las investigaciones sobre hongos derivados de esponjas se han centrado en la química de los productos naturales, simplemente porque el mayor número de nuevos metabolitos fúngicos marinos procede de la micoflora de las esponjas de mar [14], [15].

Producción de metabolitos secundarios

Las condiciones hostiles del sitio de origen de hongos marinos, como lo son la alta salinidad, bajas temperaturas, ausencia de luz y alta presión, promueven la producción de compuestos de interés biotecnológico, y la síntesis de estos podría provenir de procesos metabólicos o de adaptaciones genéticas para atender combinaciones específicas de parámetros fisicoquímicos, como los que se hallan en ambientes extremos. Además, las asociaciones, generalmente endófitas con otros organismos, son indicio de que probablemente imitan las condiciones bioquímicas del hospedero para soportar su contexto. Debido a esto, se ha demostrado que los co-cultivos de hongos marinos con otros microorganismos del mismo ecosistema tienen éxito en la activación de metabolismos secundarios. Otras técnicas que se reportan son la manipulación genética y la manipulación de los parámetros de cultivos para inducir y regular la biosíntesis, no obstante, para cualquiera de las técnicas es necesario conocer la ruta metabólica y enzimas implicadas [4], [16].

Otro sistema de producción implementado es la fermentación. Lima y Porto [17] aplican este sistema en su forma sólida para la producción de celulasas con *Aspergillus niger*, el uso de sistemas de fermentación sumergidos para la producción de lipasas con *Aspergillus awanori*, y el uso de ambos para la producción de lacasas con *Pestalotiopsis* sp. Existen muchas variaciones de este bioproceso, por ejemplo, se reporta en un estudio que la producción de sorbilactona fue posible solamente bajo un sistema líquido estático, más no en cultivos agitados sumergidos [4]. Otro trabajo reporta que la obtención de wentilactonas únicamente fue posible en un sistema estático, simulando y optimizando las condiciones ambientales haciendo uso

de metanol al 3% como elicitador y, aunque *Aspergillus dimorphicus* presentó mejor rendimiento que el obtenido para *Aspergillus wentii*, la producción continúa siendo baja, por lo que se recomienda recurrir a técnicas como mutación dirigida e ingeniería metabólica [18].

Aplicaciones

El ambiente marino es una de las fuentes más relevantes en compuestos bioactivos, y debido a que los océanos representan un ambiente muy competitivo, con una amplia evolución y una biodiversidad poco explotada, se puede asumir que la oportunidad para descubrir nuevas moléculas en hongos marinos es significativa, en comparación con organismos de otros ecosistemas [19]. Además, aparte de la producción de compuestos, los hongos poseen aplicabilidad en diferentes procesos industriales, en roles como biotransformación, biodegradación y biorremediación [17]. A continuación, se profundizan algunas aplicaciones.

Producción de antibióticos

Actualmente es necesaria la búsqueda de nuevas sustancias antimicrobianas, debido a la multirresistencia que han desarrollado los patógenos. Los hongos han sido una fuente para la obtención de antibióticos debido a su capacidad de síntesis e inhibición del crecimiento de otros microorganismos [20], [21]. Por su parte, los hongos marinos poseen características promisorias debido a la producción de compuestos bioactivos con esqueletos de carbono únicos, amplia diversidad de clases químicas y patrones de sustitución [19], [22].

En 1950 se descubrió la Cefalosporina C aislada de *Acremonium chrysogenum*, primer hongo conocido como productor de antibióticos perteneciente a un ambiente marino [19]. Después de esto inició el estudio de micoflora marina como fuente productora de antibióticos, los cuales presentan propiedades inhibitorias contra patógenos como: *Staphylococcus* sp., *Vibrio* sp., *Escherichia coli*, *Xanthomonas campestris*, entre otras [23].

Hasta el año 2016 se habían reportado los hongos marinos: *Hypoxylom oceanicum*, *Ascochyta* sp. NGB4, *Aspergillus chrysogenum*, *Cephalosporium chrysogenum*, *Ampelomyces* sp., *Penicillium chrysogenum*, *Cladosporium* sp., *Corollospora maritima*, *Halosarpheia*, *Exophiala pisciphila*, *Lindgomycetaceae*, *Leptosphaeria oraemaris*, *Aspergillus terreus* PF-26, *Fusarium heterosporum*, *Aspergillus versicolor* y *Arthrinium* c.f. *saccharicola* como productores de antibióticos, los cuales han estado bajo enfoque biotecnológico y poseen parámetros descritos de fermentación [19].

Los compuestos antimicrobianos derivados de hongos marinos son variados. Se hallan los péptidos producidos por *Phomopsis* sp. K38, *Alternaria* sp. E33 y *Asteromyces cruciatus* 763, y *Beauveria felina* EN-135 que resultan ser compuestos inhibitorios de *E. coli* [21]. También se encuentran los indol-alcaloides producidos por los géneros *Aspergillus* y *Penicillium* [24], las piridinas y las piridinonas aisladas de *Wallemia sebi* PXP-89, *Stagonosporopsis cucurbitacearum* y *Candida* spp., las pirimidinas y piperazinas producidas en su mayoría por *Aspergillus*, así como los esteroides y terpenos sintetizados por *P. chrysogenum* QEN-24S, *A. ustus* cf-42, *Leucostoma personii* y *Scyphiphora hydrophyllacea* A1 [21].

El popular género *Trichoderma* puede encontrarse en sedimentos, esponjas marinas y bosques de manglar [25]; este sobresale por la producción de compuestos con actividad antibacteriana y antifúngica. En el 2014 se descubrieron dos piridonas producidas por *Trichoderma* sp. cepa MF106 que demostraron acción inhibitoria contra *Staphylococcus aureus* [26]. Más recientemente, una cepa de *Penicillium chermesinum* también demostró actividad antimicrobiana [27]. Esto comprueba que los hongos marinos no pertenecen a géneros

completamente desconocidos, sino a algunos ya estudiados con habilidad de crecer y explotar su metabolismo en ambientes adversos, facilitando así el estudio de esta clase de organismos con potencial en la producción de antibióticos.

Fuente de cosmeceúticos

Los cosmeceúticos son sustancias que se utilizan para embellecer y además proporcionar un efecto beneficioso en la salud. Los hongos marinos tienen la habilidad de desarrollar vías metabólicas que difieren de los hongos terrestres, que poseen diversidad química y funcional, e incluye sustancias beneficiosas para la salud [11].

Los antioxidantes previenen los radicales libres y el estrés oxidativo, por lo que poseen gran relevancia en la salud. En el 2014 se descubrió que *Aspergillus wentii* EN-48, un hongo marino aislado de un alga, produce ocho metabolitos secundarios con actividad antioxidante [28]. Asimismo, los géneros *Rhodotorula*, *Phaffia* y *Xanthophyllomyces* producen carotenoides, los cuales poseen capacidad antiinflamatoria y antioxidante que protegen contra la luz solar [29].

Los cosméticos utilizados para evitar la aparición de los signos de la edad poseen una notoria relevancia económica en el mercado mundial. Algunos microorganismos fúngicos marinos son capaces de producir compuestos como polisacáridos, ácidos grasos y proteínas que reblandecen y suavizan la piel, y entre los hongos que sobresalen en la producción de estas sustancias se encuentran *Rhodotorula mucilaginosa* AMCQ8A, *Acremonium* sp. y *Keissleriella* sp. Del mismo modo, resaltan los productores de sustancias utilizadas para blanquear la piel; entre ellos *Aspergillus* y *Penicillium* con la producción del ácido kójico, *Alternaria* sp. con derivados de este ácido y *Malassezia* sp. con el ácido azelaico, todos compuestos inhibitorios de la tirosinasa [30].

Producción de compuestos con actividad anticancerígena

La quimioterapia clásica o tradicional es aquella que emplea fármacos que interfieren directamente con la hélice de ADN o con las proteínas asociadas a este; estos agentes quimioterápicos circulan por el torrente sanguíneo y dañan a las células que están creciendo de forma activa, por lo que, si bien las células tumorales se dividen más rápidamente y esto las hace más susceptibles a los fármacos, el daño a las células normales no tumorales es inevitable [31]. Debido a esto, a pesar de ser una opción efectiva y poderosa como terapia contra el cáncer, aún existen muchas limitaciones y efectos secundarios asociados a la quimioterapia. Ante ello, es necesario el descubrimiento de nuevos agentes anticancerígenos para minimizar la incidencia y problemática de los químicos [18].

Se ha evaluado la bioactividad de productos naturales derivados de algas y hongos endófitos, y se obtuvieron nuevos diterpenoides tetranorlabdanos con actividad anticancerígena a partir del hongo *Aspergillus wentii*, destacando la actividad de la wentilactona A (induce apoptosis y secuestra G2/M en células de carcinomas humanos de pulmón) y la wentilactona B (inhibe la proliferación y migración de las células en el hepatoma humano SMMC-7721). No obstante, debido a los bajos rendimientos, los investigadores optaron por encontrar otra cepa que produjera más wentilactonas y otros derivados, de forma que se propuso *Aspergillus dimorphicus* como buen candidato, el cual se aisló a partir de otra alga marina [18].

Otro enfoque notable, es el potencial de las enzimas lacasas como agentes terapéuticos. La lacasa extracelular altamente activa (ex-LAC) posee citotoxicidad contra la leucemia promielocítica aguda, mieloma múltiple, leucemia mieloide y también leucemia linfocítica crónica en humanos. El hongo marino *Cerrena unicolor*, es considerado como una nueva fuente para la producción de esta enzima, en adición a sus otras aplicaciones en las industrias de biorremediación, biodegradación, deslignificación y decolorización [32]. La enzima extraída

de este hongo en particular, muestra alta actividad anticancerosa en comparación con otros productos de origen fúngico, y posee actividad antileucémica significativa al inducir apoptosis celular; por lo que se cree que consiste en un nuevo agente terapéutico para numerosas neoplasias hematológicas [33].

Producción de enzimas

Los hongos marinos son una valiosa fuente de enzimas. Estudios sobre el rol ecológico de estos organismos han demostrado que su principal función está asociada con la degradación de materia orgánica, por lo que demuestran amplia capacidad y diversidad en la producción de proteínas catalizadoras, las cuales tienen relevantes aplicaciones biotecnológicas [34].

Diversas levaduras marinas como *Candida albicans*, *Candida tropicalis*, *Debaryomyces hansenii*, *Geotrichum* sp., *Pichia capsulata*, *Pichia fermentans*, *Rhodotorula minuta*, *Cryptococcus dimennae*, *Yarrowia lipolytica*, *Candida glabrata*, *Cryptococcus victoriae*, *Meyerozyma (Pichia) guilliermondii* y *Rhodotorula laryngis* han sido reportadas para la producción industrial de enzimas como lipasas, celulasas, inulinasas, proteasas, α -glucosidasas, endoxilanasas y fitasas. Asimismo, se reportan otros tipos de hongos, como *Aspergillus niger* y *Chaetomium* sp. en la producción de celulasas, *Aspergillus awamori* en la producción extracelular de lipasas, *Mucor racemosus* en la producción de enzimas ligninolíticas, peroxidasas y lacasas, y *Aspergillus sclerotiorum*, *Cladosporium cladosporioides*, *Tinctiporellus* sp., *Marasmiellus* sp. y *Peniophora* sp. para la producción de enzimas ligninolíticas [17]. Este último también es reportado en la producción de lacasas [35].

Las enzimas producidas por hongos de ambientes marinos, además de ser muy variadas, poseen características fisiológicas particulares, como lo son: la tolerancia a la alta salinidad, termoestabilidad, resistencia a altas presiones y actividad a bajas temperaturas. Estas propiedades son de interés biotecnológico-industrial, ya que permitirían -entre otras aplicaciones- emplear las enzimas o directamente los hongos que las producen, en la biorremediación de ambientes adversos, y de igual manera, disminuir costos de energía en pasos industriales que involucran el calentamiento global [34], [36].

Producción de pigmentos

Existe un interés creciente por el uso de colorantes naturales debido a las preocupaciones nocivas asociadas con pigmentos sintéticos. Los de origen natural se derivan principalmente de plantas y microalgas, y tienen aplicaciones importantes en la industria alimentaria, sin embargo, exhiben inconvenientes como la inestabilidad, variación a cambios en pH y alto costo [37]. Por eso, estudios recientes procuran emplear fuentes alternativas para su síntesis; por ejemplo, los microorganismos capaces de crecer en diferentes sistemas de cultivo, independientes de las condiciones climáticas y el suministro de materias primas agrícolas, prestando atención a los hongos, capaces de producir pigmentos con alta estabilidad a la luz, calor y pH [38].

Dentro de las moléculas reportadas, cuya mayoría son policétidos, se encuentran la melanina y la esporopolenina, sustancias comunes en hifomicetos (dematiáceos), la terfenilquinona aislada de *A. niger*, pigmentos amarillos generados por hongos endófitos como la parietina y macrosporina extraídas de *Alternaria* sp., questina naranja y la asperflavina amarilla sintetizadas por *Eurotium rubrum*, los aceites amarillos citromicetina y 2,3-dihidrocitromicetina derivados de *Penicillium bilaii*, tetrahidroauroglaucina (amarillo) e isodihidroauroglaucina (naranja) producidos por *Eurotium* sp., y flavoglaucina y micotoxina citrinina derivada de *Microsporium* sp. Por último, se ha reportado un pigmento azul inusual no identificado, originario de *Periconia* sp. [16].

Estudio de micología marina en Costa Rica

En Costa Rica, la biodiversidad marina ha sido poco estudiada y aún se encuentra bajo escrutinio, sin embargo, la investigación en torno a los hongos ha estado rezagada. En 1990, se realizó un estudio con el fin de hallar Thrautochytriales y Quitridiomycetes en un área de manglar en Punta Morales en el Golfo de Nicoya por investigadores de la Universidad de Costa Rica y por un investigador del Instituto Alfred Wegener de Alemania [39], sin embargo, parece ser la única investigación relacionada. Hasta ese año, los únicos hongos marinos reportados pertenecían a los géneros *Schizochytrium* y *Thraustochytrium* hallados por Ulken y colaboradores en la zona del Pacífico, pero en la costa caribeña no habían sido reportados [7]. Fue hasta 2016, donde una tesis de maestría titulada “Aislamiento e identificación de hongos en octocorales del Caribe de Costa Rica”, misma que se señala como el primer estudio que contribuye a la identificación y conocimiento del microbioma en corales, reportó la existencia de diez géneros en la costa caribeña, siendo *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium* y *Zygosporium* los más frecuentes [40].

Lo anterior evidencia el pobre escudriñamiento de estos microorganismos en el país, a pesar de que, hasta el momento, la mayor diversidad de micoflora marina parece provenir de regiones tropicales, específicamente de manglares, donde la cantidad de materia orgánica es favorable para el desarrollo de estos organismos heterotróficos [16]; añadiendo también que la extensión de la costa marítima que presenta Costa Rica favorece la presencia de manglares, los cuales en el 2005 abarcaban 41 000 hectáreas del territorio nacional [41], lo que se sugiere que existe gran riqueza de estos microorganismos tanto en manglares como en los mares costarricenses.

Actualmente se encuentra vigente (2017-2021) un proyecto de la Universidad de Costa Rica bajo el nombre de “Hongos endófitos en pastos marinos del Pacífico y Caribe de Costa Rica” (NO. 808-B7-284), y aunque se trata únicamente acerca de hongos endófitos y no están bajo investigación los que se encuentran en corales, esponjas, sedimentos, peces y los diversos hospederos, se aproxima a confirmar la diversidad de hongos marinos que se encuentran en las costas costarricenses [42], por ende, una proyección a los usos biotecnológicos tanto ambientales, medicinales e industriales que estos poseen.

Potencial uso de la micología marina en Costa Rica

El género *Schizochytrium* reportado en Costa Rica [39], en otros países ha presentado una gama de aplicaciones biotecnológicas. Ciertos investigadores afirman que la cepa OUC88 de *S. limacinum*, logra producir hasta 5 g/L de ácidos orgánicos n-3, en especial ácido docosahexaenoico (DHA), el cual ha manifestado extensos beneficios en la salud humana, ya que es esencial para la función del sistema nervioso y la vista, además puede prevenir enfermedades de las arterias coronarias e hipertensión. Song *et al.* [43] plantearon al hongo (cepa OUC88) como candidato para la síntesis de DHA, y su producción a gran escala, y en consecuencia obtuvieron modelos rentables para la producción del ácido graso en fermentadores tipo batch, con la reducción del costo mediante el empleo de pastel de soya como materia prima, la cual es hasta 20 veces más barata que el polvo y extracto de levadura que se utilizaba hasta el momento.

Actualmente se trabaja en el empleo de materias primas aún más baratas que el pastel de soya (0,56 \$/Kg) como el glicerol (0.1 \$/Kg) e incluso biomasa forestal para la producción de DHA y otros productos nutraceuticos [43], [44]. Esto establece una clara oportunidad para formular productos alimenticios humanos con un alto valor agregado; la incorporación a la dieta de un producto biotecnológico basado en un hongo aislado de un manglar del Pacífico aspira a ser un proyecto donde tanto productores como consumidores se verían beneficiados. Además, se establecería un sólido aporte para la investigación y desarrollo, donde se promovería la generación de conocimiento entre entidades públicas y privadas.

El género *Thraustochytrium* también reportado en Costa Rica ha sido abordado como potencial agente marino en otros escenarios. Caamaño y colaboradores [45] describen el rol clave que poseen estos hongos en la etapa inicial de la cadena alimenticia microbiana, debido a su aporte como degradadores de materia orgánica, además, mencionan que su alto contenido lipídico podría reemplazar las fuentes convencionales de ácidos grasos. Los mismos autores ejecutaron el aislamiento y extracción de diferentes ácidos grasos, y el contenido total de lípidos indica que diferentes cepas del *Thraustochytrium* ofrecen un amplio potencial para la producción de biocombustibles y suplementos nutricionales. Nuevamente, a partir de las costas marinas costarricenses es posible la obtención de productos que generen alta competitividad en la industria biotecnológica y, a partir de los cuales, sea explotado todo un campo de producción biológica industrial, campo poco desarrollado en el país, y que presenta una oportunidad para la formación de profesionales en el ámbito científico.

Desde un enfoque más reciente, se han hallado diez géneros de hongos en un estudio, reportando a *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium* y *Zygosporium* como los géneros más frecuentes, entre los cuales sobresalen especies con la capacidad de producir compuestos citotóxicos y anticancerígenos. En particular, destacan *Aspergillus terreus* SCSGAF0162 que sintetiza un tetrapéptido cíclico llamado “asperterrestide A”, *Aspergillus versicolor* que produce los pentapéptidos “versicotides A y B”, el género *Fusarium* con la producción de “sansalvamide A” y *Zygosporium masonii* que sintetiza la zigosporamida [46]. Esto amplía la posibilidad de desarrollo de investigación y productos en la industria farmacéutica nacional.

Por otro lado, al relacionar organismos reportados en el país con investigaciones internacionales que los asocian como hospederos de hongos marinos, también es posible expandir el panorama y definir mayores alcances biotecnológicos. Esto principalmente porque, al confirmar la presencia de plantas, algas, esponjas marinas, entre otros, capaces de albergar estos microorganismos fúngicos marinos en las costas costarricenses, es factible definir nuevos objetivos en el área de la investigación, considerando a estos hospederos como indicadores de la presencia de micoflora específica, productora de compuestos de interés, y que forman parte de la biodiversidad de Costa Rica.

Por ejemplo, *Rhizophora harrisonii* es una especie de planta que habita en los manglares de Costa Rica [47], y ha sido reportada como hospedera de *Pestalotiopsis clavispora*, un hongo endófito que es fuente de nuevos policétidos, los cuales presentaron citotoxicidad contra una línea celular de linfoma en ratón [48]. Esto permite definir un estudio de la planta en el país y, potencialmente, de *P. clavispora* como hospedero, lo que permitiría el desarrollo de nuevos productos anticancerígenos. Otro ejemplo es el alga roja *Sargassum* sp., la cual se ha identificado en la Zona del Pacífico Norte de Costa Rica [49], y a partir de la cual Sun *et al.* [50] lograron aislar el hongo endófito *Aspergillus wentii* EN-48, el cual es productor de diterpenoides, que han presentado citotoxicidad contra varias líneas celulares tumorales como MCF-7, HeLa, MDA-MB-231, HepG2, SMMC-7721, NCI-H460 y SW1990.

Conclusiones

La micoflora marina presenta una gran diversidad y, a pesar de no haber sido profundamente indagada y explotada en Costa Rica, de ella pueden surgir una gama de aplicaciones y procesos biotecnológicos interesantes y de gran utilidad para la industria, como la obtención de metabolitos secundarios, enzimas, productos anticancerígenos, antibióticos, cosmeceúticos y pigmentos. No obstante, el estudio insuficiente de los mismos, su aislamiento, cultivo y falta de comprensión en cuanto a su metabolismo, consisten en limitantes para su aplicabilidad.

En el caso de Costa Rica, debido a las características convenientes del país, tratándose de clima y ubicación geográfica, y debido al reporte de asociaciones de ciertos hongos marinos con otros organismos reportados en las zonas costeras del pacífico principalmente, es posible inferir que existe una profunda diversidad de esos fungi en el país. Sin embargo, la escasa literatura existente respecto al tema genera una brecha entre el conocimiento de los géneros y las especies presentes, y con ello una gran limitante en la ejecutabilidad biotecnológica de los mismos en Costa Rica. Por ello, se incita al desarrollo científico y estudio de los ecosistemas marinos y su microbiota presente en el país, con el fin de obtener un mejor aprovechamiento de la riqueza que aquí se encuentra.

Agradecimiento

Agradecemos al Dr. William Rivera Méndez, profesor e investigador de la Escuela de Biología del Instituto Tecnológico de Costa Rica, por el apoyo y colaboración durante la elaboración y revisión del presente trabajo de investigación. Su acompañamiento a lo largo del curso Procesos Biotecnológicos con el empleo de Hongos sembró un nuevo interés en un área de conocimiento poco estudiada y nos permitió hacer un aporte importante al mismo con este artículo.

Referencias

- [1] S. Hasan, M. Ansari, A. Ahmad, and M. Mishra, "Major bioactive metabolites from marine fungi: A Review," *Bioinformation*, vol. 11, no. 4, pp. 176–181, 2015, doi: 10.6026/97320630011176.
- [2] E. G. Jones and K. L. Pang, *Marine fungi: and fungal-like organisms*. Berlin, Germany: Walter de Gruyter, 2012.
- [3] E. B. G. Jones *et al.*, "Classification of marine Ascomycota, Basidiomycota, Blastocladiomycota and Chytridiomycota," *Fungal Divers.*, vol. 73, no. 1, pp. 1–72, 2015, doi: 10.1007/s13225-015-0339-4.
- [4] J. F. Imhoff, "Natural products from marine fungi - Still an underrepresented resource," *Mar. Drugs*, vol. 14, no. 1, p. 19, 2016, doi: 10.3390/md14010019.
- [5] P. Cicatiello, A. M. Gravagnuolo, G. Gnani, G. C. Varese, and P. Giardina, "Marine fungi as source of new hydrophobins," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 92, pp. 1229–1233, 2016, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2016.08.037.
- [6] E. Kohlmeyer and J. Kohlmeyer, *Marine Mycology: The Higher Fungi*, vol. 72, no. 3. New York, United States: Academic Press, 1980.
- [7] I. S. Wehrtmann and J. Cortés, *Marine Biodiversity of Costa Rica, Central America*. Costa Rica: Springer Science & Business Media, 2009.
- [8] T. A. Richards, M. D. M. Jones, G. Leonard, and D. Bass, "Marine Fungi: Their Ecology and Molecular Diversity," *Ann. Rev. Mar. Sci.*, vol. 4, no. 1, pp. 495–522, 2012, doi: 10.1146/annurev-marine-120710-100802.
- [9] T. A. Richards *et al.*, "Molecular diversity and distribution of marine fungi across 130 european environmental samples," *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.*, vol. 282, no. 1819, 2015, doi: 10.1098/rspb.2015.2243.
- [10] K. Duarte, T. A. P. Rocha-Santos, A. C. Freitas, and A. C. Duarte, "Analytical techniques for discovery of bioactive compounds from marine fungi," *TrAC - Trends Anal. Chem.*, vol. 34, no. 1, pp. 97–110, 2012, doi: 10.1016/j.trac.2011.10.014.
- [11] S. Agrawal, A. Adholeya, C. J. Barrow, and S. K. Deshmukh, "Marine fungi: An untapped bioresource for future cosmeceuticals," *Phytochem. Lett.*, vol. 23, no. November 2017, pp. 15–20, 2018, doi: 10.1016/j.phytol.2017.11.003.
- [12] T. S. Bugni and C. M. Ireland, "Marine-Derived Fungi: A Chemically and Biologically Diverse Group of Microorganisms," *Nat. Prod. Rep.*, vol. 21, no. 1, pp. 143–163, 2004, doi: 10.1002/chin.200417289.
- [13] Q. Li and G. Wang, "Diversity of fungal isolates from three Hawaiian marine sponges," *Microbiol. Res.*, vol. 164, no. 2, pp. 233–241, 2009, doi: 10.1016/j.micres.2007.07.002.
- [14] P. R. Jensen and W. Fenical, "Fungi in marine environments," *Fungal Divers.*, vol. 7, pp. 293–315, 2002.
- [15] G. Wang, "Diversity and biotechnological potential of the sponge-associated microbial consortia," *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 33, no. 7, pp. 545–551, 2006, doi: 10.1007/s10295-006-0123-2.

- [16] L. Dufossé, M. Fouillaud, Y. Caro, S. A. S. Mapari, and N. Sutthiwong, "Filamentous fungi are large-scale producers of pigments and colorants for the food industry," *Curr. Opin. Biotechnol.*, vol. 26, pp. 56–61, 2014, doi: 10.1016/j.copbio.2013.09.007.
- [17] R. N. Lima and A. L. M. Porto, "Recent Advances in Marine Enzymes for Biotechnological Processes," *Adv. Food Nutr. Res.*, vol. 78, pp. 153–192, 2016, doi: 10.1016/bs.afnr.2016.06.005.
- [18] R. Xu, G. M. Xu, X. M. Li, C. S. Li, and B. G. Wang, "Characterization of a newly isolated marine fungus *Aspergillus dimorphicus* for optimized production of the anti-tumor agent wentilactones," *Mar. Drugs*, vol. 13, no. 11, pp. 7040–7054, 2015, doi: 10.3390/md13117040.
- [19] J. Silber, A. Kramer, A. Labes, and D. Tasdemir, "From discovery to production: Biotechnology of marine fungi for the production of new antibiotics," *Mar. Drugs*, vol. 14, no. 7, p. 137, 2016, doi: 10.3390/md14070137.
- [20] J. Davies and D. Davies, "Origins and evolution of antibiotic resistance," *Microbiol. Mol. Biol. Rev.*, vol. 74, no. 3, pp. 417–433, 2010, doi: 10.1128/MMBR.00016-10.
- [21] L. Xu, W. Meng, C. Cao, J. Wang, W. Shan, and Q. Wang, "Antibacterial and antifungal compounds from marine fungi," *Mar. Drugs*, vol. 13, no. 6, pp. 3479–3513, 2015, doi: 10.3390/md13063479.
- [22] S. K. Deshmukh, V. Prakash, and N. Ranjan, "Marine fungi: A source of potential anticancer compounds," *Front. Microbiol.*, vol. 8, no. JAN, pp. 1–24, 2018, doi: 10.3389/fmicb.2017.02536.
- [23] J. W. Blunt, B. R. Copp, M. H. G. Munro, P. T. Northcote, and M. R. Prinsep, "Marine natural products," *Nat. Prod. Rep.*, vol. 28, no. 2, pp. 196–268, 2011, doi: 10.1039/c005001f.
- [24] M. F. Qiao, N. Y. Ji, X. H. Liu, K. Li, Q. M. Zhu, and Q. Z. Xue, "Indoloditerpenes from an algicolous isolate of *Aspergillus oryzae*," *Bioorganic Med. Chem. Lett.*, vol. 20, no. 19, pp. 5677–5680, 2010, doi: 10.1016/j.bmcl.2010.08.024.
- [25] F. Song *et al.*, "Trichoderma ketones A-D and 7-O-methylkoninginin D from the marine fungus *Trichoderma koningii*," *J. Nat. Prod.*, vol. 73, no. 5, pp. 806–810, 2010, doi: 10.1021/np900642p.
- [26] B. Wu, V. Oesker, J. Wiese, R. Schmaljohann, and J. F. Imhoff, "Two new antibiotic pyridones produced by a marine fungus, *Trichoderma* sp. strain MF106," *Mar. Drugs*, vol. 12, no. 3, pp. 1208–1219, 2014, doi: 10.3390/md12031208.
- [27] T. Veerasingam *et al.*, "Antibacterial efficacy of *Penicillium chermesinum* TTMF3 isolated from marine soils of Andaman and Nicobar Islands, India," *Prog. Biosci. Bioeng.*, vol. 2, no. 1, pp. 1208–1219, 2018, doi: 10.29269/pbb2018.v2i1.15.
- [28] X. Li, X. M. Li, G. M. Xu, C. S. Li, and B. G. Wang, "Antioxidant metabolites from marine alga-derived fungus *Aspergillus wentii* EN-48," *Phytochem. Lett.*, vol. 7, no. 1, pp. 120–123, 2014, doi: 10.1016/j.phytol.2013.11.008.
- [29] C. Vílchez, E. Forján, M. Cuaresma, F. Bédmar, I. Garbayo, and J. M. Vega, "Marine carotenoids: Biological functions and commercial applications," *Mar. Drugs*, vol. 9, no. 3, pp. 319–333, 2011, doi: 10.3390/md9030319.
- [30] C. Corinaldesi, G. Barone, F. Marcellini, A. Dell'Anno, and R. Danovaro, "Marine microbial-derived molecules and their potential use in cosmeceutical and cosmetic products," *Mar. Drugs*, vol. 15, no. 4, pp. 1–21, 2017, doi: 10.3390/md15040118.
- [31] C. Gómez, S. Palma, S. Calvo, P. Riobó, and P. Robledo, *Alimentación, nutrición y cáncer: prevención y tratamiento*. Madrid, España: UNED, 2016.
- [32] S.-K. Kim and F. Toldrá, *Marine Enzymes Biotechnology: Production and Industrial Applications, Part II-Marine Organisms Producing Enzymes*. Cambridge, United States: Elsevier Science, 2016.
- [33] A. Matuszewska *et al.*, "Laccase purified from *Cerrena unicolor* exerts antitumor activity against leukemic cells," *Oncol. Lett.*, vol. 11, no. 3, pp. 2009–2018, 2016, doi: 10.3892/ol.2016.4220.
- [34] R. C. Bonugli-Santos *et al.*, "Marine-derived fungi: Diversity of enzymes and biotechnological applications," *Front. Microbiol.*, vol. 6, no. MAR, 2015, doi: 10.3389/fmicb.2015.00269.
- [35] P. H. Mainardi *et al.*, "Laccase production in bioreactor scale under saline condition by the marine-derived basidiomycete *Peniophora* sp. CBMAI 1063," *Fungal Biol.*, vol. 122, no. 5, pp. 302–309, 2018, doi: 10.1016/j.funbio.2018.01.009.
- [36] A. W. F. Duarte *et al.*, "Taxonomic assessment and enzymes production by yeasts isolated from marine and terrestrial Antarctic samples," *Extremophiles*, vol. 17, no. 6, pp. 1023–1035, 2013, doi: 10.1007/s00792-013-0584-y.
- [37] K. Malik, J. Tokkas, and S. Goyal, "Microbial Pigments : A review," *Int J Microb. Res Technol*, vol. 1, no. 4, pp. 361–365, 2012.

- [38] M. Venkatachalam *et al.*, "Partial characterization of the pigments produced by the marine-derived fungus *Talaromyces albobiverticillius* 30548. Towards a new fungal red colorant for the food industry," *J. Food Compos. Anal.*, vol. 67, pp. 38–47, 2018, doi: 10.1016/j.jfca.2017.12.036.
- [39] A. Ulken, R. Víquez, C. Valiente, and M. Campos, "Marine fungi (Chytridiomycetes and Thraustochytriales) from a mangrove area at Punta Morales, Golfo de Nicoya, Costa Rica.," *Rev. Biol. Trop.*, vol. 38, no. 2, pp. 243–250, 1990, doi: 10.15517/rbt.v38i2.25054.
- [40] A. Calderón, "Aislamiento e identificación de hongos en octocorales del Caribe de Costa Rica," Tesis de maestría, Escuela de medicina veterinaria, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica, 2016.
- [41] C. Benavides-Varela, J. Samper-Villarreal, and J. Cortés, "Cambios en la cobertura de manglares en Bahía Culebra, Pacífico Norte de Costa Rica (1945-2010)," *Rev. Biol. Trop.*, vol. 64, no. 3, pp. 955–964, 2016, doi: 10.15517/rbt.v64i3.21464.
- [42] CIMAR, "Proyectos Vigentes para el 2020. Biodiversidad marina," 2020. <http://www.cimar.ucr.ac.cr/programas/proyectos-de-investigacion.html>.
- [43] A. Patel, S. Liefeldt, U. Rova, P. Christakopoulos, and L. Matsakas, "Co-production of DHA and squalene by thraustochytrid from forest biomass," *Sci. Rep.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–12, 2020, doi: 10.1038/s41598-020-58728-7.
- [44] B. Rusu, D. Francisc, and D. Cristian Vodnar, "DHA production by *Schizochytrium limacinum* SR-21 using crude glycerol as carbon source," *Lucr. Științifice*, vol. 60, no. 1, pp. 21–26, 2018, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/325949322>.
- [45] E. Caamaño *et al.*, "Isolation and molecular characterization of Thraustochytrium strain isolated from Antarctic Peninsula and its biotechnological potential in the production of fatty acids," *Brazilian J. Microbiol.*, vol. 48, no. 4, pp. 671–679, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.bjm.2017.01.011.
- [46] B. Negi, D. Kumar, and D. S. Rawat, "Marine Peptides as Anticancer Agents: A Remedy to Mankind by Nature," *Curr. Protein Pept. Sci.*, vol. 18, no. 9, pp. 885–904, 2017, doi: 10.2174/1389203717666160724200849.
- [47] E. Houndjinou, *El manglar: un ecosistema para conservar*, vol. 1. San José, Costa Rica: Fundación Neotrópica, 2013.
- [48] C. F. Pérez Hemphill, G. Daletos, Z. Liu, W. Lin, and P. Proksch, "Polyketides from the Mangrove-derived fungal endophyte *Pestalotiopsis clavispora*," *Tetrahedron Lett.*, vol. 57, no. 19, pp. 2078–2083, 2016, doi: 10.1016/j.tetlet.2016.03.101.
- [49] K. D. García Méndez, "Asociaciones entre moluscos Heterobranquios (Mollusca: Gastropoda) y macroalgas en el Pacífico de Costa Rica," Tesis de licenciatura, Facultad de ciencias, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica, 2015.
- [50] H. F. Sun *et al.*, "Asperolides A-C, tetranorlabdane diterpenoids from the marine alga-derived endophytic fungus *Aspergillus wentii* EN-48," *J. Nat. Prod.*, vol. 75, no. 2, pp. 148–152, 2012, doi: 10.1021/np2006742.

Metodología para la inclusión de criterios ambientales en las compras públicas: Caso de estudio Instituto Tecnológico de Costa Rica¹

Methodology for the inclusion of environmental criteria in public procurement: Case study Instituto Tecnológico de Costa Rica

Juan José Gamboa-Castro², Teresa Salazar-Rojas³

Fecha de recepción: 10 de enero de 2020

Fecha de aprobación: 23 de abril de 2020

Gamboa-Castro, J.J; Salazar-Rojas, T. Metodología para la inclusión de criterios ambientales en las compras públicas: caso de estudio Instituto Tecnológico de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-2. Abril-Junio 2021. Pág 60-75.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i2.4897>

1 Artículo basado en el Proyecto Final de Graduación “Metodología para la inclusión de criterios ambientales en las compras públicas: Caso de estudio Instituto Tecnológico de Costa Rica” del primer autor. Disponible en <http://hdl.handle.net/2238/7371>

2 Ingeniero Ambiental. Ernst & Young S.A. Costa Rica. Correo electrónico: juan.gamboa.castro@cr.ey.com.

 <https://orcid.org/0000-0003-3817-5757>

3 Master en Gestión Ambiental Escuela de Química (Carrera de Ingeniería Ambiental), Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: tsalazar@tec.ac.cr.

 <https://orcid.org/0000-0002-2366-3638>



Palabras clave

Compras públicas verdes; contratación pública ecológica; criterios ambientales; compras públicas sostenibles; gobierno; desarrollo sostenible.

Resumen

En Costa Rica el principal consumidor de bienes y servicios es el sector público, esto le confiere la capacidad de accionar los mercados hacia modelos de producción sostenibles, lo cual ha venido intentando hacer mediante iniciativas para promover las compras verdes y sostenibles en sus instituciones estatales, sin embargo, aún existe desconocimiento y falta de experiencia en la implementación de programas de este tipo de compras. Esta investigación propone una metodología para la inclusión de criterios ambientales en los procesos de contratación administrativa, desarrollada en el Tecnológico de Costa Rica (TEC). Para esto, se priorizaron categorías de productos, se definieron criterios ambientales con sus respectivas evidencias de verificación y se realizaron entrevistas a proveedores con el fin de determinar la factibilidad de cumplimiento; por último, se clasificaron los criterios según la legislación vigente. Los grupos de productos seleccionados considerando relación de gasto – presupuesto anual de la institución, volumen de compra, cobertura interna de uso e impacto ambiental fueron mobiliario, suministros de oficina, vestuario y servicios de alimentación; resultando con mayor tasa de cumplimiento de las especificaciones, los proveedores de las dos primeras categorías. En el caso de textiles se detectó una carencia de información referente a los criterios ambientales, y para los servicios de alimentación, se evidenció la falta de capacitación de las empresas y el insuficiente avance de programas de eco etiquetado en productos cárnicos a nivel nacional.

Keywords

Green public procurement; environmental criteria; sustainable public procurement; government; sustainable development.

Abstract

The public sector is the main consumer of the country; therefore, it has the capacity to drive markets towards sustainable production models. Costa Rica has initiatives to promote green and sustainable public procurement. However, there is still lack of knowledge and lack of experience. This research proposes a methodology applicable to any public entity for the inclusion of environmental criteria in its procurement processes and was developed at Tecnológico de Costa Rica (TEC). To this end, four product categories were prioritized, environmental criteria were determined with their respective evidences of verification and market consultations were carried out to determine the feasibility of compliance. Finally, the criteria were classified according to the current legislation. The selected product groups, considering the annual expenditure of the institution–budget, purchasing volume, internal use coverage and environmental impact, were furniture, office supplies, clothing and food services; resulted in a higher compliance rate of specifications for the suppliers of the first two categories. In the case of textiles was found deficiencies about the environmental traceability of raw materials and production processes, for the latter category shows the lack of training of the companies and the insufficient progress of eco-labeling programs in meat products at national level.

Introducción

Como parte de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, en el 2015, la ONU establece los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Particularmente el objetivo doce corresponde a garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles, una de las metas propuestas para este objetivo es “promover prácticas de adquisición pública que sean sostenibles, de conformidad con las políticas y prioridades nacionales” [1]

El concepto de Compras Públicas Verdes (CPV) alude exclusivamente al eje ambiental de las Compras Públicas Sostenibles (CPS), también se le conoce como Contratación Pública Ecológica (CPE) y es el campo de acción de esta investigación; de acuerdo con la Comisión de las Comunidades Europeas [2] las CPV se definen como sigue:

Proceso por el cual las autoridades públicas tratan de adquirir mercancías, servicios y obras con un impacto medioambiental reducido durante su ciclo de vida, en comparación con el de mercancías, servicios y obras con la misma función primaria que se adquirirían en su lugar.

Analizando los términos de CPS y CPV, no es posible utilizarlos indistintamente, si bien se encuentran íntimamente relacionados, la CPV tiene una óptica meramente ambiental, de acuerdo con Brammer & Walker [3] este concepto dio origen al de CPS, pues las investigaciones relativas a los aspectos de sostenibilidad en las compras indican que el primer enfoque implementado fue el de gestión de los problemas ambientales en las cadenas de suministro.

Tanto las CPS como las CPV representan un desafío para los funcionarios dedicados a los procesos de contratación administrativa, les exige maximizar el valor por el dinero a lo largo del ciclo de vida del bien y no únicamente en el momento de la compra [4], este principio implica un cambio en el paradigma bajo el cual se adjudican los contratos comúnmente, es decir, aquel donde la oferta con el precio más bajo resulta favorecida, ya que en muchas ocasiones esta práctica resulta en la adquisición de bienes con huellas ecológicas elevadas y a largo plazo representan pérdidas para el dinero público, así como perjuicios al ambiente [5].

Al hablar de CPV un tema relevante es la definición de los criterios ambientales, ya que éstos hacen referencia a aquella característica del bien solicitado que disminuye su impacto ambiental en relación con otro cuya función es equivalente [6]. Estos criterios pueden ser de selección positiva, cuando favorecen determinados bienes con características ambientalmente amigables (por ejemplo, recipientes para alimentos compostables en un lapso no mayor a 180 días) o criterios de selección negativa, donde se engloban aquellos cuyo objetivo es excluir o restringir la participación de productos o servicios con propiedades nocivas para el ambiente (por ejemplo, telas que contengan más de 1,0 ppm de plomo dentro de su composición) [7].

Las entidades públicas deben definir e implementar mecanismos y evidencias de verificación para controlar que los criterios ambientales solicitados sean satisfechos, así como lo hacen, por ejemplo, con especificaciones de calidad, esto con el fin de asegurarse que los proveedores cuentan con pruebas técnicas para asegurar la veracidad de las características que hacen al producto menos perjudicial para el ambiente. Así, además de las especificaciones técnicas ambientales, es necesario establecer en los pliegos de condiciones de las licitaciones las disposiciones para su comprobación [8].

Las CPV son un eje transversal a considerar en el marco de ambientalización del sector público costarricense, que pretende la mejora continua en las organizaciones estatales [9]. Sin embargo, a pesar de esfuerzos realizados estudios como el de Fundación Centro de Gestión Tecnológica e Informática Industrial (CEGESTI) [10], demuestran que el sector público aún se encuentra en proceso de adaptación y requiere capacitación y herramientas para la implementación de un programa de compras verdes exitoso. La principal problemática radica en la falta de criterio

técnico para integrar especificaciones ambientales dentro de los términos de referencia de las compras, así como la comprobación de su cumplimiento con evidencias objetivamente verificables en el contexto costarricense.

Por tanto, con el objeto de solventar tales necesidades, esta investigación plantea una metodología para la inclusión de criterios ambientales en las compras públicas, estudiando el caso del Tecnológico de Costa Rica (TEC), para lo cual se realizaron consultas a distintos proveedores, con el fin de conocer el nivel de exigencia de los criterios a solicitar en futuras contrataciones.

Metodología

Definición del caso de estudio

La investigación se desarrolló en el Tecnológico de Costa Rica (TEC), sede Central; localizado en la provincia de Cartago, cantón Cartago, distritos Oriental y Dulce Nombre. La ubicación se presenta en la figura 1.

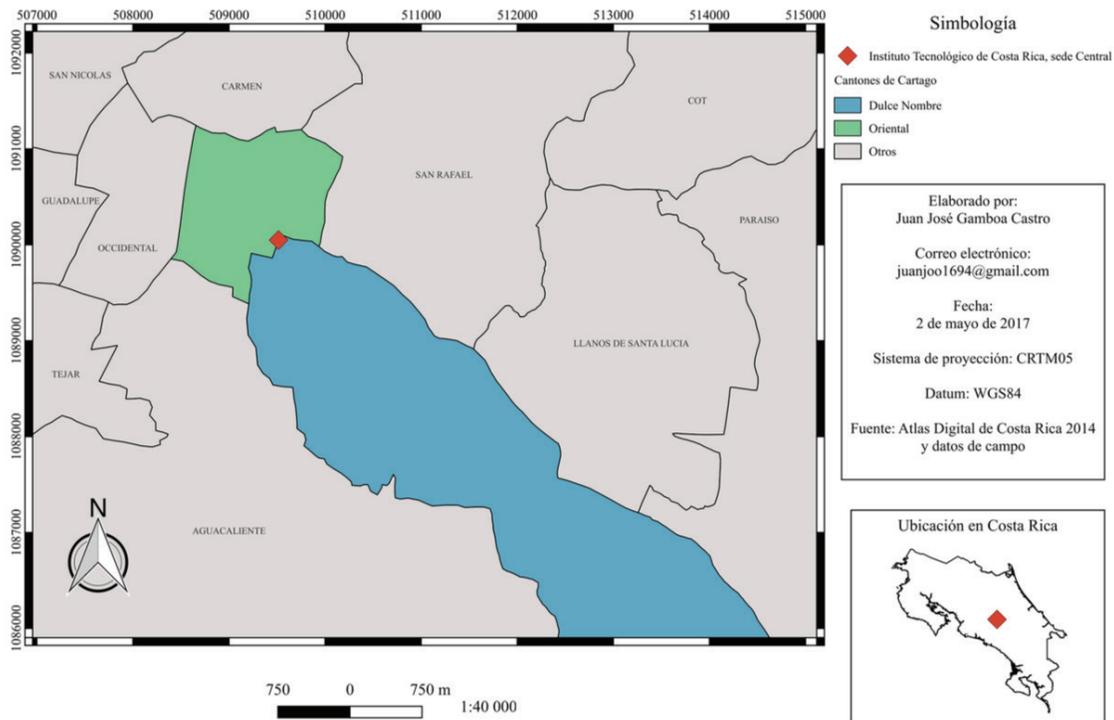


Figura 1 Ubicación del Tecnológico de Costa Rica, sede Central.

El TEC es una Institución autónoma de educación superior universitaria, dedicada a la docencia, investigación y extensión de la tecnología y ciencias conexas [11]. En los últimos años su desempeño ambiental ha sido sobresaliente, obteniendo la más alta calificación otorgada por MINAE a su Programa de Gestión Ambiental Institucional (PGAI), además ha sido galardonada con Bandera Azul Ecológica en las categorías Centros Educativos y Cambio Climático para varios de sus recintos a nivel nacional.

Con motivo de mantener sus altos estándares en materia de gestión ambiental y operar bajo el principio de mejora continua, el TEC se interesó en profundizar en la temática de CPV; para lo cual se contó con el apoyo de la Vicerrectoría de Administración, la Unidad Institucional de Gestión Ambiental y Seguridad Laboral y la Unidad de Proveduría del Departamento de Aprovisionamiento.

Priorización y selección de categorías de productos

Con la finalidad de delimitar las categorías de productos (grandes grupos de bienes y servicios cuya naturaleza es semejante) para la realización de esta investigación, como primer filtro, se tomó en cuenta únicamente las categorías contenidas en la Guía de CPS (Dirección General de Administración de Bienes y Contratación Administrativa (DGABCA). [12], pues son en las que existe mayor experiencia.

En dicha guía, se encuentran priorizadas las 10 categorías de productos de mayor demanda en las instituciones del Estado costarricense [12], sin embargo, al no ser tan satisfactoria su implementación [10], es factible reforzar la inclusión de criterios ambientales desde una perspectiva de enfoque de ciclo de vida, analizando la realidad de los proveedores o posibles oferentes del TEC.

El alcance de los grupos de productos a incluir se consensuó con la Regente Ambiental de la Unidad Institucional de Gestión Ambiental y Seguridad Laboral del TEC y el coordinador de la Unidad de Proveduría del Departamento de Aprovisionamiento; tomando en cuenta el estado actual de la Institución en la implementación de CPV, por lo que como segundo filtro, se analizaron un conjunto de pliegos de condiciones de contratos adjudicados y/o finiquitados relativos las categorías mencionadas, con el fin de determinar existencia o no de especificaciones técnicas ambientales en los criterios de admisibilidad o evaluación.

Finalmente, como tercer filtro, se adaptó la herramienta matriz de selección y priorización de bienes y servicios [5]. La adaptación consiste en una hoja de cálculo en Microsoft Excel Versión 15.31, en la que se sometieron las categorías de producto a una valoración frente a variables de selección y priorización como relación de gasto de objeto – presupuesto total, volumen de compra, impacto ambiental, entre otras; cada variable cuenta con una ponderación de acuerdo con su relevancia, así, los productos con los mayores valores numéricos fueron los prioritarios para la inclusión de criterios ambientales.

La ponderación de cada variable, así como sus grados, se definen en el cuadro 1.

Criterios Ambientales y evidencias de verificación

Revisión de literatura

Para la identificación de criterios ambientales con su respectiva evidencia de verificación aplicables a las categorías de productos priorizadas, se realizó una revisión bibliográfica orientada a fuentes de países líderes en materia de CPV y CPS como los miembros de la UE, Japón, Estados Unidos y algunos casos en la región latinoamericana, específicamente Colombia, Chile y Costa Rica. La selección de estos criterios se basó en la frecuencia de aparición en las referencias bibliográficas y en su regulación por legislación nacional o normas voluntarias.

Cuadro 1. Descripción de las variables de evaluación y escala para la matriz de selección y priorización de bienes y servicios en el ITCR. (Adaptado de [13]; [5]).

Variable	Definición	Ponderación (%)	Grado	Significado	Escala
Relación de gasto de objeto – presupuesto total	Proporción (división matemática) en colones destinados a la contratación del bien o servicio sobre el total destinado a la subpartida del presupuesto anual a la que pertenece ese objeto de gasto	20	1	Bajo	Relación < 3%
			2	Medio	Relación entre 4% y 10%
			3	Alto	Relación > 11%
Volumen de compra	Estimación cualitativa de la cantidad del producto que se adquiere durante un período de tiempo determinado	20	1	Bajo	Bajo volumen de compra
			2	Medio	Volumen de compra moderado
			3	Alto	Alto volumen de compra
Impacto ambiental	Cantidad de aspectos ambientales asociados al producto bajo la perspectiva de enfoque de ciclo de vida	30	1	Bajo	El objeto de gasto presenta de 1 a 4 aspectos ambientales
			2	Medio	El objeto de gasto presenta de 5 a 8 aspectos ambientales
			3	Alto	El objeto de gasto presenta 9 o más aspectos ambientales
Cobertura interna de uso	Estimación cualitativa del bien o servicio que se utiliza por los funcionarios de la Institución	30	1	Bajo	Bajo nivel de uso/consumo
			2	Medio	Moderado nivel de uso/consumo
			3	Alto	Alto nivel de uso/consumo

Entrevista a proveedores de las categorías de productos

Uno de los factores medulares en la implementación de las CPV es fiscalizar el cumplimiento de las especificaciones técnicas ambientales que se solicitan en el pliego de condiciones, es por ello que, se construyó una entrevista semiestructurada [14] para proveedores de cada uno de los sectores que se abarcan en esta investigación, la finalidad las mismas fue determinar la factibilidad de las empresas para ofrecer bienes y servicios con menor impacto ambiental.

A continuación, se presenta la estructura de dichas entrevistas:

- Objetivo.
- Información general sobre el entrevistado y la empresa.
- Consentimiento informado.
- Clasificación de la empresa de acuerdo con su tamaño (grande, mediana, pequeña o micro).

- Cuadros que incluyen los criterios ambientales clasificados según la etapa del ciclo de vida del producto, opciones de respuesta (sí, no, desconoce, no aplica) para determinar si la empresa satisface el criterio ambiental, una columna denominada “Evidencia” donde se recopiló el mecanismo de verificación que utiliza la empresa, , una columna con las evidencias de verificación según lo recopilado en la revisión bibliográfica y una fila denominada “Otros” con la finalidad de que la empresa propusiera criterios ambientales con sus respectivas evidencias..
- Tres preguntas abiertas acerca de barreras y beneficios de la inclusión de criterios ambientales dentro de los bienes o servicios que ofrecen al mercado, consultas dirigidas únicamente a aquellas empresas que consideran sus productos como “verdes”.

La base para la elaboración de las entrevistas fue la revisión bibliográfica de criterios ambientales y evidencias de verificación. Al provenir la mayoría de esta información de fuentes internacionales, los criterios se adecuaron a la realidad costarricense.

Selección de empresas a entrevistar

Se siguió un muestreo cualitativo no probabilístico por cuotas, cuya finalidad fue seleccionar casos o unidades que ayudaran a comprender detalles y actores del fenómeno en estudio, sin pretender hacer una generalización a la población en términos de probabilidad [14]. De acuerdo con Hernández et al. [14], el tamaño mínimo de la muestra para estudios de teoría fundamentada o entrevistas es de 20 a 30 casos, para esta investigación se propuso en 20, teniéndose 5 empresas por cada categoría de producto. La elección de las empresas depende de las características de la investigación [15], por ejemplo, para este caso en particular se tomó en cuenta dos clases de proveedores: los que resultan adjudicados con mayor frecuencia en el TEC [16], y la segunda clase, empresas que no necesariamente hayan sido proveedores de la Institución pero que afirmen ofrecer productos con características ambientales o sostenibles, para ello se contactó con la Asociación Empresarial para el Desarrollo y la Cámara de Industrias de Costa Rica, también se visitó el portal web Páginas Verdes de Costa Rica [17].

Análisis de entrevistas

A partir de los hallazgos obtenidos en las entrevistas, se realizó el cálculo de la frecuencia relativa para cada criterio para las clases enunciadas en la investigación realizada por Gamboa-Castro y Salazar-Rojas [17].

Clasificación de criterios ambientales

En concordancia con el Decreto N° 33411-H Reglamento a la Ley de Contratación Administrativa [18] y la NTACS [12], se clasificaron los criterios ambientales recopilados como admisibilidad o evaluación. Los criterios de admisibilidad son aquellos requisitos mínimos estipulados en el pliego de condiciones que deben cumplir los posibles oferentes, sin los cuales no podrían avanzar a las siguientes etapas del proceso licitatorio. Por su parte, los criterios de sistema de evaluación corresponden a requisitos deseables mas no indispensables para considerarse elegible y que se determina su cumplimiento después de haber superado la etapa de acatamiento de criterios de admisibilidad [18]. En esta investigación, para clasificar los criterios recopilados como admisibilidad o evaluación, se revisó la normativa aplicable a las categorías de productos en el Sistema Costarricense de Información Jurídica (SCIJ) de la Procuraduría General de la República (PGR), en el Sistema de Reglamentación Técnica del MEIC y en el catálogo de normas técnicas del Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO), de modo que, si existe legislación que avale el criterio ambiental, su clasificación es de admisibilidad; de lo contrario, se recurrió a los resultados de las entrevistas a los proveedores y se determinó

en conjunto con la Regente Ambiental del TEC una tasa mínima de cumplimiento del criterio con evidencia objetivamente verificable, para clasificarlo como admisibilidad, en caso de que el porcentaje obtenido sea menor, se clasificó como evaluación.

Limitaciones

Las empresas entrevistadas fueron seleccionadas por haber sido proveedoras de la Institución o por ofrecer productos que incluyen la variable ambiental dentro de su ciclo de vida; no se pretende generar inferencias estadísticas significativas a la situación de Costa Rica. El análisis efectuado es particular para el TEC, lo cual podría aproximarse a la realidad de otras instituciones públicas, sin embargo, no es objeto de esta investigación comprobar si existe tal correlación.

Asimismo, se asume la veracidad de las respuestas recolectadas en las entrevistas. Por último, el factor económico (costo de los bienes y servicios) se excluyó del estudio, al ser dinámico y dependiente de múltiples elementos como la cantidad de bienes a adquirir, la capacidad de negociación de la Institución con los proveedores, la situación del mercado, entre otros.

Resultados y discusión

Priorización y selección de categorías de productos

Inicialmente se aplicó el primer filtro para seleccionar las categorías de bienes y servicios, considerando solo aquellas incluidas en la Guía de CPS del Ministerio de Hacienda [12]: equipo de cómputo, equipo de oficina, impresión y reproducción, limpieza, suministros de oficina, vehículos, servicios de alimentación, vestuario, publicidad y servicios de vigilancia; esto debido a que dichos grupos representan las áreas de gasto en las que existe experiencia a nivel nacional e internacional, guías y conocimiento para implementar CPV, en general, son los de mayor demanda en el sector público [12], [2], [16]. La categoría de servicios de vigilancia fue excluida, ya que en el caso del TEC, estos servicios no se contratan, al contar con funcionarios permanentes para ello.

En la figura 2 se presenta el presupuesto destinado en el 2016 para los objetos de gasto incluidos en el primer filtro.

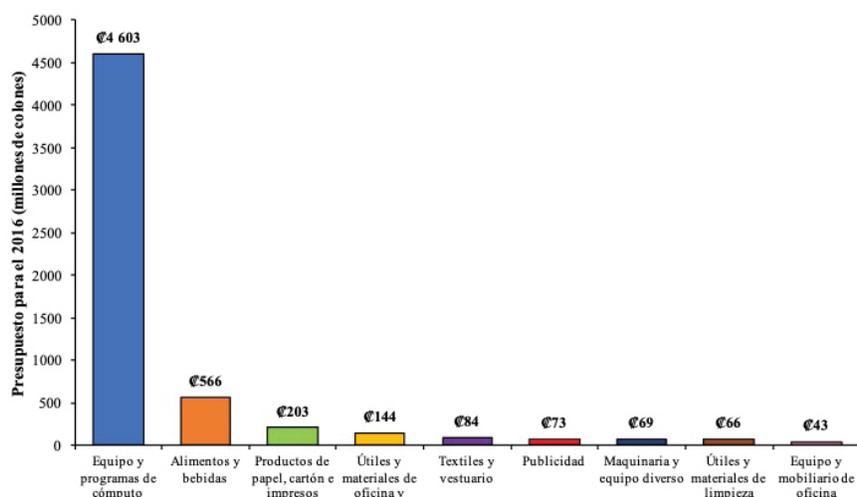


Figura 2. Presupuesto 2016 consignado a las nueve categorías de productos aplicables al TEC de la Guía de CPS de Costa Rica.

De acuerdo con la figura 2, la categoría de productos con mayores recursos para su contratación de los nueve incluidos en el primer filtro fue equipo y programas de cómputo, lo cual tiene sentido al ser el TEC una institución de educación superior predominantemente de ingenierías, por lo que su inversión en este rubro es significativa; seguido por alimentos y bebidas destinados a los Restaurantes Institucionales y servicios de alimentación temporales para eventos y actos protocolarios, posteriormente productos de papel, cartón y otros, el cual es relativamente bajo debido a los esfuerzos que hace la Institución en la digitalización de servicios y procesos; el siguiente objeto en orden de gasto son los útiles y materiales de oficina, seguido de textiles y vestuario, publicidad, maquinaria y equipo diverso (donde se incluyen los vehículos), implementos de limpieza, por último, mobiliario de oficina.

Como segundo filtro, se realizó el análisis de los pliegos de condiciones más recientes acerca de estos nueve objetos de gasto, se evidenció que la adquisición de equipo de cómputo y suministros de limpieza actualmente cuentan con especificaciones técnicas ambientales dentro del sistema de evaluación, es decir, se otorgan puntos adicionales a los concursantes que presenten evidencias referente a estos criterios, por este motivo, se excluyeron del alcance de este estudio, para incursionar en otras áreas donde exista total carencia de los mismos, dichas áreas son las restantes: equipo de oficina, impresión y reproducción, suministros de oficina, vehículos (maquinaria y equipo diverso), servicios de alimentación y vestuario.

Como última etapa para la determinación de las categorías de productos, se aplicó la adaptación de la matriz de selección y priorización de bienes y servicios obteniéndose en el cuadro 2 los resultados obtenidos.

Con base en los resultados anteriores, se seleccionaron las siguientes categorías de productos: mobiliario y suministros de oficina, servicios de alimentación y vestuario, categorías semejantes a las obtenidas por M. Alonso [19] y B. Pacheco & M. Bastante [20] en estudios similares. A continuación, se define el alcance de cada una de estas categorías:

- Mobiliario de oficina: productos destinados al soporte y organización de implementos de oficina como escritorios, estantes, armarios.
- Suministros de oficina:
 - Papel de impresión y escritura: incluye el papel utilizado en oficinas para impresión, fotocopias, escritura y usos cotidianos.
 - Suministros varios: material de archivo (carpetas y archivadores), fundas plásticas, derivados del papel (libretas, blocs de notas, sobres manila y de correspondencia, notas autoadhesivas), bolígrafos, marcadores permanentes, acrílicos (para pizarra) y resaltadores, corrector líquido, lápices de grafito, cintas adhesivas y pegamento, tijeras, grapadoras, sacapuntas y gomas de borrar.
- Vestuario: incluye uniformes de seguridad, camisetas y textiles en general.
- Servicios de alimentación:
 - Temporales (catering service): servicios contratados por la Institución para eventos ocasionales y actos protocolarios.
 - Restaurante Institucional: servicio permanente administrado por el TEC, esta subcategoría se limitó a la inclusión de criterios ambientales para frutas, verduras, hortalizas y carne (pescado, res y pollo).

Sodas concesionadas: locales destinados a proveer servicios de alimentación dentro del TEC, cuya administración no es competencia directa de la Institución. Para esta subcategoría, el alcance incluye únicamente criterios ambientales de ejecución del servicio.

Cuadro 2. Resultados de la matriz de selección y priorización de bienes y servicios para la implementación de CPV en el TEC.

Bienes y servicios	Relación de gasto/ presupuesto anual (20%)	Volumen de compra (20%)	Impacto Ambiental (30%)	Cobertura interna de uso (30%)	Ponderación
Mobiliario de oficina	1	3	2	3	2,3
Impresión y reproducción	3	1	1	2	1,7
Suministros de oficina	3	3	3	3	3
Vehículos	1	1	3	1	1,6
Servicios de alimentación	3	3	3	3	3
Vestuario	2	2	3	2	2

Criterios ambientales y evidencias de verificación

Utilizando el enfoque cualitativo de ciclo de vida, se determinaron los criterios ambientales con su respectiva evidencia de verificación para las 4 categorías de productos en estudio. En general, los criterios están orientados al uso de materiales, reciclados, reciclables y menos impactantes al ambiente, disminución de generación de residuos, facilidad de reparación, procedencia de materias primas, menos uso de material de empaque, entre otros [6]. Además de los beneficios en materia de sostenibilidad de los criterios ambientales al momento de planificar y realizar una compra, la Institución contratante asegura la trazabilidad en el proceso productivo, esto brinda la certeza de que se realizó una compra responsable y que dio correcto uso a la Hacienda Pública.

Entrevista a proveedores de las categorías de productos

Caracterización de la muestra analizada

Se entrevistaron 30 empresas que comercializan las categorías de productos analizadas en este estudio. La distribución de acuerdo con su tamaño se muestra en la figura 3, la mayoría de los proveedores consultados corresponden a microempresas (43%), seguido de medianas (23%), por último, grandes y pequeñas (17% para cada grupo). Lo anterior implica que para este estudio las PYMES tuvieron un papel primordial, reflejo de la realidad nacional, pues de acuerdo con datos del Ministerio de Economía, Industria y Comercio [21] el parque empresarial de Costa Rica está conformado por un 93,4% de PYMES y el restante 6,6% corresponde a grandes empresas.

En cuanto a la distribución de entrevistados de acuerdo con la categoría de producto, la figura 4 muestra que un 30% se encarga del comercio de productos textiles y la misma tasa se dedica a servicios de alimentación. Por su parte, un 23% distribuyen suministros de oficina, y la menor participación, con un 17%, es del sector de confección y venta de mobiliario de oficina, esto como consecuencia de que no se localizaron empresas que se publiciten como verdes, por tanto, se entrevistó únicamente a las que han sido proveedoras institucionales.

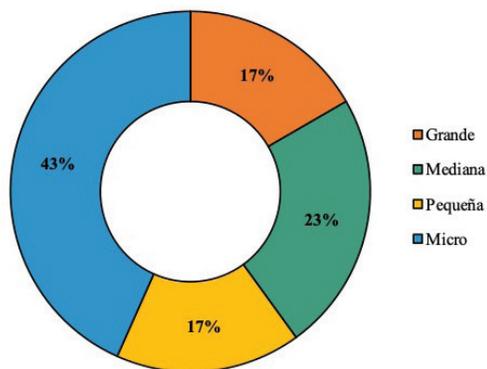


Figura 3. Distribución porcentual respecto a la clasificación de las empresas entrevistadas de acuerdo con su tamaño.

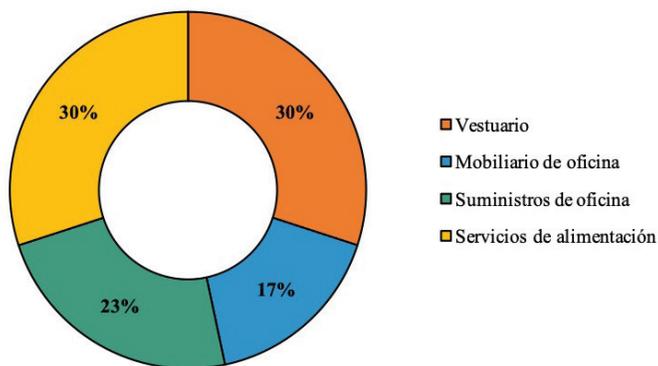


Figura 4. Distribución porcentual respecto a la actividad comercial de las empresas entrevistadas.

Análisis general de cumplimiento de criterios ambientales

En la figura 5 se presentan los resultados globales obtenidos en las entrevistas para cada categoría de producto. A partir de esta se concluye que los productos con mayor porcentaje de cumplimiento de los criterios con evidencia objetivamente verificable son la categoría de mobiliario de oficina (54%) y la subcategoría de papel para impresión y escritura (53%), ambos tipos de artículos derivados de la madera, para la cual existe mayor capacidad de trazabilidad y consideraciones ambientales a lo largo de su ciclo de vida por medio de certificaciones ampliamente extendidas a nivel mundial. Mientras que las subcategorías de Restaurante Institucional (32%) y suministros varios (39%) presentan las menores tasas de satisfacción de las especificaciones técnicas ambientales consultadas.

A su vez, de la categoría de mobiliario de oficina (31%) y la subcategoría de papel para impresión y escritura (53%) se obtuvo los mayores niveles de incumplimiento de criterios, específicamente en etapas del ciclo de vida como manufactura y embalaje. Por su parte, el más alto desconocimiento de los criterios ambientales y su acatamiento recae en el vestuario

(100%) y en los suministros varios (37%), situación que ocurre como consecuencia de que los entrevistados cumplen la función de distribuidores, es decir, no tienen control sobre la selección de materias primas y el proceso productivo.

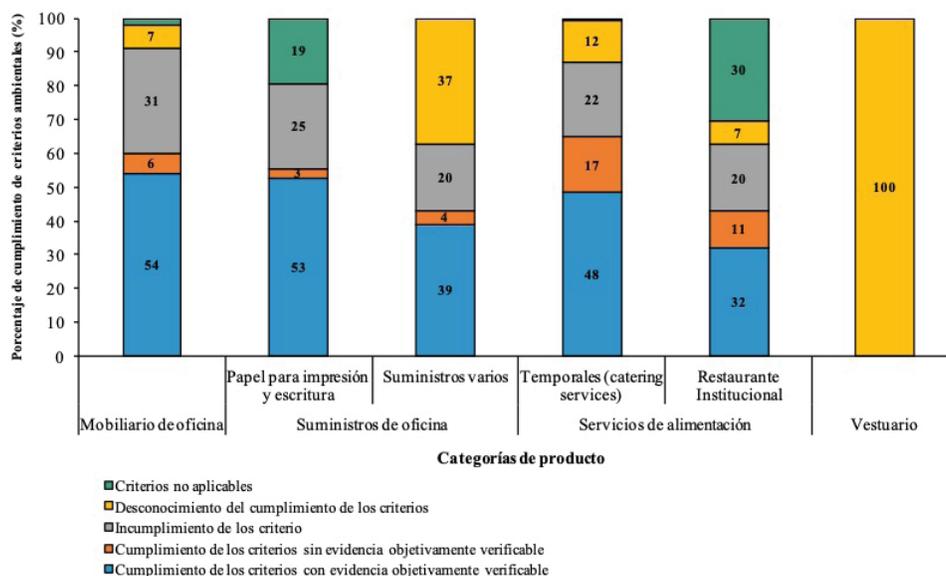


Figura 5. Distribución porcentual del cumplimiento de criterios ambientales para las categorías de productos.

Clasificación de criterios ambientales

Según la NTACS [12] entre otras consideraciones, un criterio de admisibilidad debe hacer referencia a experiencia mínima del proveedor, aspectos básicos de capacidad financiera, características técnicas indispensables y cumplimiento básico de legislación que incluya explícitamente el criterio; de la lista anteriormente mencionada, se seleccionó la última condición para realizar la clasificación, pues el cumplimiento legal es objetivamente verificable para justificar la inclusión de una especificación técnica ambiental dentro de los requisitos indispensables de un pliego de condiciones, además de que no debe otorgarse puntuación adicional por su cumplimiento.

Por otra parte, esta misma normativa [12] faculta a las instituciones a realizar un estudio preliminar de mercado, con el fin de esclarecer la sección del cartel en la cual se deben asignar los criterios, y evitar lo que implica la resolución infructuosa de un proceso de contratación administrativa, es por ello que, con base en las entrevistas realizadas se definió en consenso con la Regente Ambiental del TEC que, si el criterio ambiental presenta una tasa de cumplimiento con evidencia objetivamente verificable mayor al 50%, se cataloga de admisibilidad y menor a este límite, se clasifica como de evaluación.

Para los criterios que solo es posible verificarlos durante la ejecución del contrato, pese a estar clasificados como admisibilidad o evaluación (criterios de seguimiento a contrato), es necesario agregar una cláusula de sanciones por incumplimiento durante la ejecución del contrato, tal como lo estipula la NTACS [12].

En la figura 6 se presenta el resultado de la clasificación de los criterios ambientales para cada una de las categorías, inclusive los sugeridos por los proveedores. Esto permite una visualización general, de que, para las categorías estudiadas a excepción de servicios de alimentación temporal, la mayoría de los criterios se clasifican como de evaluación al no ser

un requisito legal o ser satisfecho por el 50% o más de los proveedores consultados. Lo cual evidencia una falta de madurez en el tema a nivel de legislación y en las formas de producción y distribución de productos y servicios por parte de los proveedores.

Para la categoría de mobiliario de oficina, se obtuvo un 44% de admisibilidad con un 12% que cuentan con algún tipo de normativa que respalde su inclusión dentro de los requisitos de admisibilidad y un 32% de los criterios resultaron de admisibilidad según el parámetro definido y 56% de evaluación. Los criterios para el sistema de evaluación son aquellos que implican innovación en el diseño, uso de materiales novedosos y retan la creatividad del proveedor.

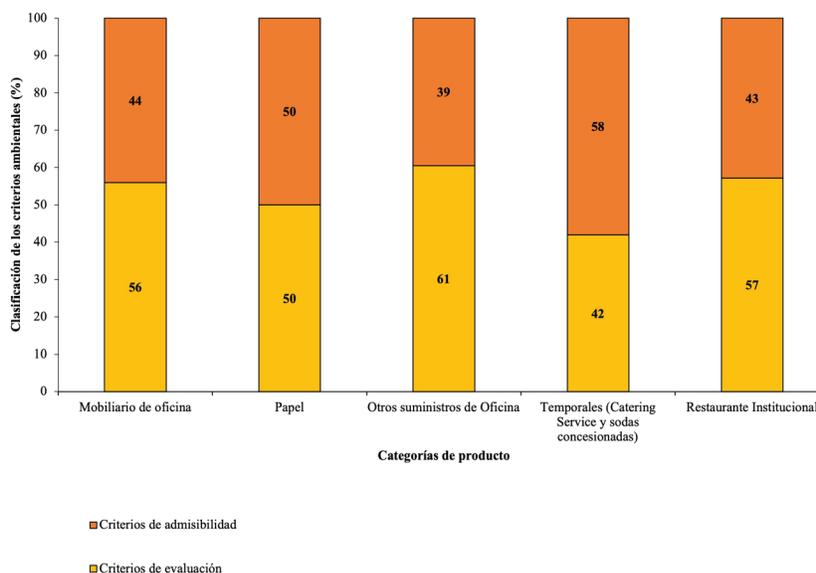


Figura 6. Distribución porcentual de la clasificación de los criterios ambientales según las categorías de productos.

De acuerdo a la figura 6, para los servicios de alimentación temporales, el 58% de los criterios evaluados fueron de admisibilidad 35% cuentan con normativa jurídica y voluntaria aplicable, un porcentaje significativo respecto a otras categorías, esto debido a que los productos comestibles como cárnicos y agrícolas cuentan con mayor regulación por su importancia en la salud pública y un 42% de las especificaciones se catalogaron como de evaluación, puesto que criterios donde se solicitan certificaciones voluntarias como la de INCOPECA, MarViva y SENASA, entre otras, no se encuentran difundidos entre los proveedores entrevistados como consecuencia del insipiente avance de las mismas a nivel nacional. Lo mismo ocurrió con la subcategoría de Restaurante Institucional donde se obtuvo un 43% de criterios para admisibilidad (21% con normativa) y un 57% para evaluación.

Para la categoría de Servicios de alimentación, se dificulta un poco más la inclusión de criterios ambientales, ya que la mayoría de los proveedores cumplen la función de distribuidores, es decir, no tienen control sobre las materias primas ni procesos de manufactura, por ello, deben ir hacia atrás en la cadena de suministro para exigir las prácticas ambientales que se solicitan en los carteles. La clasificación de los criterios irá cambiando paulatinamente hasta que el mercado sea capaz de ofrecer los de evaluación como admisibilidad.

Con respecto al vestuario la normativa relacionada a textiles corresponde al Reglamento Técnico Centroamericano. Textiles y productos textiles. Requisitos de etiquetado. RTCA 51.01.08:12 y el Decreto N° 25989-MEIC RTCR 235:1997. Productos textiles. Definiciones y requisitos; no obstante, ninguna de estas dos incluye criterios ambientales para prendas y afines, debido a

esto y a los resultados obtenidos en las entrevistas, podrán incluirse en el sistema de evaluación del pliego de condiciones, hasta que la industria textil costarricense demuestre avances en materia de sostenibilidad.

Resumen de Propuesta de Metodología para Compras con Criterios Ambientales

En la figura 7 se presenta un diagrama de flujo de la metodología propuesta, en este caso, aplicada al TEC.

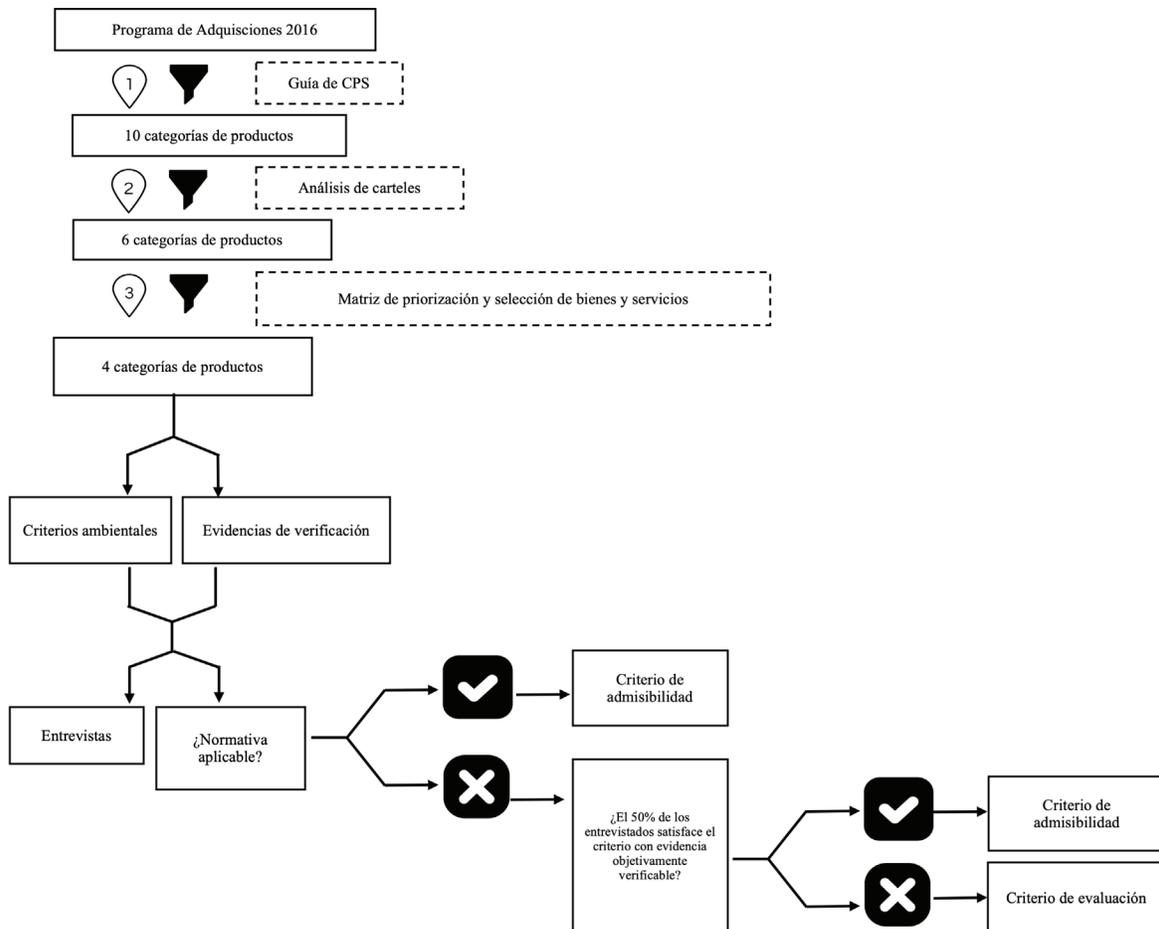


Figura 7. Diagrama de flujo de la metodología propuesta para el estudio de caso en el TEC.

De esta manera la metodología propuesta para la inclusión de criterios ambientales en las compras públicas de Costa Rica requiere la priorización de categorías de productos, definición de especificaciones técnicas ambientales, evaluar la factibilidad de los proveedores para cumplir los criterios, esto considerando que aún no se tienen la madurez de mercado con la suficiente oferta y solicitar algo que el mercado no ofrece llevaría a procesos infructuosos que a la larga implican mayores gastos administrativos al tener que volverse a realizar, y la adecuada clasificación de estos dentro del pliego cartelario para evitar procesos de contratación administrativa infructuosos. Un ejemplo de aplicación de esta metodología, conteniendo los criterios ambientales y su respectivo análisis para la categoría de suministros de oficina puede ser encontrado en el estudio realizado por Gamboa-Castro y Salazar-Rojas [17].

Conclusiones

- De las categorías de productos priorizadas, mobiliario, suministros de oficina, vestuario y servicios de alimentación, la que obtuvo mayor porcentaje de cumplimiento de las especificaciones técnicas ambientales con evidencia objetivamente verificable fueron mobiliario de oficina (54%) y la subcategoría de papel para impresión y escritura (53%), debido a que existe mayor capacidad de trazabilidad por medio de certificaciones ampliamente extendidas a nivel mundial.
- Se obtuvo una mayor cantidad de criterios clasificados como de evaluación, esto debido se clasificó un 11% de los criterios evaluados como admisibilidad por cumplimiento del primer criterio, y por el segundo criterio un 58% de la totalidad de criterios evaluados se clasificaron como de evaluación y el restante 31% fueron de admisibilidad al ser cumplidos con evidencia objetivamente verificable.
- Se evidencia la falta de madurez en términos ambientales de la muestra de empresas de la investigación, la mayoría no cuenta con información concreta sobre los aspectos ambientales de los productos que ofrecen al mercado, esta deficiencia fue extrema para el caso de los textiles.
- El análisis de los servicios de alimentación evidenció la falta de capacitación de las empresas y el insuficiente avance de programas de eco etiquetado en productos cárnicos a nivel nacional.

Referencias

- [1] Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2015). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible [Online]. Available: http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&referer=/english/&Lang=S
- [2] Comisión de las Comunidades Europeas. (2008). Public procurement for a better environment [Online]. Available: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52008DC0400&from=EN>
- [3] S. Brammer and H. Walker, "Sustainable procurement in the public sector: an international comparative study", *International Journal of Operations e Production Management*, vol. 31, no. 4, pp. 452-476, 2011.
- [4] International Institute for Sustainable Development (IISD). (2015). Handbook for the Inter-american Network on Government Procurement (INGP): Implementing Sustainable Public Procurement in Latin America and the Caribbean [Online]. Available: <http://www.iisd.org/library/handbook-ingp-public-procurers-manual-para-agentes-de-compras-publicas-de-las-ricg%0D>
- [5] Centro Nacional de Producción Más Limpia de Colombia. (2013). Guía Conceptual y Metodológica de Compras Públicas Sostenibles [Online]. Available: http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/compras_p%C3%BAblicas/guia_compras_publicas_sostenibles.pdf
- [6] Manual para la implementación de Compras Verdes en el sector público de Costa Rica, Fundación Centro de Gestión Tecnológica e Informática Industrial (CEGESTI), San José, Costa Rica, 2008.
- [7] Manual Práctico de Compra y Contratación Pública Verde. Ihobe Sociedad Pública de Gestión Ambiental del Gobierno Vasco, España, 2014.
- [8] Centro Nacional de Producción Más Limpia de Colombia. (2013). MEDIOS DE VERIFICACIÓN DE LOS CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD [Online]. Available: https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/compras_p%C3%BAblicas/guia_compras_publicas_sostenibles.pdf
- [9] *Guía para la elaboración de Programas de Gestión Ambiental Institucional (PGAi) en el sector público de Costa Rica*, Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), San José, Costa Rica: Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE).
- [10] Fundación Centro de Gestión Tecnológica e Informática Industrial (CEGESTI). (2013) Estado de implementación de las compras públicas sustentables en Costa Rica [Online]. Available: [http://www.hacienda.go.cr/docs/56e060bd56a07_Estado implementaci3n compras sustentables Costa Rica.pdf](http://www.hacienda.go.cr/docs/56e060bd56a07_Estado%20implementaci%C3%B3n%20compras%20sustentables%20Costa%20Rica.pdf)
- [11] Instituto Tecnol3gico de Costa Rica (TEC). (2015). Acerca del TEC [Online]. Available: <http://www.tec.ac.cr/eltec/Paginas/acercaDelTec.aspx>

- [12] Guía de Compras Públicas Sustentables, Dirección General de Administración de Bienes y Contratación Administrativa (DGABCA), San José, Costa Rica, 2011.
- [13] D. Acosta and M. Vanegas, “Compras Corporativas Sostenibles –Coca-Cola”, Universidad Pontificia Bolivariana [Online], Available: [https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/2910/Compras Corporativas Sostenibles- Acosta-Vanegas.pdf?sequence=1&isAllowed=y%0D](https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/2910/Compras_Corporativas_Sostenibles-Acosta-Vanegas.pdf?sequence=1&isAllowed=y%0D)
- [14] R. Hernández et al., “Recolección y análisis de los datos cualitativos” in Metodología de la investigación, 6th ed. México: McGraw-Hill, pp. 403-406
- [15] C. Ragin, “The Comparative Method: Moving Beyond Qualitative and Quantitative Strategies”. Univ. of California Press, CA, 2014.
- [16] Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2012) Implementando Compras Públicas Sostenibles. Introducción al Enfoque de PNUMA [Online]. Available: http://www.unep.org/resourceefficiency/Portals/24147/scp/10yfp/document/SPPguidelines_SP_27.07.12.pdf%0D
- [17] J. Gamboa-Castro and T. Salazar-Rojas, “Inclusión de Criterios ambientales en las Compras Públicas en Costa Rica: Suministros de Oficina”. Tecnología en Marcha, vol. 31, no.4, pp. 167-185, 2011.
- [18] Decreto Ejecutivo No 33411-H Reglamento a la Ley de Contratación Administrativa, Ministerio de Hacienda, 2006.
- [19] Alonso, M. (2010). COMPRA PÚBLICA SOSTENIBLE -Un estudio comparativo entre los programas regionales para la compra publica sostenible, en España. Universidad de Ciencias Agrícolas de Suecia. Recuperado a partir de http://stud.epsilon.slu.se/1884/2/alonso_m_101005_ex_summary.pdf
- [20] Pacheco, B., & Bastante, M. “Green public procurement as an initiative for sustainable consumption. An exploratory study of Spanish public universities”. Journal of Cleaner Production, vol. 133, pp. 648–656, 2016.
- [21] Ministerio de Economía Industria y Comercio (MEIC). (2015) ESTADO DE SITUACIÓN DE LAS PYME EN COSTA RICA [Online]. Available: <http://reventazon.meic.go.cr/informacion/estudios/2016/pymes/informe.pdf>
- [22] Decreto Ejecutivo N° 25984-MEIC RTCR 282:1997. Artículos de oficina y escolares. Etiquetado de los productos de papelería y afines para uso escolar y de oficina, Ministerio de Economía Industria y Comercio, 1997.

Impacto ambiental de diferentes sectores productivos de Costa Rica

Environmental impact of different productive sectors of Costa Rica

Kelvin Arce-Villalobos¹, Alejandro Arias-Castro², Karina Hernández-Ugalde³, José Carlos Mora-Barrantes⁴, Rolando Sánchez-Gutiérrez⁵

Fecha de recepción: 14 de diciembre de 2019

Fecha de aprobación: 12 de marzo de 2020

Arce-Villalobos, K; Arias-Castro, A; Hernández-Ugalde, K; Mora-Barrantes, J.C; Sánchez-Gutiérrez, R. Impacto ambiental de diferentes sectores productivos de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-2. Abril-Junio 2021. Pág 76-87.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i2.4890>

- 1 Químico Industrial, Estudiante de Licenciatura en Química Industrial, Universidad Nacional (UNA), Escuela de Química, Costa Rica. Correo electrónico: kelvin.arce.villalobos@est.una.ac.cr.
 <https://orcid.org/0000-0002-7722-3275>
- 2 Químico Industrial, Estudiante de Licenciatura en Química Industrial, Escuela de Química, Universidad Nacional (UNA), Costa Rica. Correo electrónico: luis.arias.castro@est.una.ac.cr.
 <https://orcid.org/0000-0001-5655-1029>
- 3 Química Industrial, Estudiante de Licenciatura en Química Industrial, Escuela de Química, Universidad Nacional (UNA), Costa Rica. Correo electrónico: karina.hernandez.ugalde@est.una.ac.cr.
 <https://orcid.org/0000-0002-9248-4828>
- 4 Investigador y académico, Laboratorio de Química de la Atmósfera (LAQAT), Escuela de Química, Universidad Nacional (UNA), Costa Rica. Correo electrónico: jose.mora.barrantes@una.cr.
 <https://orcid.org/0000-0002-0409-5276>
- 5 Investigador y académico, Laboratorio de Manejo del Recurso Hídrico (LAMRHI), Escuela de Química, Universidad Nacional (UNA), Costa Rica. Correo electrónico: rolando.sanchez.gutierrez@una.cr.
 <https://orcid.org/0000-0002-5050-021X>



Palabras clave

Gestión ambiental; evaluación de impacto ambiental; aspecto ambiental; impacto ambiental; sectores productivos; Costa Rica; formularios.

Resumen

La Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) consiste en la identificación y valoración de los impactos potenciales de proyectos respecto a los componentes físicos, químicos, biológicos, culturales, económicos y sociales, con el fin de que mediante la planificación y la correcta toma de decisiones se desarrollen aquellas actuaciones más compatibles con el ambiente. Además, representa un mecanismo acondicionado a la realidad global actual, que permite el control y seguimiento de la gestión ambiental de forma integral. A pesar de ser una temática ampliamente desarrollada, en múltiples ocasiones su aplicación no es comprendida a plenitud ante la pluralidad de sectores productivos que contempla su aplicación, entre otros aspectos. En Costa Rica, el proceso de evaluación ambiental lo fiscaliza la Secretaría Técnica Nacional Ambiental (SETENA); entre los instrumentos de fiscalización se dispone del formulario ambiental denominado "Formulario D-1", en el cual, el futuro desarrollador de la obra, actividad o proyecto evidencia los impactos ambientales y sociales a generar por parte de la actividad a desarrollar. En el presente trabajo de investigación se desarrolló una evaluación del impacto ambiental de diferentes sectores productivos en Costa Rica a partir de formularios D-1 ingresados a la SETENA durante los años 2018 y 2019. En total se analizaron 125 formularios de futuros proyectos a desarrollar. El sector industrial denominado "*Explotación de minas y canteras*" presenta el mayor valor de impacto ambiental (271,27). Por su parte el sector industrial con menor valor de impacto ambiental (94,64) corresponde a "*Electricidad, gas y agua*".

Keywords

Environmental management; environmental impact assessment; environmental aspect; environmental impact; productive sectors; Costa Rica; forms.

Abstract

The Environmental Impact Assessment (EIA) consists on the identification and assessment of the potential impacts of projects according to the physical, chemical, biological, cultural, economic and social components, in order that by planning and the correct decision-making process, those actions most compatible with the environment are developed. Therefore, it represents a mechanism conditioned to the current global reality, which allows the control and monitoring of environmental management in an integral way. Despite being a widely developed theme, on multiple occasions its application is not fully understood in the face of the plurality of productive sectors that its application contemplates, among other aspects. In Costa Rica, the environmental evaluation process is supervised by the National Environmental Technical Secretariat (SETENA); among the inspection instruments there is an environmental form called "D-1 Form", in which the future developer of the work, activity or project demonstrates the environmental and social impacts to be generated by the activity to develop. In the present research work an evaluation of the environmental impact of different productive sectors in Costa Rica was developed from D-1 forms entered to SETENA during 2018 and 2019. In total, 125 forms of future projects to be developed were analyzed. The industrial sector called "*Mining and quarrying*" showed the highest environmental impact value (271,27). The industrial sector with the lowest environmental impact value (94,64) corresponds to "*Electricity, gas and water*".

Introducción

En los últimos 40 años la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) ha sido un componente clave de la gestión ambiental debido al daño ocasionado por las actividades humanas, entre estos la pérdida de biodiversidad, los daños a las zonas marinas y las amenazas a las fuentes de agua dulce y la calidad de este recurso [1].

Un rápido aumento en la preocupación por los impactos ambientales y ecológicos ocasionados por proyectos económicos y sociales en proceso ha sido observado en los últimos años, promoviendo, el desarrollo de procedimientos que permitan evaluar el posible impacto ambiental generado por diferentes sectores productivos, entre los cuales destacan la construcción, la agricultura, la ganadería, la caza y la silvicultura, la explotación de minas y canteras, la generación de electricidad, la explotación y distribución de gas, el uso del recurso hídrico y los servicios de comercio y reparación [2]. Todas estas actividades engloban múltiples aristas que representan un problema para el ambiente en condiciones de destrucción, consumo de recursos y contaminación [3].

Diferentes técnicas metodológicas son aplicables al proceso de EIA de múltiples sectores productivos, algunos métodos son generales y otros de carácter más específico [4]. Los procedimientos de EIA en Costa Rica son fiscalizados por la Secretaría Técnica Nacional Ambiental (SETENA), un ente estatal del Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE). La SETENA emplea un esquema de evaluación electrónica mediante un formulario ambiental digital denominado "Formulario D-1" (D-1), para estimar preliminarmente el impacto ambiental potencial de los futuros proyectos por construir.

Entre los datos y parámetros que incluye y evalúa el D-1 respecto al proyecto a desarrollar se indican; nombre de la actividad, localización, datos del desarrollador, descripción del proceso productivo (dimensiones, generación de residuos, consumo de agua, electricidad y combustible), marco regulatorio, aspectos e impactos ambientales (cuadro 1) e impacto potencial del proyecto [5]. Dichos datos y parámetros se clasifican en diferentes secciones de acuerdo con la metodología de evaluación de impacto ambiental incluida en el Formulario D-1, estas secciones son; Sección 1: Información general del desarrollador del proyecto y de las características principales de la obra, Sección 2, 3 y 4: ver cuadro 1, Sección 5: Criterios de ponderación, Sección 6: Matriz de efectos acumulativos y sinérgicos, Sección 7: Obtención del valor de impacto ambiental del proyecto y, Sección 8: Ficha de descripción del proyecto. El cuadro 1 contiene un resumen de los factores, componentes y subcomponentes ambientales que son evaluados en las secciones 2, 3 y 4, los cuales permiten obtener el valor de impacto ambiental (Sección 6), una vez revisados los criterios de ponderación (Sección 5) [4].

Para cada Subcomponente Ambiental (SAS) (cuadro 1) se obtiene un valor de "X" de acuerdo con los casos definidos en el formulario y con el marco jurídico preestablecido dentro del mismo Formulario D-1. Cada valor asignado a "X" se define considerando el mayor consumo o efecto a generar por el proyecto a desarrollar, independientemente de que se presente en la etapa de construcción o de operación de este. El valor "X" representa el "valor de significancia de impacto ambiental preliminar" para cada SAS evaluado, cuando el valor "X" es de 6 puntos o más, se considera que el impacto ambiental para un determinado aspecto ambiental es significativo [4].

Cuadro 1. Factores, componentes y subcomponentes ambientales evaluados para cada proyecto.

Sección (D-1)	Factor Ambiental (FA)	Componente Ambiental (CA)	Subcomponentes Ambientales (SAS)	
2	Consumo-Afectación	Agua	Acueducto Público Existente (APE); Agua Superficial (ASP); Agua Subterránea (ASB).	
		Energía	Autoabastecimiento Biocombustibles (ABC); Autoabastecimiento Combustibles Fósiles (ACF); Autoabastecimiento Externo (AE).	
		Biotopos	Afectación a la Fauna (AFN); Afectación de la Flora (AFL)	
3	Impacto en aire y agua	Aire	Emisión de Fuentes Fijas (EFF); Emisión de Fuentes Móviles (EFM); Emisiones de Radiaciones Ionizantes (ERI); Generación de Olores (GO); Producción de Ruido y Vibración (RV).	
		Agua	Producción de Agua de Escorrentía Superficial (AES); Aguas Residuales Ordinarias (ARO); Aguas Residuales Especiales (ARE)	
	Impacto en el suelo	Suelo	Residuos Ordinarios (RO); Residuos Especiales (RE); Escombros (EC); Residuos Químicos (RQ); Residuos Radiactivos (RR); Residuos Biológicos (RB); Movimiento del Suelo (MS); Modificación de Tierras de Pendiente (MTP); Densidad de Población (DP); Densidad de Construcción (DC); Modificación del Suelo (MS).	
			Social	Generación de Empleo (GE); Reubicación de Personas (RP).
			Cultural	Alteración del Paisaje (APS); Afectación del Patrimonio (APT).
	Impacto humano	Viabilidad	Vehículos de Generación de Tráfico (VGT).	
Otros riesgos		Otros riesgos	Manejo de Combustibles Fósiles (MCF); Agroquímicos (AQ); Sustancias Peligrosas (SP); Materiales Radiactivos (MR); Biorriesgos (BR).	

La sumatoria de los valores “X” de cada SAS, permite obtener una “valoración por efecto”, que corresponde al valor de significancia ambiental de cada Componente Ambiental (CA) (compuesto por uno o más subcomponentes ambientales, ver cuadro 1). La sumatoria de la “valoración por efecto” de cada CA permite obtener del valor de Significancia de Impacto Ambiental Preliminar (SIA-P) de cada proyecto a desarrollar [4].

El valor de SIA-P de cada proyecto se debe ajustar en función de la existencia o no de regulaciones específicas aplicables a la operación del proyecto y de la adherencia, voluntaria o no, del proyecto a una guía o norma ambiental que exista para la actividad. Una vez ponderado el valor de SIA-P se obtiene el valor de Significancia de Impacto Ambiental Ponderado del proyecto (SIA-Pond). El valor SIA-Pond se ajusta nuevamente, no obstante, esta vez en función de la ubicación geográfica del proyecto considerando: si se localiza en una zona con plan

regulador ambiental autorizado por el ente ambiental estatal o en proceso de autorización; y si se localiza en un área ambientalmente frágil según lo establece el Estado costarricense. Una vez ajustado el SIA-Pond se obtiene el valor de Significancia de Impacto Ambiental Final del proyecto (SIA-F) [4].

El presente trabajo de investigación evaluó formularios ambientales ingresados a la SETENA durante los años 2018 y 2019. A partir de la información contenida en los Formularios D-1 se desarrollaron bases de datos con el objetivo de identificar aquellos sectores productivos con mayor impacto ambiental en Costa Rica, permitiendo a su vez, evidenciar cuales son los componentes ambientales mayormente afectados por cada sector industrial.

Metodología

Trabajo de campo

Para obtener la información a analizar, se realizó un total de 5 visitas al área de Archivo de la SETENA y se revisó un total de ciento veinticinco formularios D-1 en versión impresa ingresados a la SETENA durante los años 2018 y 2019. Se tabuló de forma preliminar la información en una hoja de Microsoft Excel versión 16.0. La información tabulada para cada formulario incluyó: número de expediente, nombre del proyecto, descripción del proyecto, sector industrial perteneciente, localización (provincia, cantón, distrito), área total y área de construcción del proyecto, número de lote y número de plano catastro del proyecto, sector CIIU y clasificación de impacto potencial (IAP), valor de impacto de cada uno de los aspectos ambientales (ejemplo: consumo de agua de acueducto público, emisiones de fuentes gaseosas, gestión de residuos peligrosos, otros). En total se sistematizó para cada proyecto los valores de impacto de 37 Subcomponentes Ambientales (SAS).

Análisis de datos

Se realizó un análisis estadístico descriptivo de los datos haciendo descripción por cada CA (producto de los valores de cada SAS), y posteriormente como resultado de la suma de cada CA se obtuvo un valor promedio para cada Factor Ambiental (FA).

Producto de los valores anteriores se sistematizaron los datos de valor de significancia ambiental de cada proyecto (SIA-P, SIA-Pond y SIA-F), cada uno fue clasificado según el sector industrial correspondiente, con el fin de identificar cual es el sector que presenta los mayores valores de impacto ambiental, identificando a su vez los principales SAS, CA y FA que influyen en el valor final de impacto ambiental.

El análisis estadístico y gráfico de los datos recopilados se realizó en R 3.6.1, R Core Team [16] utilizando el paquete ggplot2 [17]; finalmente los resultados fueron analizados mediante la comparación de la información generada entre los cinco sectores productivos definidos.

Resultados y discusión

Para cada sector industrial, se evaluaron 37 subcomponentes ambientales (SAS), los cuales se encuentran listados en el cuadro 1, por su parte, en el cuadro 2 se incluye la cantidad de subcomponentes ambientales considerados significativos (*) para cada sector industrial.

Cuadro 2. Subcomponentes ambientales significativos por sector industrial evaluado.

Subcomponente ambiental	Sector industrial				
	Explotación de minas y canteras	Agricultura, ganadería, caza y silvicultura	Comercio y servicios de reparación	Construcción	Electricidad, gas y agua
APE	*	*	*	*	*
ASP					*
ASB		*	*	*	*
ABC					
ACF	*				
AE	*	*	*	*	*
AFN	*	*		*	*
AFL	*	*	*	*	*
EFF	*	*	*	*	
EFM	*	*	*	*	*
ERI					
GO	*	*	*	*	*
RV	*	*	*	*	*
AES		*		*	
ARO	*	*	*	*	*
ARE	*		*		*
RO	*	*	*	*	*
RE	*	*	*	*	*
EC	*	*	*	*	*
RQ	*		*	*	*
RR	*			*	
RB	*			*	
MS	*	*		*	*
MTP	*		*	*	*
DP				*	*
DC		*	*	*	*
MS	*	*	*	*	*
GE	*	*	*	*	*
RP					
VGT	*	*	*	*	*
APS	*	*	*	*	*
APT	*		*	*	
MCF	*	*	*	*	*
AQ		*			
SP	*	*	*	*	
MR					
BR					
Total	26	23	23	28	24
Porcentaje (%)	70	62	62	76	65

De los 37 SAS evaluados para los 125 casos de estudio, se encuentra que en al menos un caso de estudio, 32 SAS (86,49%) poseen valores de valor de significancia de impacto ambiental preliminar significativos, destacando que para cinco SAS (13,51%) no se logra encontrar en

ninguno de los casos de estudio, algún valor que sea considerado significativo; lo anterior apunta a que estos SAS pueden estar siendo no afectados de manera importante por ningún sector industrial debido a la aplicación de las regulaciones específicas en el desarrollo de los proyectos; o bien, puede ser evidencia que son SAS poco susceptibles al desarrollo de proyectos para cualquier sector industrial. Por el contrario, se encuentra que para catorce SAS (37,84%), existe una convergencia de significancia de impacto en los cinco sectores industriales evaluados, estos SAS son: APE, AFL, EFM, GO, RV, ARO, RO, RE, EC, MS, GE, VGT, APS y MCF; por lo tanto, es importante prestar especial atención a estos SAS, debido a que pueden influir en mayor medida al valor de significancia de impacto ambiental. Además, se puede observar, que los sectores industriales con porcentajes de subcomponentes ambientales significativos más altos son *Construcción y Explotación de minas y canteras*, con un 70% y 76%, respectivamente.

En la figura 1 se muestra la cantidad porcentual de proyectos analizados para cada sector industrial, según la calificación obtenida en cada categoría de significancia ambiental. En la calificación de Significancia de Impacto Ambiental Preliminar (SIA-P), el 100% de los proyectos analizados obtuvieron una calificación de B2 en los cinco sectores, indicando que, para todos los sectores productivos, la sumatoria de las puntuaciones obtenidas para cada CA es menor a 300. Por otro lado, las calificaciones obtenidas en la etapa de asignación de la Significancia de Impacto Ambiental Ponderado (SIA-Pond) indican que, para los sectores de *Electricidad, gas y agua y Agricultura, ganadería, caza y silvicultura*, el 100% de los proyectos son calificados como B2, mientras que para los sectores restantes la cantidad porcentual de proyectos categorizados como B2 es de 86,36% (*Explotación de minas y canteras*), 88,24% (*Comercio y servicios de reparación*) y 91,67 (*Construcción*).

Se observa en la figura 1, que para la Significancia de Impacto Ambiental Final (SIA-F), nuevamente *Electricidad, gas y agua* presentó calificaciones de B2 en la totalidad de casos bajo estudio; además *Agricultura, ganadería, caza y silvicultura* presentan calificaciones tanto de B2 (80%) como de B1 (20%); situación similar para los sectores de *Construcción; Comercio y servicios de reparación y Explotación de minas y canteras*, siendo este último, el sector industrial que presenta el mayor porcentaje de proyectos con categoría de impacto ambiental moderado-alto (B1), tanto para el caso del SIA-F (22,73%) como para el SIA-Pond (13,64%). Al comparar el SIA-Pond con el SIA-F, se observa un aumento en las puntuaciones del SIA-Pond, producto de los ajustes en función de la existencia o no de regulaciones, normas o guías aplicables a la construcción y operación de la actividad, obra o proyecto; y de la clasificación del área según la zona de ubicación del proyecto. Este último aspecto evalúa si el proyecto se ubica en una localización con Plan Regulador o si se encuentra en un área ambientalmente frágil [6]. Esta variación entre el valor SIA-Pond y el valor SIA-F es mayor en los sectores industriales *Agricultura, ganadería, caza y silvicultura y Explotación de minas y canteras*, debido a que cada sector presenta 14 y 17 proyectos, respectivamente, que se ubican en un área sin Plan Regulador, ocasionando calificaciones mayores de SIA-F. Por otro lado, de los proyectos estudiados para el sector de *Agricultura, ganadería, caza y silvicultura*, 11 no cuentan con reglamento específico en materia ambiental aplicable a la operación del proyecto, lo que genera las calificaciones de impacto ambiental en categorías más altas.

En la figura 2 se muestra la distribución de valores de SIA-F con respecto a los diferentes sectores industriales evaluados, esta hace referencia a la densidad de valores individuales de cada caso de proyecto que conforma cada sector industrial. Por su parte, la estadística descriptiva para los valores de SIA-F de cada sector industrial se muestra en el cuadro 3.

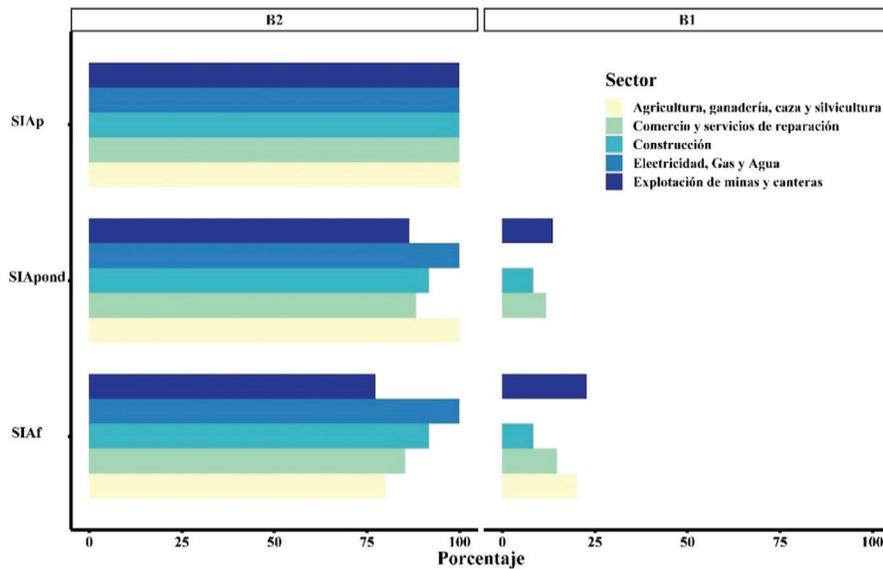


Figura 1. Porcentaje de proyectos por sector productivo con calificaciones de B2 y B1 de acuerdo con los diferentes valores de significancia ambiental (SIA preliminar, SIA ponderado y SIA final).

El sector de *Explotación de minas y canteras* (G), posee un valor promedio de SIA-F de 271,27, siendo el más alto entre los sectores. Lo anterior se debe a que este presenta una mayor variabilidad y distribución de valores del SIA-F en las diferentes actividades productivas que lo conforman, además que existen actividades con valores individuales de magnitudes elevadas (figura 2). La variabilidad observada para este sector es en parte, debida a la diferencia que puede existir entre un proyecto u otro; a pesar de que se ubican en un mismo sector productivo, sus procesos varían si la finalidad de la explotación de la mina o cantera es con el fin de extraer material metálico o no metálico, si la explotación se hace directamente en una montaña rocosa o en un cauce de dominio público. Esto lo que provoca es que, debido a la diferencia de estos procesos productivos, el proyecto impacte de manera distinta en los diferentes subcomponentes ambientales evaluados en el formulario D-1 [7]. Sin embargo, el valor de impacto que puede presentar cada uno de los SAS no son los que explican la principal variabilidad, si no, los ajustes a los valores de SIA-P y SIA-F. Esto se ve reflejado en el cuadro 3, ya que el sector de *Explotación de minas y canteras* cuenta con el valor más alto de desviación estándar y a su vez cuenta con el valor máximo de SIA-F (534). Este valor tan alto en particular, se genera producto de los ajustes realizados en el SIA-Pond y SIA-F, como se detalló anteriormente. El valor inicial (SIA-P) fue de 178; al realizar el ajuste del SIA-Pond, este valor se duplicó a 356, debido a que el proyecto no contaba con reglamentación específica en materia ambiental que regulara la operación. Por último, al realizar el ajuste de SIA-F, se obtiene el valor de 534, aumentando 1,5 veces respecto al SIA-Pond, producto de la carencia de plan regulador en el área de localización del proyecto. Estos ajustes realizados para cada uno de los casos estudiados promueven la variabilidad de los datos, ya que a pesar de que la afectación de los SAS sea similar para proyectos que se agrupan en un mismo sector, los ajustes de SIA-Pond y SIA-F, aumentan la puntuación de cada proyecto de acuerdo con las características intrínsecas de la actividad y el área de localización. Los valores extremos más altos que se observan en la figura 2 para el sector de *Explotación de minas y canteras* son producto principalmente de la falta de reglamentación ambiental y de que el proyecto se planea ubicar en un área sin plan regulador o ambientalmente frágil. El sector industrial *Agricultura, ganadería, caza y silvicultura* (A), presenta el segundo valor promedio de SIA final más alto (249,70) (cuadro 3), con valores máximos y mínimos individuales de 432 y 113, respectivamente (figura 2).

Las actividades industriales de *Explotación de minas y canteras*, así como de *Agricultura ganadería, caza y silvicultura*, son altamente dependientes de la disponibilidad de recursos naturales; además, impactan negativamente al ambiente a través de la contaminación del aire, suelo y agua tanto superficial como subterránea. Por su parte, estos dos sectores industriales presentan una mayor generación de múltiples tipos de residuos, un mayor agotamiento de los recursos no renovables, alta generación de ruido, así como un impacto negativo generalizado en los hábitats naturales y al paisaje [8]–[10], por lo anterior, es congruente que sean los sectores industriales con valores promedio de SIA-F más altos.

En contraparte, el sector *Electricidad, Gas y Agua* (F), presenta el menor valor promedio de SIA-F (94.64, Cuadro 3), el cual se asocia a una distribución con tendencias a valores bajos de SIA-F para las actividades que le conforman (figura 2), con valores máximos y mínimos de 251 y 22,5 respectivamente. En este sector, actualmente el diseño de proyectos se realiza con la inclusión de una variable ambiental que permita mantener bajos impactos por la generación de desechos sólidos y líquidos, emisiones gaseosas, aporte al calentamiento global y a la salud humana [11]; por lo anterior se explica los dato obtenidos para el sector.

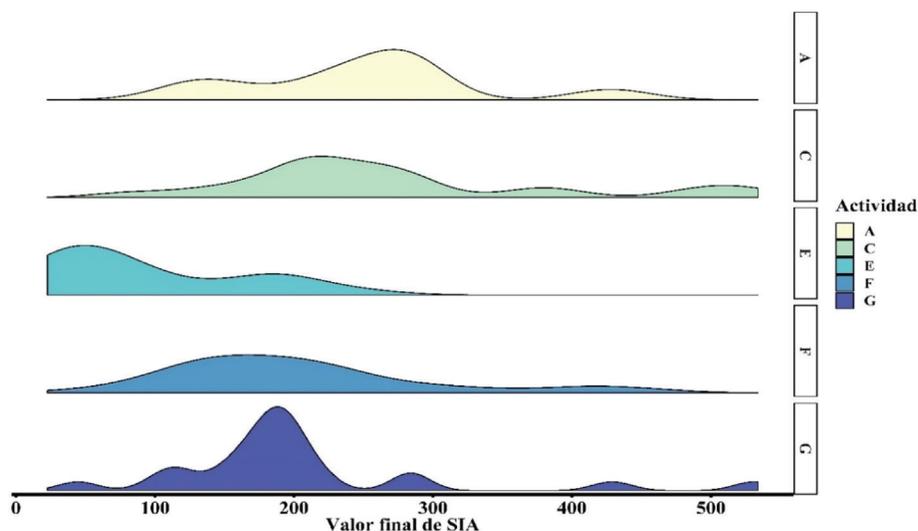


Figura 2. Distribución de los valores finales de SIA de acuerdo con el sector o actividad productiva: (A) Agricultura, ganadería, caza y silvicultura; (C) Comercio y servicios de reparación; (E) Construcción; (F) Electricidad, Gas y Agua; (G) Explotación de minas y canteras.

Cuadro 3. Promedio, desviación estándar y valores máximos y mínimos de los valores SIA final por sector industrial.

Sector	Promedio	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
Agricultura, ganadería, caza y silvicultura	249,70	83,80	113	432
Comercio y servicios de reparación	202,98	100,56	44,6	531
Construcción	203,65	94,33	46,5	456
Electricidad, Gas y Agua	94,64	69,46	22,5	251
Explotación de minas y canteras	271,27	118,74	83	534

La figura 3 muestra los valores de impacto ambiental de cada SAS analizado para cada sector industrial; de esta se infiere que existe una tendencia a que los valores de mayor impacto ambiental corresponden al medio *suelo*, principalmente por el aporte individual de valores de impacto altos del sector de *Construcción* y de *Explotación de minas y canteras*. El alto impacto del sector construcción al medio suelo se debe principalmente a la generación de escombros y a la inadecuada disposición final de los mismos, que generalmente se realiza mediante una escombrera dentro del área del proyecto, o se entrega a un tercero sin fines comerciales. La industria de la construcción es considerada mundialmente como una de las mayores productoras de residuos sólidos, los cuales han ido aumentando con el paso de los años, debido al incremento del desarrollo de nueva infraestructura, así como trabajos de renovación, reparación y demolición [12]. Estos materiales se filtran por el agua de lluvia y el agua de escorrentía superficial, ocasionando lixiviación y liberación de contaminantes del material de desecho al suelo subyacente y, eventualmente, al agua subterránea [13]. Grandes cantidades de residuos de construcción y demolición son perjudiciales para el medio ambiente si no se gestionan de manera adecuada [12].

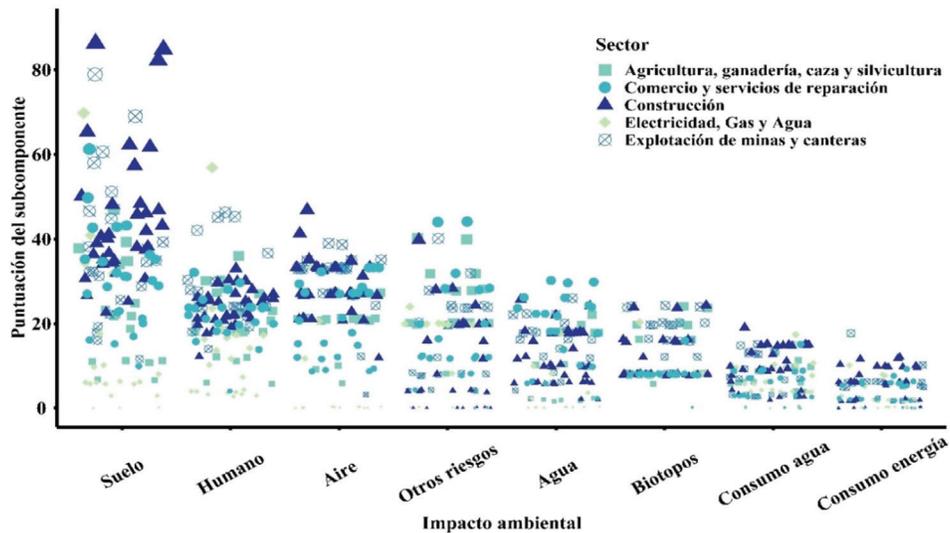


Figura 3. Puntuaciones obtenidas por subcomponente para cada uno de los 125 casos evaluados, en relación con el sector productivo al que pertenecen.

El sector industrial *Explotación de minas y canteras* es una de las actividades humanas responsables de la contaminación de los suelos en grandes áreas del mundo, no obstante, en Costa Rica su explotación es altamente regulada, requiriéndose un Estudio de Impacto Ambiental antes de iniciar cualquier proyecto de este tipo. Los desechos de las minas ocasionan drenajes de ácidos y sólidos que pueden liberar metales como Cu, Mn, Fe, Zn, Ni, Mo, B y Cl, los cuales son esenciales para las plantas; así como otros elementos que son beneficiosos para algunas especies vegetales, tal cual es el caso de Al y Ti; sin embargo, a grandes concentraciones, son tóxicos y perjudiciales [14], [15]. Según la figura 3, la *Explotación de minas y canteras* genera una gran afectación al subcomponente *Humano*, debido principalmente al impacto social ocasionado por el limitado empleo que genera esta actividad y al impacto cultural generado por la alteración al paisaje que ocasiona la minería, que generalmente se desarrolla en zonas rurales provocando un desequilibrio en la textura del paisaje existente.

El tercer subcomponente con mayor afectación es medio *aire*, impactado principalmente por los sectores de *Construcción* y *Explotación de minas y canteras*. Ambas actividades impactan al aire debido principalmente a las emisiones de fuentes fijas no controladas, emisiones de

equipos móviles y a la producción de ruidos o vibraciones no confinables. Diversos estudios han demostrado que la industria de la construcción es el mayor contribuyente a las emisiones totales de CO₂, las cuales representan el 7% de las emisiones anuales globales de gases de efecto invernadero de los Estados Unidos [16].

De acuerdo con la figura 3, los diferentes subcomponentes ambientales pertenecientes a los sectores industriales evaluados impactan en menor grado a los medios *Agua, Biotopos, y Energía*. Es notable que los sectores que influyen en menor medida en el impacto ambiental sobre los componentes ambientales son los sectores industriales *Electricidad, gas y agua*, así como el de *Agricultura, ganadería, caza y silvicultura*.

La tendencia mencionada, para el caso de las puntuaciones otorgadas a los SAS, explica en parte la variabilidad encontrada en los valores de SIA final, dado que los sectores con magnitudes de SIA final altos presentan a su vez puntuaciones elevadas en el caso de los SAS y una correspondencia similar se presenta para los valores más bajos de cada aspecto. Esto además se refleja en los valores extremos de cada sector, los cuales, una vez más, guardan una relación directa con la tendencia mencionada, en virtud de que los valores máximos más altos corresponden a los sectores con las magnitudes de SIA final y puntuación de SAS más grandes; así como los valores mínimos más bajos con aquellos que presentan las magnitudes menores de cada variable.

Aunado a esto, la localización de los diferentes proyectos dentro de un sector, puede ser otro factor que explique la variabilidad de la SIA final. Esto se refleja con claridad en el caso del sector *Agricultura, ganadería, caza y silvicultura*, el cual presentan el segundo valor más alto SIA final promedio (249,70), a pesar de ser uno de los que influyen en menor medida en el impacto ambiental sobre los componentes ambientales; hallazgo que se asocia con el hecho de que ningún proyecto, entre los casos de estudio de este sector, se localiza en un punto autorizado por un Plan Regulador u otra planificación ambiental de uso del suelo aprobado por la SETENA; criterio que se contempla en el formulario D-1 al calcular el SIA final y que explica el alto valor de dicho aspecto para este sector en particular; así como parte de la variabilidad de la SIA final en los casos restantes.

Conclusiones y Recomendaciones

Un 37,84% del total de subcomponentes ambientales evaluados fueron clasificados como significativos para los cinco sectores industriales analizados, siendo estos los que influyen en mayor medida en el valor de significancia de impacto ambiental.

Los sectores industriales con porcentajes de subcomponentes ambientales significativos más altos son *Construcción y Explotación de minas y canteras*, con un 70% y 76%, respectivamente.

El sector *Explotación de minas y canteras* presenta el mayor valor de SIA-F (534), mientras que el menor valor de SIA-F corresponde al sector denominado *Electricidad, Gas y Agua* (22,5), lo anterior es congruente con las características propias de cada sector industrial.

El medio ambiental mayormente afectado es el suelo, esto principalmente asociado al impacto ambiental de los sectores industriales *Construcción y de Explotación de minas y canteras*.

Los sectores industriales *Agricultura, ganadería, caza y silvicultura y Explotación de minas y canteras* presentan la mayor variación entre sus valores SIA-P y SIA-F, lo cual se debe principalmente a la carencia de reglamentación en materia ambiental, así como la inexistencia de Planes Reguladores en las zonas de ubicación de los proyectos.

El menor impacto ambiental (valor de SIA-F) corresponde al sector *Electricidad, Gas y Agua*, ya que posee valores relativos bajos de impacto en los diferentes componentes ambientales, así como a la existencia de normativa que regule este tipo de actividad, por ejemplo, el cumplimiento del *Reglamento de Perforación del Subsuelo para la Exploración y Aprovechamiento de Aguas Subterráneas N° 35884-MINAE*, el cual regula las concesiones de agua.

Agradecimientos

Se agradece a los funcionarios del Archivo Central de la SETENA que contribuyeron en el desarrollo de este artículo, en especial, a Yuliani Zúñiga Peña.

Referencias

- [1] R. K. Morgan, "Environmental impact assessment : the state of the art," *Impact Assess. Proj. Apprais.*, vol. 30, no. March 2015, pp. 5–14, 2012.
- [2] G. He, L. Zhang, and Y. Lu, "Environmental impact assessment and environmental audit in large-scale public infrastructure construction: The case of the qinghai-tibet railway," *Environ. Manage.*, vol. 44, no. 3, pp. 579–589, Sep. 2009.
- [3] A. Enshassi, B. Kochendoerfer, and E. Rizq, "Evaluación de los impactos medioambientales de los proyectos de construcción," *Rev. Ing. Constr.*, vol. 29, no. 3, pp. 234–254, Dec. 2014.
- [4] J. C. Mora-Barrantes, O. M. Molina-León, and J. P. Sibaja-Brenes, "Aplicación de un método para evaluar el impacto ambiental de proyectos de construcción de edificaciones universitarias," *Rev. Tecnol. en Marcha*, vol. 29, no. 3, p. 132, 2016.
- [5] J. C. Mora Barrantes, J. P. Sibaja Brenes, G. Piedra Marín, and Ó. Molina León, "Environmental impact assessment of 17 construction projects in various university campuses," *Int. J. Environ. Impacts*, vol. 1, no. 4, pp. 433–449, 2018.
- [6] "Decreto Ejecutivo N° 34375-MINAE," *Procuraduría General de la República*, 2007. .
- [7] I. R. Gómez and B. R. Gómez, "El derecho administrativo de concesión de explotación de canteras y cauces de dominio público en Costa Rica," Universidad de Costa Rica, 2019.
- [8] W. Fan *et al.*, "Life cycle environmental impact assessment of circular agriculture: A case study in Fuqing, China," *Sustain.*, vol. 10, no. 6, p. 1810, May 2018.
- [9] E. Moreno-Jiménez *et al.*, "Screening risk assessment tools for assessing the environmental impact in an abandoned pyritic mine in Spain," *Sci. Total Environ.*, vol. 409, no. 4, pp. 692–703, Jan. 2011.
- [10] J. Moyé, T. Picard-Lesteven, L. Zouhri, K. El Amari, M. Hibti, and A. Benkaddour, "Groundwater assessment and environmental impact in the abandoned mine of Kettara (Morocco)," *Environ. Pollut.*, vol. 231, pp. 899–907, Dec. 2017.
- [11] E. A. Nanaki, C. J. Koroneos, and G. A. Xydis, "Environmental impact assessment of electricity production from lignite," *Environ. Prog. Sustain. Energy*, vol. 35, no. 6, pp. 1868–1875, Nov. 2016.
- [12] M. Marzouk and S. Azab, "Environmental and economic impact assessment of construction and demolition waste disposal using system dynamics," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 82, pp. 41–49, 2014.
- [13] O. Schwab, P. Bayer, R. Juraske, F. Verones, and S. Hellweg, "Beyond the material grave: Life Cycle Impact Assessment of leaching from secondary materials in road and earth constructions," *Waste Manag.*, vol. 34, no. 10, pp. 1884–1896, 2014.
- [14] M. M. Abreu, M. J. Matias, M. C. F. Magalhães, and M. J. Basto, "Impacts on water, soil and plants from the abandoned Miguel Vacas copper mine, Portugal," *J. Geochemical Explor.*, vol. 96, no. 2–3, pp. 161–170, 2008.
- [15] K. El Amari, P. Valera, M. Hibti, S. Pretti, A. Marcello, and S. Essarraj, "Impact of mine tailings on surrounding soils and ground water: Case of Kettara old mine, Morocco," *J. African Earth Sci.*, vol. 100, pp. 437–449, 2014.
- [16] T. W. Johnson, "Comparison of environmental impacts of steel and concrete as building materials using the life cycle assessment method," Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [16] R Core Team. R: A Language & Environment for Statistical Computing; R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria, 2018
- [17] H. Wickham. "ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis,". Springer-Verlag New York, 2017.

Evaluación de los parámetros físicos y químicos del agua de mar en los alrededores de la Isla Uvita, Limón, Costa Rica

Evaluation of physical and chemical parameters of sea water in the surroundings of Uvita Island, Limon, Costa Rica

Jaime Alfaro-Sandí¹, Gilberto Piedra-Marín²,
Ana Y. Saravia-Arguedas³, Lilliana Piedra-Castro⁴

Fecha de recepción: 5 de febrero de 2020

Fecha de aprobación: 14 de junio de 2020

Alfaro-Sandí, J; Piedra-Marín, G; Saravia-Arguedas, A.Y; Piedra-Castro, L. Evaluación de los parámetros físicos y químicos del agua de mar en los alrededores de la Isla Uvita, Limón, Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-2. Abril-Junio 2021. Pág 88-95.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i2.4985>

- 1 Licenciado en Química Industrial. Jefe del Laboratorio de análisis de residuos de agroquímicos. Servicio Fitosanitario del Estado. Costa Rica.
Correo electrónico: jasm138275@hotmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-7296-9895>
- 2 Doctor en Química. Sección de Química Inorgánica, Escuela de Química, Universidad Nacional, Costa Rica.
Correo electrónico: gilberto.piedra.marin@una.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-1332-236X>
- 3 Máster en Química. Laboratorio de Química Marina, Escuela de Química, Universidad Nacional, Costa Rica.
Correo electrónico: ana.saravia.arguedas@una.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-7296-9895>
- 4 Doctora en Ciencias Naturales para el Desarrollo. Laboratorio de Recursos Naturales y Vida Silvestre, Escuela de Ciencias Biológicas, Universidad Nacional, Costa Rica. Correo electrónico: lilliana.piedra.castro@una.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0003-4878-1531>



Palabras clave

Emisario submarino; isla Uvita, Limón; contaminación; descargas.

Resumen

El presente trabajo evaluó una serie de parámetros físicos y químicos para determinar la calidad del agua marina en los alrededores de la isla Uvita, Limón, Costa Rica, y determinar la posible influencia de las descargas procedentes del emisario submarino de la ciudad de Limón sobre el entorno marino circundante. Se evaluaron nutrientes (nitritos, nitratos, silicatos, fosfatos y amonio), metales pesados (plomo, cromo, níquel), sólidos (disueltos y sedimentables) y parámetros físicos (pH, temperatura, turbiedad, etc.). La zona de estudio se dividió en segmentos circundantes a la isla y se ubicaron 6 puntos de muestreo alrededor de la misma con el fin de comparar la calidad del agua de las áreas con mayor influencia del emisario con las de menor influencia. Se programaron tres actividades de muestreo: setiembre 2012 (época lluviosa), octubre 2012 (transición lluviosa-seca) y setiembre 2013 (época lluviosa). Los niveles de nutrientes, metales pesados, sólidos y parámetros físicos, se compararon con los reportados en la literatura para el Golfo de México y el Mar Caribe, encontrándose que, en general, eran mayores a los reportados en la literatura. En particular, los datos del último muestreo mostraron un incremento considerable en la concentración de los metales pesados (Pb, Cr y Ni), que podría ser atribuido a factores ajenos a las descargas del emisario como por ejemplo las operaciones portuarias y las actividades antropogénicas industriales, las cuales repercuten en la zona mencionada.

Keywords

Submarine emissary; Uvita island, Limón; pollution; discharges.

Abstract

The present work evaluated a series of physical and chemical parameters to determine the quality of marine water in the surroundings of Uvita island, Limón, Costa Rica, and to determine the possible influence of the discharges coming from the submarine emissary of the city of Limón on the surrounding marine environment. Nutrients (nitrites, nitrates, silicates, phosphates and ammonium), heavy metals (lead, chromium, nickel), solids (dissolved and sedimentable) and physical parameters (pH, temperature, turbidity, etc.) were evaluated. The study area was divided into segments surrounding Uvita island, and 6 sampling points were located around the island in order to compare the water quality of the areas with greater emissary influence with those of less influence. Three sampling activities were scheduled: September 2012 (rainy season), October 2012 (rainy-dry transition) and September 2013 (rainy season). The levels of nutrients, heavy metals, solids and physical parameters were compared with those reported in the literature for the Gulf of Mexico and the Caribbean Sea, finding that, in general, they were higher than those reported in the literature. In particular, the last sampling data showed a considerable increase in the concentration of the heavy metals (Pb, Cr and Ni), which could be attributed to other factors outside the emissary's discharges such as port operations and industrial anthropogenic activities, which impact on the aforementioned area.

Introducción

El manejo inadecuado de los recursos naturales en Costa Rica, en conjunto con las formas ineficientes de tratar los residuos sólidos y líquidos, se ha incrementado considerablemente en los últimos años; lo anterior obedece primordialmente a un crecimiento desproporcionado en los sectores económico, social e industrial, lo cual repercute en la contaminación y la degradación del medio ambiente, afectando directa o indirectamente las cuencas hidrográficas del país [1].

El deterioro de los cuerpos de agua superficiales aumenta cuando los sectores sociales e industriales disponen de manera inadecuada los desechos generados en las actividades cotidianas, siendo por lo general los vertederos finales los ríos, los humedales, los lagos, las lagunas, los mares y los océanos.

El auge y la tecnificación masiva de sectores como la industria de los alimentos, los servicios, la agricultura, la ganadería y el turismo, tienden a incrementar la generación de desechos de toda índole, entre los cuales destacan residuos tóxicos como metales pesados, plaguicidas y desechos electrónicos, entre otros. [1].

La disposición de aguas residuales en los cuerpos superficiales en Costa Rica es un problema que se ha intensificado debido a la carencia de sistemas eficientes de alcantarillado sanitario. Solo el 24,8% de la población costarricense está cubierto por el sistema de alcantarillado público; adicionalmente, los pocos existentes han colapsado debido al incremento de la población y a la ausencia del mantenimiento [2]. Se ha reportado que uno de cada 15 habitantes (6,6% de la población) recibe el servicio de alcantarillado sanitario, siendo San José la provincia con la mayor cobertura (51%), seguida por Heredia y Cartago (15%), en las restantes provincias la cobertura es inferior al 10% [3]

No todas las aguas colectadas por el sistema de alcantarillado son llevadas a una planta depuradora, la descarga de aguas residuales industriales y domésticas en los cuerpos de agua incrementa la cantidad de materia orgánica presente, lo que conlleva a una disminución del contenido de oxígeno disuelto que a su vez afecta los ecosistemas acuáticos. Asimismo, el incremento de los sólidos sedimentables provenientes de la sedimentación de la materia orgánica y la erosión del suelo ocasiona a mediano plazo, que un cuerpo de agua pierda la capacidad de soportar la diversidad acuática [3].

Las aguas superficiales que desembocan en las costas se ven afectadas por la presencia de microorganismos, compuestos inorgánicos, nutrientes, sólidos en suspensión, metales pesados, compuestos orgánicos (denominados “materia orgánica disuelta”) e hidrocarburos, entre otros. En consecuencia, la calidad del agua dependerá del valor de los distintos parámetros físicos, químicos, bióticos y microbiológicos [3].

Una alternativa para disponer los desechos que tienen por destino final los océanos es el uso de sistemas de difusión, entre los que destacan los emisarios submarinos. La ciudad de Limón no escapa a la problemática de la generación de residuos líquidos y sólidos; por ello, en el año 2005 se instaló un emisario submarino para el tratamiento de los residuos líquidos. Este dispositivo consiste en un ducto cerrado que transporta las aguas negras urbanas, de origen doméstico o industrial, desde una planta de tratamiento preliminar hasta mar abierto, a cierta distancia de la costa (2 km mar adentro), con la intención de prevenir la contaminación en los alrededores de la zona costera [1]. El emisario submarino de la ciudad de Limón se encuentra ubicado entre la isla y la costa, a menos de 1 km del arrecife isleño, como se muestra en la figura 1. Las aguas de la planta de tratamiento se bombean hacia los difusores del emisario submarino formando una pluma que simultáneamente se desplaza por debajo de la termoclina y se diluye en las aguas marinas, evitando que los efluentes lleguen a la superficie y puedan eutrofizar el agua circundante [4].

Estudios de impacto ambiental evaluados en los últimos 15 años por la Secretaría Técnica Nacional Ambiental mostraron que los efectos de contaminantes como hidrocarburos, metales pesados, nutrientes y materia orgánica presentes en las aguas de vertido industrial y domésticas pueden causar una disminución en la flora y la fauna características de los ecosistemas marinos [5].

Por encontrarse cerca de la costa y del muelle, la presencia cercana de la refinadora de petróleo y el frecuente tránsito de embarcaciones, la isla Uvita es susceptible a la contaminación por hidrocarburos y metales pesados. A lo anterior, se le debe adicionar el posible impacto de las aguas inyectadas por el emisario de la Ciudad de Limón [6].

Acuña y colaboradores [7] evaluaron las concentraciones de metales pesados en varios sitios del país. Las concentraciones más altas de plomo se detectaron en el Caribe y en la Bahía de Golfito, y para los otros elementos los valores máximos se encontraron en la Bahía de Golfito. Se consideró que tanto la Bahía de Moín como el Golfo de Nicoya mostraron una condición intermedia de contaminación. Según los autores, la desembocadura del río Moín es el lugar donde convergen dos fuentes principales de contaminación por hidrocarburos del Caribe costarricense: la Refinadora Costarricense de Petróleo y el muelle.

Otra amenaza para el sitio es el arrastre de sedimentos por parte de los ríos, principalmente del río Cieneguita, los cuales se originan por la deforestación de las montañas tierra adentro, así como por las prácticas agrícolas inapropiadas y las construcciones ubicadas en las zonas costeras; lo cual provoca la afectación de los arrecifes coralinos con sustancias ajenas al mismo, ocasionando un daño al ecosistema marino [7].

El emisario submarino de la ciudad de Limón está dividido en cuatro secciones: a) sección terrestre, b) sección marítima sobre el fondo coralino, c) sección marítima sobre fondo no coralino y d) sección marítima de difusores (comprende el extremo final del emisario submarino, que se extiende sobre formaciones no coralinas) [8].

En el caso particular de la Isla Uvita, debido al sistema de corrientes marinas y la cercanía con la costa, su ecosistema marino se ve influenciado por el manejo de los residuos sólidos y líquidos de la ciudad de Limón, en particular por las aguas residuales descargadas por el emisario submarino [9]. En consecuencia, las aguas negras podrían provocar que los corales sean desplazados por competencia por algas, lo cual modificaría el ecosistema marino de la Isla [9].

Materiales y métodos

Frecuencia y elección de puntos de muestreo

El estudio se llevó a cabo en las cercanías de la isla Uvita (figura 2), entre setiembre del 2012 y agosto del 2013. Para la puesta en marcha del proyecto se programaron tres visitas de campo, en función de las épocas climatológicas del año, como se describe a continuación:

- Setiembre 2012 (época lluviosa).
- Octubre 2012 (transición lluviosa-seca).
- Setiembre 2013 (época lluviosa).

Debido a que en la isla Uvita no se presenta una estación seca bien definida; se tomaron las muestras en setiembre, que corresponde al mes más lluvioso en la zona Caribe. Sin embargo, se reconocen dos periodos bien definidos de lluvia: de octubre a enero, y de mayo a agosto [10].

La distribución de dichos puntos se aprecia en la figura 3. Los puntos marcados como E1, E2, E3 y E4 se designaron como zonas de influencia por el emisario submarino, mientras que los puntos más alejados representados como E5 y E6 se utilizaron como puntos de control definidos como “zona sin influencia” del emisario; para efectos de la discusión de resultados se hará referencia a las estaciones de muestreo 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

En cada punto se recolectaron muestras a dos profundidades, a nivel superficial y a 10 m; los parámetros físicos evaluados en cada punto fueron oxígeno disuelto, temperatura, pH, turbiedad y sólidos. Los análisis químicos realizados fueron nutrientes (nitrógeno amoniacal, nitritos, nitratos, fosfatos y silicatos) y metales pesados (Pb, Ni y Cr).

En la literatura consultada no se logró ubicar una norma de evaluación de la calidad de agua de mar; en consecuencia, los datos generados se compararon con los resultados reportados en la literatura para el Golfo de México [11] [12] y la zona del Caribe de Costa Rica [13] [14]. Los valores promedio se analizaron estadísticamente con el programa Minitab 17®.

Resultados y discusión

Cuadro 1. Valores promedios de las concentraciones ($\mu\text{mol/L}$) de nutrientes a nivel superficial y a 10 metros de profundidad.

Estación de muestreo	$\text{NO}_3^- (\pm 0,06)$		$\text{NO}_2^- (\pm 0,02)$		$\text{NH}_4^+ (\pm 0,7)$		$\text{PO}_4^{-3} (\pm 0,16)$		$\text{SiO}_4^{-4} (\pm 0,5)$	
	0 m	10 m	0 m	10 m	0 m	10 m	0 m	10 m	0 m	10 m
1	4,46	3,05	0,68	0,97	1,8	1,0	1,02	0,33	2,0	6,4
2	4,86	7,48	0,25	0,56	1,0	0,6	0,83	1,13	5,5	4,2
3	6,19	8,19	0,23	0,33	1,6	0,3	2,75	0,62	7,7	8,3
4	6,00	11,54	0,28	0,24	0,8	0,2	0,43	0,49	4,0	8,7
5	5,32	6,93	0,28	0,36	1,3	0,4	0,65	1,40	7,9	4,8
6	4,65	1,87	0,20	0,73	2,2	0,7	0,54	0,76	4,8	3,9
Promedio	5,25	6,51	0,32	0,53	1,4	0,5	1,03	0,79	5,3	6,0
Promedio General	5,88		0,43		1,0		0,91		5,7	

Los valores promedio (en $\mu\text{mol/L}$) de los nutrientes (nitrato, nitrito, amonio, fósforo y silicio), a nivel superficial y a 10 metros de profundidad, se resumen en el cuadro 1. Se obtuvieron los siguientes valores promedio: ($5,88 \pm 0,06$) $\mu\text{mol/L}$ para NO_3^- ; ($0,43 \pm 0,02$) $\mu\text{mol/L}$ para NO_2^- ; ($1,0 \pm 0,7$) $\mu\text{mol/L}$ para NH_4^+ ; ($0,91 \pm 0,16$) $\mu\text{mol/L}$ para fósforo P y ($5,7 \pm 0,5$) $\mu\text{mol/L}$ para silicio; los datos del cuadro 1 superan en algunos casos los niveles encontrados por Villanueva y Botello [12] en el Golfo de México y por Mora y Portuguez [13] en la zona de influencia de la isla Uvita. Lo anterior sugiere que, si el emisario continúa con las descargas, a mediano o largo plazo podría tener un efecto negativo sobre el ecosistema en los alrededores de la Isla Uvita.

En el cuadro 2 se muestran los valores promedio de los parámetros fisicoquímicos determinados *in-situ*, los sólidos disueltos y los sólidos sedimentables. Con respecto a los sólidos suspendidos o sedimentables, los niveles constantes en todos los muestreos y épocas del año sugieren que no hay un efecto directo de las descargas de sedimentos a través del emisario submarino

sobre el entorno circundante; las grandes masas de agua en los mares permiten la dilución y la dispersión homogénea de la materia orgánica, así como de los sólidos suspendidos y sedimentos que pueden llegar a la zona aledaña a la isla por parte del emisario. Los parámetros medidos *in situ* (temperatura, pH, turbiedad, conductividad y oxígeno disuelto) de la zona de estudio presentaron valores estables y similares entre sí, lo que sugiere que no hay una influencia negativa del emisario submarino sobre estos parámetros en el entorno. Tampoco se observa un cambio significativo de alguno de los parámetros estudiados en función de la estación climatológica.

La comparación de los datos de los cuadros 1 y 2 con la información reportada por Villanueva y Botello ([12] para el Golfo de México y por Mora y Portuguese [13] para las cercanías de la isla Uvita, sugiere que el emisario submarino tiene un impacto ligero en el ecosistema marino; sin embargo, se necesita realizar una mayor cantidad de repeticiones de los parámetros analizados en esta sección para tener un mejor panorama del efecto del emisario en la zona de estudio.

Cuadro 2. Valores promedio de los parámetros determinados *in-situ* y de los sólidos a nivel superficial y a 10 metros de profundidad, en seis estaciones de muestreo frente a la Isla Uvita, Limón, entre el 2012 y el 2013.

Estación de muestreo	S. Sed mL/L (± 0,01)		S. Disueltos g/L (± 0,2)		pH (± 0,1)		Temperatura °C (± 0,1)		Oxígeno disuelto mg/L (± 0,1)		Conductividad µS/cm (±1)		Turbiedad m (± 0,1)
	0 m	10 m	0 m	10 m	0 m	10 m	0 m	10 m	0 m	10 m	0 m	10 m	
Profundidad													NA
1	0,10	0,23	30,6	38,5	8,4	8,2	28,5	27,7	7,3	5,5	49600	53400	0,7
2	0,10	0,10	35,2	36,8	8,3	8,3	28,8	28,5	7,6	5,1	49500	51300	0,7
3	0,10	0,10	34,4	37,6	8,5	8,2	29,6	29,3	7,6	5,3	50400	51600	1,0
4	0,10	0,10	36,0	37,9	8,6	8,2	30,1	29,9	7,7	5,6	49900	52800	2,0
5	0,10	0,10	40,5	37,7	8,5	8,4	28,9	28,7	8,0	5,2	47700	52800	0,8
6	0,13	0,10	36,3	38,7	8,1	8,1	28,4	29,1	8,1	5,2	48000	52800	1,0

En el cuadro 3 se muestran las concentraciones promedio (en mg/L) de los niveles de cromo, plomo y níquel, en las seis estaciones de muestreo. Se observó que, en general, las concentraciones de Ni²⁺ fueron mayores a las de Pb²⁺ y éstas últimas un poco mayores a las de Cr³⁺. Los niveles de los metales pesados superaron los valores reportados para el Golfo de México [12]: (0,00002-0,00015 mg/L para cromo; 0,001-1,963 mg/L para plomo; 0,0000005-0,006 mg/L para níquel). Es importante mencionar que se detectaron niveles muy altos de estas especies en la tercera actividad de muestreo; la presencia de estos metales sugiere que la zona de estudio podría estar siendo influenciada por otras actividades antropogénicas ajenas al emisario submarino de la ciudad de Limón, así como por la constante actividad portuaria y de la industria petrolera cercana a la zona. En ese sentido, se hace necesario realizar nuevos muestreos para identificar la causa principal de la presencia de los metales detectados; adicionalmente, se requiere evaluar los niveles de metales en las aguas que llegan al emisario, actividad que no se pudo llevar a cabo debido a que la institución que lo administra no otorgó el permiso correspondiente.

Cuadro 2. Promedios de los metales pesados analizados (Pb, Cr y Ni) a nivel superficial y a 10 metros de profundidad.

Estación de muestreo	Cromo mg/L (± 0,025)		Plomo mg/L (± 0,025)		Níquel mg/L (± 0,025)	
	0 m	10 m	0 m	10 m	0 m	10 m
1	0,166	0,179	0,328	0,308	0,626	0,489
2	0,180	0,203	0,303	0,372	0,617	0,815
3	0,189	0,183	0,443	0,290	0,416	0,493
4	0,142	0,151	0,326	0,394	0,305	0,665
5	0,180	0,180	0,438	0,356	0,513	0,472
6	0,166	0,196	0,312	0,354	0,650	0,685

La información del cuadro 3 no permite establecer si el emisario submarino, en lo concerniente a metales pesados, tiene una influencia directa sobre el entorno. Tampoco se detectaron diferencias con el cambio de época lluviosa a seca y viceversa. Tal parece que tanto el efecto de dilución de la masa oceánica como las corrientes marinas, tienden a homogenizar los posibles contaminantes inyectados al océano por parte del emisario submarino; adicionalmente, no se observan comportamientos atípicos con el cambio de estación climatológica.

Conclusiones

Los datos encontrados en el presente estudio, no permiten afirmar que las descargas del emisario submarino de la ciudad de Limón tienen una influencia significativa sobre el entorno de la Isla Uvita. El aumento en los niveles de metales pesados detectados en la última actividad de muestreo más parece obedecer a factores antropogénicos y naturales de la zona, que no están ligados exclusivamente a las descargas del emisario submarino. No obstante, este último podría aportar contaminantes a mediano y largo plazo al ecosistema marino de la zona.

Se identificaron tres posibles factores de riesgo ambiental: la constante actividad portuaria, el crecimiento de la industria petrolera y el flujo de inyección del emisario submarino; dichas actividades podrían generar desechos potencialmente tóxicos para el entorno marino.

Las estaciones de referencia (5 y 6) mostraron un comportamiento similar a las estaciones de influencia (1, 2, 3 y 4) en la mayoría de parámetros analizados; lo anterior sugiere que hay un efecto directo del emisario y de los demás emisores de contaminantes sobre las estaciones denominadas como zona de referencia (5 y 6); sin embargo, se necesita recolectar más información para definir el impacto del emisario sobre dichos puntos.

Referencias

- [1] C. Gamboa, «Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto del Emisario Submarino para el Alcantarillado Sanitario de la Ciudad de Limón. Anexo 4: "Estado actual de las 134 comunidades marinas en los alrededores de la Isla Uvita, Limón, Costa Rica",» PROIGE, San José, Costa Rica, 1998.
- [2] F. Ruiz, «Variables de medición de indicadores de gestión de excretas y aguas residuales,» Focards-APS, San José, Costa Rica, 2012.

- [3] «Decreto No. 30413. Reglamento Sectorial para la Regulación de los Servicios de Acueducto y Alcantarillado Sanitario. Costa Rica.,» La Gaceta No. 91., 2002.
- [4] A. Ramírez y E. Salazar, «Calidad de aguas residuales en los sistemas de depuración operados y administrados por AYA y estudios especiales de interés institucional,» Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, San José, 2005.
- [5] E. Aguilar, M. Ballester, J. Echeverría y C. & O. V. R. Espinosa, «Primera etapa del plan de manejo integral del recurso hídrico: una estrategia nacional para el MIRH.,» Ministerio del Ambiente y Energía de Costa Rica (MINAE), San José, Costa Rica, 2004.
- [6] J. M. Acuña, «Calidad de aguas residuales en los sistemas de depuración operados y administrados por AyA y estudios especiales de interés institucional. Instituto Costarricense de acueductos y alcantarillados,» Instituto Costarricense de acueductos y alcantarillados, San José, Costa Rica, 2005.
- [7] J. García, J. Acuña y J. Vargas, «Metales traza en sedimentos costeros de Costa Rica,» *Revista de Biología Tropical*, vol. 52, pp. 51-60, 2004.
- [8] H. Salas, «Emisarios submarinos: Enfoque general, conceptos básicos de diseño y requerimientos de datos para América Latina y el Caribe,» CEPIS, 1998.
- [9] C. Pérez, *Interpretación ambiental de un sendero autoguiado en Isla Quiribrí de Puerto Limón, como un aporte al desarrollo turístico de la Región Caribe de Costa Rica.*, San José: Universidad de Costa Rica, 2003.
- [10] I. M. N. (IMN), *Comité Nacional de Hidrología y Meteorología de Costa Rica (CHRM Costa Rica), Balance hídrico superficial de Costa Rica, PHI-LAC., documento técnico N° 10, UNESCO, 2003.*
- [11] F. Contreras, O. Castañeda, R. Torres-Alvarado y F. Gutiérrez, «Nutrientes en 39 lagunas costeras mexicanas,» *Revista de Biología Tropical*, vol. 44, n° 2, pp. 417-425, 1996.
- [12] S. F. Villanueva y A. V. Botello, «Metales pesados en la zona costera del Golfo de México y Caribe Mexicano: una revisión.,» *Revista internacional de contaminación ambiental*, vol. 8, n° 1, pp. 47-61, 1992.
- [13] D. Mora-Alvarado y C. Portuguez-Barquero, «Cobertura de la disposición de excretas en Costa Rica para el periodo 2000-2014 y expectativas en el 2021,» *Tecnología en Marcha*, vol. 29, n° 2, pp. 43-62, 2016.
- [14] INVEMAR, «Diagnóstico y evaluación de la calidad ambiental marina en el Caribe y Pacífico colombiano. Red de vigilancia para la conservación y protección de las aguas marinas y costeras de Colombia. Diagnóstico nacional y regional.,» 2005.

Estudio fotoacústico de nanopartículas de oro por ablación láser

Photoacoustic study of gold nanoparticles by laser ablation

Jesús Manuel Rivera-Esteban¹, Agustin Benigno Olivas-Alvarez²

Fecha de recepción: 9 de noviembre de 2019

Fecha de aprobación: 10 de marzo de 2020

Rivera-Esteban, J.M; Olivas-Alvarez, A.B. Estudio fotoacústico de nanopartículas de oro por ablación láser. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-2. Abril-Junio 2021. Pág 96-108.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i2>.

1 Doctor en Física. Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja, Daniel Hernandez Morillo. Perú. Correo electrónico: jgiancolli.61@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-1790-6955>

2 Máster en Dirección de la Calidad Total en la Universidad Politécnica de Madrid-España. Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernandez Morillo. Perú.

 <https://orcid.org/0000-0001-5688-7112>



Palabras clave

Fotoacústica; nanopartículas de oro; ablación con láser.

Resumen

En la presente tesis se investigó el cambio de morfología y tamaño de las nanopartículas de oro obtenidos por ablación láser, con diferentes métodos de reconfiguración. En el caso del oro, el blanco fue ablacionado con un láser pulsado de Nd: YAG, (1064 nm, 37.48 mJ/p, 10 Hz, durante 10 minutos), los espectros de absorción presentan un solo máximo de absorción a 521 nm característica de las nanopartículas esféricas de oro. Se aplicó la técnica PLI a los coloides con pulsos láser de 532 nm de longitud de onda, 25.8 mJ de energía durante 6 minutos. El análisis por dispersión dinámica de la luz (DLS) mostró que las NpsAu con PLI fueron de 21 nm de diámetro, además, se comprobó que la amplitud de la señal fotoacústica está relacionada directa y proporcionalmente con la concentración de NpsAu en el coloide evidenciando que a mayor concentración la respuesta fotoacústica es mayor. De la investigación se concluyó que la técnica PLI focalizada aplicada a los coloides con NpsAg presenta nuevas morfologías. En el caso del oro se encontró un cambio de tamaño.

Keywords

Photoacoustics; gold nanoparticles; laser ablation.

Abstract

In the present thesis, the change in morphology and size of gold nanoparticles obtained by laser ablation was investigated using different reconfiguration methods. In the case of gold, the target was ablated with a pulsed Nd: YAG laser, (1064 nm, 37.48 mJ/p, 10 Hz, during 10 minutes), the absorption spectra present a single absorption maximum at 521 nm characteristic of spherical gold nanoparticles. The PLI technique was applied to the colloids with laser pulses of 532 nm wavelength, 25.8 mJ of energy during 6 minutes. The analysis by dynamic dispersion of light (DLS) showed that the NpsAu with PLI were 21 nm in diameter. In addition, it was found that the amplitude of the photoacoustic signal is directly and proportionally related to the concentration of NpsAu on the colloid, showing that the higher the concentration, the greater the photoacoustic response. From the research it was concluded that the focused PLI technique applied to colloids with NpsAg presents new morphologies. In the case of gold, a change in size was found.

Introducción

La nanociencia es el estudio de los fenómenos y la manipulación de materiales a escala nanométrica y la nanotecnología se define como el diseño, caracterización y aplicación de estructuras, dispositivos y sistemas complejos mediante el control de la forma, el tamaño y las propiedades de la materia a escala nanométrica [1]. Así estas dos disciplinas emergentes tienen un elevado carácter multidisciplinar con especial relevancia científica y social.

Esta disciplina abre las puertas a la comprensión de nuevos fenómenos y al descubrimiento de nuevas propiedades y que pueden ser utilizables a escala macroscópica y microscópica: El objetivo es el control del comportamiento y la estructura de la materia a nivel atómico y molecular. En la literatura se muestran varias definiciones respecto a un nanomaterial o nanopartícula, así, por ejemplo, la National Nanotechnology Initiative: NNI, por sus siglas en inglés, propuso la siguiente definición: material con dimensiones de 1-100 nm (1 nm = 10⁻⁹ m), donde fenómenos únicos permiten nuevas aplicaciones y que fue reportado por Kaiser et al. [2].

Actualmente, la técnica de ablación láser pulsada en líquidos (PLAL) es ampliamente utilizada para la generación de nanopartículas (Nps), debido a que no genera residuos tóxicos y además las superficies de las Nps se encuentran ligadas, lo cual permite la posterior funcionalización con moléculas de interés particular para el investigador. La técnica PLAL, está ganando un creciente interés gracias a una serie de ventajas prometedoras, que incluyen: la sostenibilidad ambiental, de fácil montaje experimental, que se producen completamente libre de contaminantes no deseados o reactivos de síntesis peligrosas y fueron estudiadas por Amendola y Meneghetti [3], Nikov et al. [4] y Dell'Aglio et al. [5], que consiste básicamente en hacer incidir un láser de alta potencia de manera pulsada sobre una superficie de un blanco sólido, sumergido en un medio líquido.

En ese sentido, para llevar a cabo los estudios de los efectos de los parámetros del láser en la síntesis de los coloides y la características de las Nps obtenidas, tales como: tamaño, distribución de tamaño, concentración y la morfología, se utilizaron varias técnicas: fotoacústica pulsada, espectroscopia ultravioleta visible (UV-Vis), Espectroscopia de Absorción Atómica (AAS; Atomic Absorption Spectrometer), Dispersión Dinámica de la Luz, (DLS; Dynamic Light Scattering), y Microscopía Electrónica de Barrido (SEM; Scanning electron microscopy y STEM (Scanning Transmission Electron Microscopy).

Es por ello que, la novedad del estudio fue el uso de la fotoacústica pulsada para caracterizar coloides con NpsAu; encontrar cambios en las NpsAg, debido al mecanismo de la posterior irradiación láser y la obtención de nuevas morfologías en las NpsAg. Así como el uso de la NpsAg semilla, para inducir la reconfiguración de las NpsAg esféricas a otras morfologías. Y el objetivo general fue estudiar el efecto fotoacústico de nanopartículas de oro y síntesis de nanopartículas de plata producidas por la técnica Ablación láser pulsada en agua.

Material y métodos

El estudio presenta los aspectos fundamentales referidos al estudio de los coloides con NpsAu y NpsAg, producidos por la técnica PLAL con pulsos láser de 1064 nm, teniendo como objeto de estudio el efecto de la posterior irradiación con pulsos láser de longitud de onda de 532 nm en los coloides con NpsAu.

Para realizar la síntesis y posterior irradiación de la solución coloidal con radiación láser pulsada y focalizada se requirió determinar los parámetros experimentales que permiten modificar el tamaño y/o la forma de las Nps; con el fin de obtener, por un lado, sistemas de Nps con una dispersión reducida de tamaño y por otro lado evaluar las posibles nuevas geometrías. Se estudió la influencia de la concentración de los coloides (masa de oro por unidad de volumen) en el mecanismo de la irradiación de los mismos. Cambios en la PA de los coloides con NpsAu, sugieren cambios en el tamaño y forma de las Nps. Se utilizaron los equipos y materiales del Laboratorio de Óptica y Láseres de la Universidad Nacional de Trujillo.

Por otra parte, se describe los trabajos realizados en el Laboratorio de Óptica y Láseres (LOYL) del Departamento Académico de Física de la Universidad Nacional de Trujillo, y que, corresponde a la producción, posterior irradiación y caracterización de los coloides con NpsAu. En esta parte se ha utilizado, espectroscopia óptica UV-Vis, PA, AAS y DLS. Se sintetizaron coloides con NpsAu por el método PLAL. El blanco fue ablacionado con radiación infrarroja de longitud de onda 1064 nm proveniente de un láser Nd: YAG, con 12 mJ de energía a 10 Hz, durante 10 minutos. Al considerar la solución principal, se prepararon cinco muestras en dilución para variar la concentración la cual fue medida por Espectroscopia de Absorción Atómica (AAS).

En ese sentido, para direccionar el haz láser sobre la placa se utilizó un espejo y para focalizar el haz se usó una lente, tal como se muestra en la figura 1. Además, se empleó una plataforma giratoria sobre la cual se adhirió el vaso conteniendo a la lámina de oro y agua ultrapura, esta cumple dos funciones: evitar la ablación de la placa en una única zona y agitar la solución coloidal.



Figura 1. Esquema experimental completo para producir coloides con NpsAu, por la técnica PLAL.

Se fijaron como parámetros la energía del láser; longitud de onda de 1064 nm, energía de 37.48 mJ/p y a una frecuencia de repetición de 10 Hz. Bajo estas condiciones se prepararon dos muestras con 20 ml cada una haciendo una solución única de 40 ml coloides con NpsAu. Luego se formaron cinco muestras por disolución, se aplicó el método PLI utilizando el mismo láser, pero con longitud de onda de 532 nm, con energía de 25.8 mJ/p, durante 6 minutos, esto consistió básicamente en retirar el blanco de oro y aplicar PLI directamente al colóide. De las cinco muestras en disolución con concentraciones diferentes se dividieron cada una en dos muestras la primera para ser caracterizada por espectroscopia UV-Vis y la segunda muestra por espectroscopia PA.

Detección de las señales PA de los coloides con NpsAu

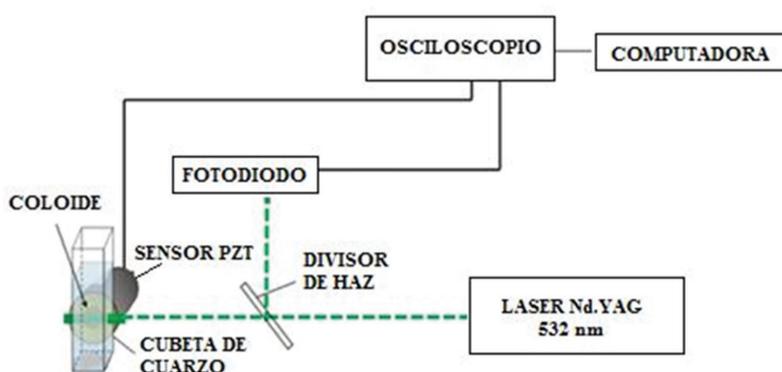


Figura 2. Montaje experimental para la detección de las señales fotoacústicas de los coloides de NpsAu.

Para las señales fotoacústicas de los coloides con NpsAu, se utilizó el segundo armónico de un láser Nd:YAG (532 nm) a una frecuencia de repetición de 10 Hz, (figura 2). Los coloides metálicos como el oro, la plata absorben la energía en la región visible del espectro electromagnético. Las señales fotoacústicas fueron producidas debido a la interacción de los coloides con la radiación de 532 nm. Las señales fotoacústicas se detectaron mediante un sensor PZT de 254 KHz adherido a una de las caras de una cubeta de cuarzo de dimensiones 1 cm x 1 cm x 5 cm, con

3 ml del coloide de nanopartículas de oro. Estas señales fueron adquiridas con un osciloscopio digital (DPO 3054 de 500 MHz, 2.5GS/s) y los datos exportados a una computadora para su posterior análisis. Se utilizó un fotodiodo como mecanismo de disparo del osciloscopio para que este pueda registrar las señales detectadas por el sensor PZT.

La energía del haz láser utilizado para la irradiación de los coloides de nanopartículas de oro fue de 0.5 mJ/p que está por debajo del umbral de ablación del coloide (régimen termoelástico) donde no se deforman las fuentes de donde proviene la señal PA y que proporcionara información acerca de las Nps sin modificarlas [6].

Las concentraciones de oro presentes en los coloides con NpsAu, fueron caracterizados al utilizar el equipo Perkin Elmer, Atomic Absorption Spectrometer PinAAcle900F, del Laboratorio de Química Instrumental de la Universidad Nacional de Trujillo.

Caracterización por Espectroscopia Ultravioleta-Visible (UV-Vis)

Es una técnica espectroscópica basada en las transiciones electrónicas en la región UV (380 -780 nm) del espectro electromagnético. En el caso de las NpsAu los espectros de UV-Vis nos sirven para monitorear el desplazamiento del SPR, que está asociado al tamaño y forma de las NpsAu y proveen información de la unión de las moléculas a la superficie de las NpsAu, además de evaluar la estabilidad de las suspensiones coloidales.

La técnica UV-Vis nos permite evidenciar el plasmón superficial de las NpsAu, el cual refleja la oscilación colectiva de los electrones de conducción de las nanopartículas, debido a las interacciones de los mismos con la luz incidente. La interacción ocasiona una polarización temporal y por ello la formación de un dipolo oscilante. El dipolo oscila a la frecuencia de la luz incidente. Existe una frecuencia de resonancia para la cual la interacción entre la nanopartícula y la luz origina un máximo de absorción. Este máximo depende de la forma y tamaño de la nanopartícula y el medio circundante [7].

Como consecuencia de la fuerte interacción entre los electrones y la luz incidente, se produce una oscilación coherente de los electrones confinados en la superficie de las nanopartículas metálicas, en la interfaz metal-dieléctrico; la excitación electromagnética se llama polaritón del plasmón de superficie; el polaritón es una cuasi-partícula híbrida resultante del fuerte acoplamiento entre la luz y los electrones libres de una nanopartícula. Para determinadas frecuencias de la energía incidente, se produce un acoplamiento entre las frecuencias de la onda incidente y de la oscilación del polaritón, este fenómeno es la SPR [8].

Caracterización por Dispersión Dinámica de la luz (DLS)

La espectroscopia de correlación de fotones según Guerrero et al. [9] también se denomina dispersión dinámica de luz (DLS) y se utiliza para medir el tamaño de una partícula en el rango micrométrico utilizando el movimiento browniano en medios acuosos. Las partículas pequeñas se difunden más rápidamente y conducen a una mayor fluctuación de la intensidad de la luz dispersada en comparación para partículas más grandes. Los resultados se pueden dar en modo: Intensity Weighting, Volume Weighting, o Number Weighting, es ir ponderando la intensidad de las nanopartículas, ponderando el volumen de las nanopartículas o ponderando el número de las nanopartículas, respectivamente, (nosotros damos los resultados ponderando el número de las nanopartículas).

Resultados y discusiones

De una solución de 40 ml de un coloide con NpsAu producidas por la técnica PLAL se obtuvieron cinco muestras por disolución. Estas muestras fueron caracterizadas por las técnicas UV-Vis y fotoacústica pulsada, los nuevos coloides obtenidos por disolución fueron modificados por la técnica PLI (con el propósito de obtener cambios en su tamaño promedio), para lo cual se utilizó el láser pulsado Nd: YAG (532 nm, durante 6 minutos, energía de 25.8 mJ/p) y una lente convergente para focalizar el haz del láser. Los tamaños de la NpsAu fueron determinados al utilizar la técnica de dispersión dinámica de luz. En los siguientes enunciados se detallan los resultados experimentales y las discusiones correspondientes a las NpsAu y los análisis de los mismos.

Síntesis de coloides con NpsAu, por el método de PLAL

Se obtuvo espectros de absorción de cada muestra, observándose un único máximo de absorción en el intervalo visible del espectro electromagnético (520 – 522 nm), lo cual es característico de NpsAu esféricas. Al comparar los diferentes espectros no se evidenció corrimientos significativos en la posición del máximo relacionado con el plasmón de superficie. La concentración de NpsAu en los coloides se obtuvo al utilizar la técnica de Espectroscopia de Absorción Atómica (AAS: Atomic Absorption Spectrometer). Las concentraciones de oro fueron: 0.170 mg/l, 0.346 mg/l, 0.512 mg/l, 0.683 mg/l y 0.854 mg/l.

Efecto de la irradiación (PLI) en las características de las NpsAu

Análisis de los espectros UV-Vis

Considerando la posición del máximo, el ancho de banda, la intensidad de las transiciones interbanda y el área de la curva, se puede realizar una estimación sobre el tamaño de las nanopartículas. Este análisis resulta especialmente interesante para estudiar los cambios producidos por los tratamientos térmicos sobre la curva de absorción del material, ya que la tendencia a variar los citados parámetros es más fácilmente identificable [10].

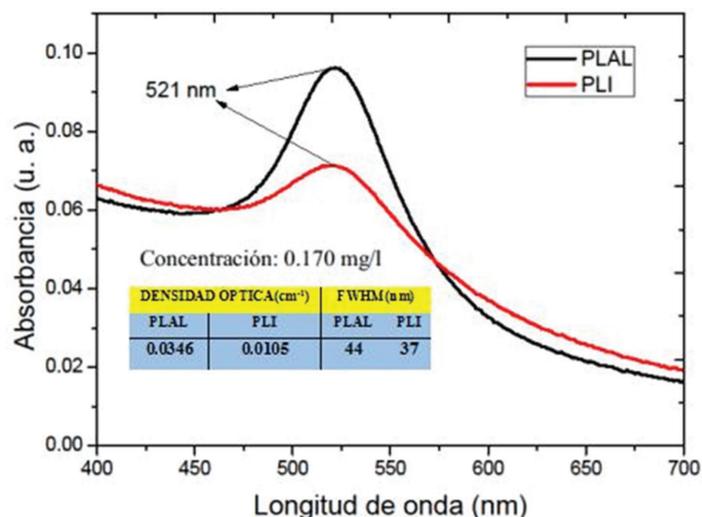


Figura 3. Efecto de la irradiación láser. Un coloide (concentración de 0.17 mg/l) sintetizado por PLAL, con radiación 1064 nm (-), es modificado por PLI (-), con longitud de 532 nm. Se indica la densidad óptica y el ancho de banda a media altura del pico (FWHM) relacionado con el plasmón de superficie.

En la figura 3, se muestran los espectros de absorción de los coloides con NpsAu con una concentración de 0.170 mg/l. Se puede observar un único máximo de absorción en la región visible del espectro electromagnético, relacionado con la resonancia del plasmón de superficie (SPR, Surface Plasmon Resonance); este resultado sugiere que las NpsAu presentes en los coloides presentan forma esférica y tienen tamaño de algunas decenas de nanómetros. La comparación de los espectros de absorción permite inferir que un efecto de la irradiación es modificar la altura del máximo de absorción relacionado con el plasmón de superficie, lo cual sugiere cambios en características de las NpsAu. El máximo de absorción relacionado con el plasmón es proporcional a la concentración de las nanopartículas de oro con tamaños en el intervalo de 5-50 nm [11]. Con respecto al ancho de banda, los coloides irradiados presentan menor ancho de banda (37 nm) por lo que se predice mayor homogeneidad, tal como lo describen Kaiser et al. [2]. El máximo de absorción se presenta a 521 nm para los dos coloides.

Además del tamaño de las nanopartículas, existen otra serie de parámetros que tienen influencia en las propiedades de absorción del material; como son el índice de refracción de la matriz, el tipo de distribución, la geometría de las partículas y la homogeneidad en su distribución. El espectro de absorción del material es el resultado final de diversos parámetros por lo que no es conveniente determinar el tamaño de las nanopartículas al considerar sólo los espectros de absorción. Lo que se puede concluir para el coloide con concentración de 0.170 mg/l, es que el efecto de la irradiación láser fue modificar las propiedades ópticas de los coloides sintetizados por la técnica PLAL. Se evidenció una disminución significativa tanto de la altura y del ancho a media altura del pico de absorbancia relacionado con el plasmón de superficie.

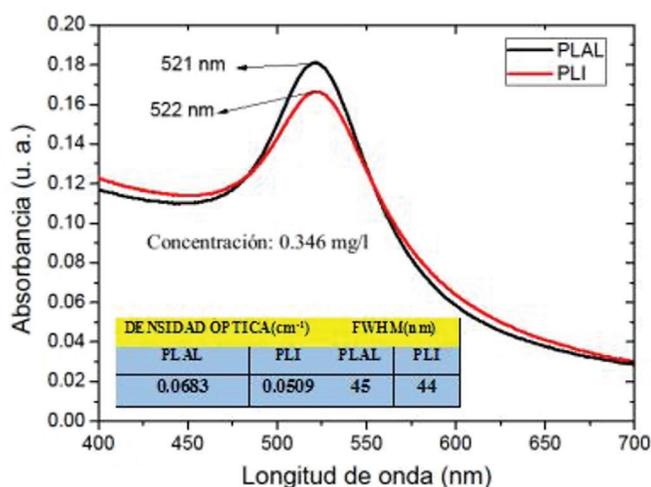


Figura 4. Efecto de la irradiación láser. Un coloide (concentración de 0.346 mg/l) sintetizado por PLAL, con radiación 1064 nm (-), es modificado por PLI (-), con longitud de 532 nm. Se indica la densidad óptica y el ancho de banda a media altura del pico (FWHM) relacionado con el plasmón de superficie.

En la figura 4, se muestran los espectros de absorción de los coloides con NpsAu con concentración de 0.346 mg/l. Se observa un único máximo de absorción. Podemos mencionar que existe el efecto de PLI en la altura, ancho a media altura y posición del pico relacionado con el plasmón de superficie. Esto es consistente con los resultados de la dispersión de luz dinámica, que reporta el efecto de la irradiación en la distribución de los coloides.

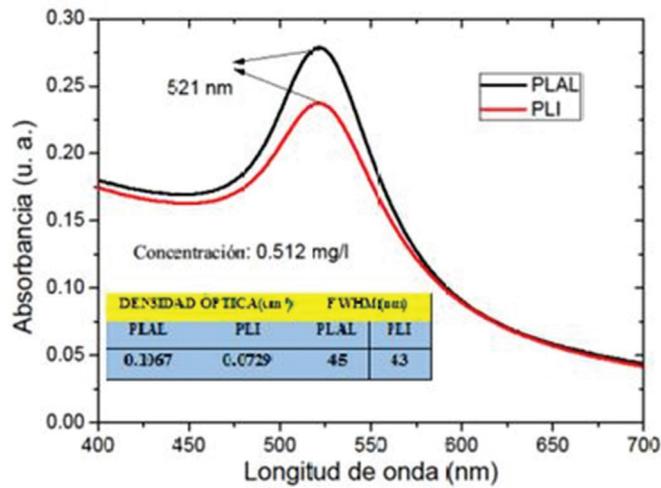


Figura 5. Efecto de la irradiación láser. Un coloide (concentración de 0.512 mg/l) sintetizado por PLAL, con radiación 1064 nm (-), es modificado por PLI (-), con longitud de 532 nm. Se indica la densidad óptica y el ancho de banda a media altura del pico relacionado con el plasmón de superficie (FWHM).

En la figura 5, se muestran los espectros de absorción de los coloides con NpsAu con concentración de 0.512 mg/l. Se observa un único máximo de absorción en la región visible del espectro electromagnético. Al comparar los espectros podemos observar que la variación en el ancho de la banda relacionada con el plasmón es de 2 nm. Respecto a la intensidad del espectro de absorción se observa que los coloides irradiados (PLI) presentan menor intensidad.

Nuevamente se observa el efecto de la irradiación láser en el coloide con concentración de 0.512 mg/l, que es modificar las propiedades ópticas de los coloides sintetizados por la técnica PLAL. Como en el caso anterior, se evidenció una disminución significativa tanto de la altura y del ancho a media altura del pico de absorción relacionado con el plasmón de superficie.

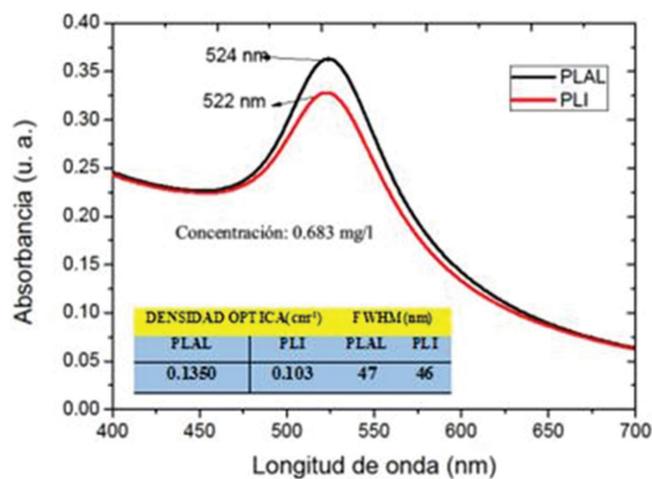


Figura 6. Efecto de la irradiación láser. Un coloide (concentración de 0.683 mg/l) sintetizado por PLAL, con radiación 1064 nm (-), es modificado por PLI (-), con longitud de 532 nm. Se indica la densidad óptica y el ancho de banda a media altura del pico relacionado con el plasmón de superficie (FWHM).

En la figura 6, se muestran los espectros de absorción de los coloides con NpsAu con concentración de 0.683 mg/l. Se observa un único máximo de absorción en la región visible del espectro electromagnético, relacionado con la PSR. Al comparar los espectros podemos observar las variaciones en el ancho de banda de 1 nm.

Por lo que se puede concluir, para el coloide con concentración de 0.683 mg/l es que el efecto de la irradiación láser fue modificar las propiedades ópticas de los coloides sintetizados por la técnica PLAL. Se evidenció una disminución de la altura y del ancho a media altura del pico de absorbancia relacionado con el plasmón de superficie.

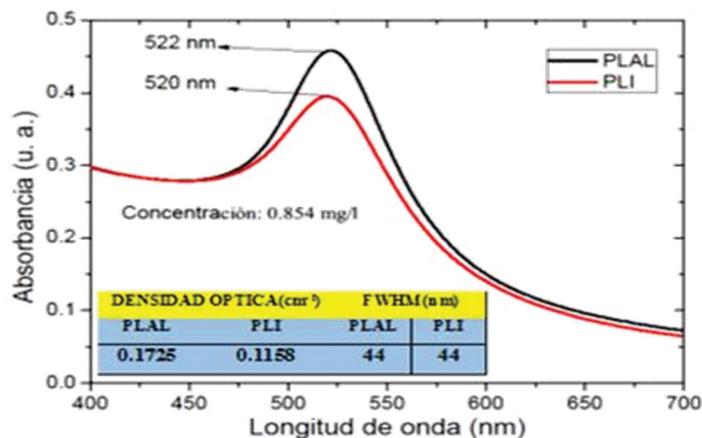


Figura 7. Efecto de la irradiación láser. Un coloide (concentración de 0.854 mg/l) sintetizado por PLAL, con radiación 1064 nm (-), es modificado por PLI (-), con longitud de 532 nm. Se indica la densidad óptica y el ancho de banda a media altura del pico relacionado con el plasmón de superficie (FWHM).

En la figura 7, se muestran los espectros de absorción de los coloides con NpsAu para una concentración de 0.854 mg/l. Se observa un único máximo de absorción en la región visible del espectro electromagnético, relacionado con la PSR. Al comparar los espectros no se observa las variaciones en el ancho de banda, esto es consistente con la homogeneidad de las NpsAu en el coloide.

De las figuras anteriores, se puede inferir que los espectros de absorción de los coloides con NpsAu para diferentes concentraciones, presentan un único máximo de absorción en la región visible del espectro electromagnético, relacionado con la resonancia del plasmón de superficie (PSR); este resultado sugiere que las NpsAu presentes en los coloides presentan en promedio forma esférica y tienen tamaño de algunas decenas de nanómetros, la forma del espectro permite inferir que la forma y tamaño de las nanopartículas en promedio permanecen con cambio poco apreciables [12].

Al comparar los espectros de absorción de los coloides con NpsAu con diferentes concentraciones, se puede observar que cada muestra irradiada presenta una disminución en la intensidad de su máximo de absorción en comparación con su similar en valor de concentración. Este último sugiere cambios en las distribuciones de tamaño. Pyatenko et al. [13], describen que, después de la irradiación de los coloides con NpsAu, puede ocurrir un cambio de forma y reducción de tamaño de las NpsAu. Uno de los mecanismos que pueden ocurrir como consecuencia de la irradiación de las soluciones coloidales es la fusión y vaporización de las NpsAu, las cuales se deben a las altas temperaturas en el interior de las nanopartículas. La alta temperatura es causada por la gran absorción de la energía del láser y la baja transferencia de calor al agua circundante.

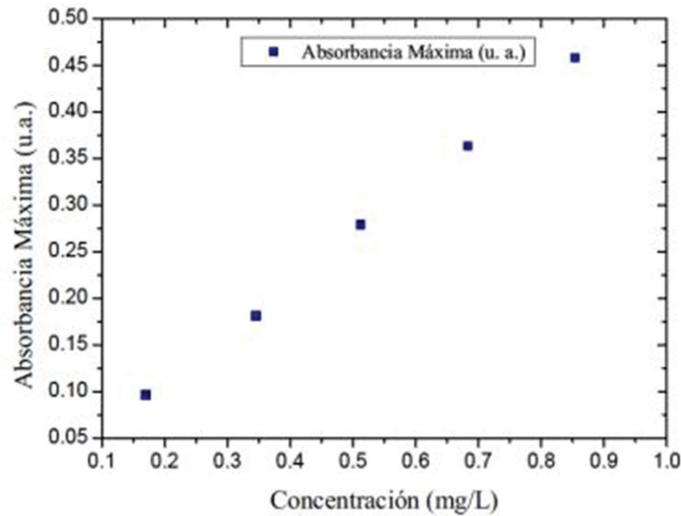


Figura 8. Absorbancia máxima de los coloides con NpsAu con irradiación (PLI), en función de su concentración, la tendencia es lineal, con un coeficiente de Pearson de 0.9964.

En la figura 8, se presenta la relación de la absorbancia máxima en función de la concentración, obteniéndose una relación lineal, lo cual nos indica que a mayor concentración de NpsAu en el coloide se obtiene mayor absorbancia.

Respuesta de la señal fotoacústica de las NpsAu

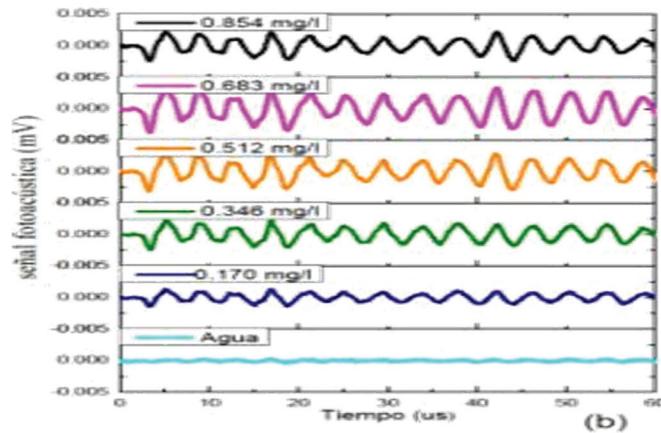


Figura 9. Espectros comparativos de la respuesta fotoacústica de los coloides con NpsAu en función del tiempo para cinco muestras con concentraciones diferentes: (b) muestras con PLI: ($\lambda = 532$ nm, 25,8 mJ/p).

La evolución temporal de las señales PA, que se muestran en la figura 9, fueron detectadas por el sensor PZT de respuesta rápida de 254 KHz. Corresponden a la respuesta fotoacústica de los coloides producidos por la técnica PLAL y las muestras coloidales que fueron modificados por la posterior irradiación láser con energía de 25.8 mJ/p. Así mismo, se puede observar que la intensidad de la amplitud fotoacústica disminuye cuando los coloides son posteriormente irradiados.

Se puede observar que, las señales aumentan en amplitud gradualmente en relación con las diferentes concentraciones. Así puede se puede decir que la técnica PA es capaz de detectar los cambios mínimos en la variación de la concentración de las NpsAu en el coloide. Para mejorar la relación señal a ruido como menciona Barreiro et al. [14], debido a ruido exterior, acústico y eléctrico, se promedia la señal, nosotros promediamos sobre 16 pulsos del láser. Por otro lado, la señal PA, se puede visualizar como una curva de voltaje vs tiempo, medida a una escala temporal de 5 ns y a una escala de milivoltios sin necesidad de amplificar.

El análisis de la señal PA generada por Nps metálicas es complejo debido a la dependencia de las propiedades físicas, tanto de la Nps y los alrededores del ambiente.

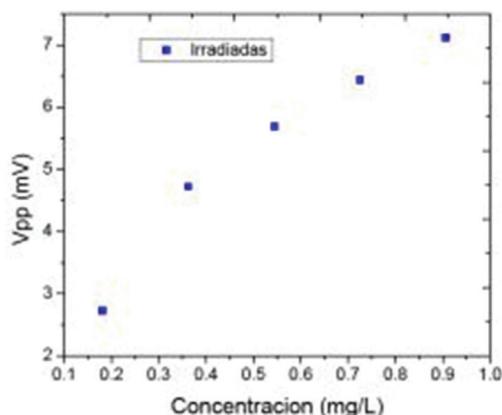


Figura 10. Voltaje pico-pico de la señal PA en función de la concentración de muestras con PLI.

En la figura 10, muestra voltaje pico-pico de la señal fotoacústica en función de la concentración, cuya relación es ascendente conforme se aumenta la concentración. Por lo tanto, se comprueba que a mayor concentración de NpsAu la señal PA se incrementa.

Uno de los objetivos de la presente tesis consistió en obtener la respuesta PA de los coloides con NpsAu; obtenidos por la técnica PLAL. Como se indicó nosotros obtuvimos las NpsAu en agua ultrapura, la máxima absorbancia vista a la longitud de onda obtenida fue alrededor de 521 nm y está relacionada con la PSR. Amendola y Meneghetti [3] reportan un máximo de plasmón para el oro a 520 nm, utilizando agua, nosotros obtuvimos el pico máximo de absorción alrededor de 521 nm, que es concordante con nuestro resultado y existe una relación directa y proporcional de la cantidad de NpsAu con el incremento del primer pico de la señal PA. Elsayed et al. [15] observó un cambio significativo en la distribución del tamaño de las NpsAu durante la variación de las condiciones de focalización que se centran en la interfaz agua-oro.

Caracterización por DLS

Este método tiene varias ventajas, no se requiere preparar la muestra, solo se requiere poca cantidad de coloide (ml), la duración de la prueba es corta de manera que las mediciones de rutina no son extensas.

A continuación, reportamos los resultados obtenidos por la técnica DLS:

- Resultado por espectroscopia de la luz dinámica LDS de los coloides (PLAL). Las NpsAu, presentan un diámetro promedio de 22 .6 nm.

- Resultado por espectroscopia de la luz dinámica LDS, de los coloides irradiados (PLI). Los NpsAu, presentan un diámetro promedio de 21.0 nm.

Conclusiones

Presentamos las conclusiones de nuestro trabajo, las cuales están dirigidas a las condiciones experimentales específicas que fueron utilizadas para la producción, posterior irradiación y caracterización de los coloides con nanopartículas de oro y plata producidas utilizando la técnica de ablación láser pulsada en agua, su caracterización por fotoacústica pulsada, espectroscopia UV-Visible y microscopia electrónica, lo que se concluye en lo siguiente: Para el caso de los coloides con nanopartículas de oro analizados según espectroscopia UV-Vis, se concluye que la absorbancia máxima es proporcional a la concentración de nanopartículas de oro en estado coloidal y según el análisis fotoacústico, se concluye que la amplitud de la señal fotoacústica correspondiente a los coloides con nanopartículas de oro está relacionada con la concentración evidenciando que a mayor concentración la amplitud fotoacústica es mayor.

En ese sentido, la técnica fotoacústica pulsada, es una técnica novedosa y relativamente nueva que permitiría caracterizar los coloides con nanopartículas de oro, capaz de detectar el cambio en la concentración de las nanopartículas de oro en estado coloidal. Sin embargo, existe poca información en la literatura acerca de la caracterización de coloides metálicos por fotoacústica, además el hecho de que el fundamento de la fotoacústica sea el estudio de los parámetros termoelásticos le confiere un carácter complementario con otras técnicas frecuentemente usadas para tal fin. La técnica de ablación láser pulsada en líquidos fue útil para obtener nanopartículas de oro en estado coloidal, esta técnica con los parámetros del láser controlados fue muy eficiente para producir nanopartículas de oro, obteniéndose nanopartículas limpias de subproductos químicos y en un tiempo de aproximadamente 10 minutos.

Referencias

- [1] G. Uribe y J. Rodríguez. "La nanociencia y la nanotecnología: Una revolución en curso, Perfiles latinoamericanos", *revista de la Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales*. Sede México, pp.161-186, 2007.
- [2] D. Kaiser et al. *National Nanotechnology Initiative Strategic Plan*. Printed in the United States of America, oct 2016.
- [3] V. Amendola y M. Meneghetti. "What controls the composition and the structure of nanomaterials generated by laser ablation in liquid solution?", *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. 15 n° 9, pp. 3027-3046, 2013.
- [4] R. Nikov et al. "Processing condition influence on the characteristics of gold nanoparticles produced by pulsed laser ablation in liquids", *Applied Surface Science*, vol. 27, n° 4, pp. 105-109, 2013.
- [5] M. Dell'Aglio. (2015). "Mechanisms and processes of pulsed laser ablation in liquids during nanoparticle production", *Applied Surface Science*. vol. 35, n° 2, pp. 55-59, 2015.
- [6] J. Alba. "Estudio de la Ablación Láser mediante la Fotoacústica Pulsada: Síntesis de Nanopartículas". Tesis de Maestría, Universidad de Guanajuato, México, 2013.
- [7] G. López. *Nanoestructuras metálicas; síntesis, caracterización y aplicaciones*. Editorial Reverte, Universidad Autónoma del Estado de México, 2013.
- [8] Y. Wang, E. Plummer y K. Kempa. "Foundations of plasmonics". *Advances in Physics*, vol. 60, n° 5, pp. 799-898, 2011.
- [9] A. Guerrero, R. Álvarez y L. Liz. "Nanoplasmónica basada en Química Coloidal", in *Anales de la Real Sociedad Española de Química*, vol. 107, n° 3, pp. 221-228, 2011.
- [10] T. Fernández. *Caracterización de nanopartículas magnéticas y de oro para posibles aplicaciones biomédicas en diagnóstico y terapia*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, 2014.
- [11] K. Hishan, A. Mohamed y R. Rania. "Effect of Experimental Parameters on the Fabrication of Gold Nanoparticles via Laser Ablation". *Optics and Photonics Journal*, Giza Egypt, pp. 273-84, 2012.

- [12] M. Takeshi et al. "Preparation and Shape-Modification of Silver Colloids by laser Ablation in Liquids: A Brief Review". *Science of Advanced Materials*, vol 4, pp. 391-400, 2012.
- [13] A. Pyatenko et al. "Mechanism of pulse laser interaction with colloidal nanoparticles". *Laser & Photonics Reviews*, 7(4), 596-604, 2013.
- [14] N. Barreiro et al. "Caracterización de la Espectroscopia Fotoacústica Pulsada del NO₂ en aire", in *Anales Afa*, vol. 20, 2008.
- [15] K. Elsayed et al. "Effect of focusing conditions and laser parameters on the fabrication of gold nanoparticles via laser ablation in liquid", *Optics and Laser Technology*, vol. 45, issue 1, pp. 495 – 50, 2013

Caracterización de bioinsumos producidos artesanalmente en Nicaragua

Characterización of artisanally bioinoculant produced in Nicaragua

Johana O'Connor-Mendoza¹, Leandro Páramo-Aguilera²,
Griselda Martínez-Laguna³, Laura Guillén-Rodríguez⁴

Fecha de recepción: 17 de enero de 2020
Fecha de aprobación: 28 de abril de 2020

O'Connor-Mendoza, J; Páramo-Aguilera, L;
Martínez-Laguna, G; Guillén-Rodríguez, L. Caracterización
de bioinsumos producidos artesanalmente en Nicaragua.
Tecnología en Marcha. Vol. 34-2. Abril-Junio 2021. Pág
109-121.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i2.4961>



- 1 Ing. Químico. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Química. FIQ. Nicaragua. Correo electrónico: johana.oconnor@fiq.uni.edu.ni
 <https://orcid.org/0000-0002-1875-4578>
- 2 PhD. Universidad Nacional de Ingeniería. Programa de Investigación, Estudios Nacionales y Servicios del Ambiente (PIENSA-UNI). Nicaragua. Autor para correspondencia. Correo electrónico: leandro.paramo@piensa.uni.edu.ni
 <https://orcid.org/0000-0002-3694-3698>. Autor para correspondencia.
- 3 Ing. Químico. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Química. FIQ. Avenida Universitaria frente a la UCA. Managua, Nicaragua. Correo electrónico: gris3095@hotmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-3455-4314>
- 4 Ing. Químico. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Química. FIQ. Nicaragua. Correo electrónico: avangel07@yahoo.es
 <https://orcid.org/0000-0003-0948-4331>

Palabras claves

Caracterización microbiológica; identificación molecular; tinción; biofertilizante; biocontrolador.

Resumen

Para la caracterización microbiológica y molecular se aislaron e identificaron microorganismos cultivables de 4 bioinsumos comerciales provenientes del occidente y norte de Nicaragua. Esto involucró la tipificación morfológica a través de: tinción Gram para bacterias y observación de esporas para hongos filamentosos. Se realizó la extracción y secuenciación del ADN (gen ADNr 16S – bacterias, región ITS1- ITS4 hongos filamentosos) para obtener los árboles filogenéticos. Se logró la identificación molecular de 28 de 30 microorganismos aislados (23 bacterias: 12 especies, 11 géneros; 5 hongos filamentosos: 4 especies, 1 género). Encontrándose en los Bioinsumos zona norte: muestra TS: 5 bacterias (*Bacillus pumilus*, *Bacillus thuringiensis*, 2 *Bacillus sp.* y *Stenotrophomonas sp.*) y 3 hongos filamentosos (*Monascus pupureus*, *Neosartorya glabra* y *Aspergillus flavus*- reportado como patógeno para cultivos); muestra LS: 6 bacterias (*Bacillus megaterium*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus sp.*, 2 *Stenotrophomonas sp.* y *Paenibacillus sp.*); muestra LL: 3 bacterias (*Bacillus Megaterium*, *Staphylococcus succinus* y *Bacillus sp.*) y 2 hongos filamentosos (*Byssochlamys nivea* – reportado como contaminante en fruta procesada y otro no identificado). Zona de occidente, muestra DCL: 9 bacterias (2 *Lysinibacillus macroides*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus flexus*, *Bacillus cereus* – patógeno para el ser humano, *Agrobacterium tumefaciens*, 2 *Bacillus sp.* y una *Stenotrophomonas sp.*) y 1 hongo levaduriforme no identificado molecularmente. Lo anterior muestra gran diversidad microbiana y la presencia de patógenos en los bioinsumos que son perjudiciales para la planta y el ser humano.

Keywords

Microbiological characterization; molecular characterization; staining; biocontrol; biofertilizer.

Abstract

To develop the microbiological and molecular characterization, cultivable microorganisms from four commercial biofertilizers from western and northern Nicaragua were isolated and identified. This involved morphological identification through: Gram staining for bacteria and observation of spores for filamentous fungi. In order to obtain the phylogenetic trees, DNA extraction and sequencing was performed (16s rDNA gene for bacteria and ITS1 region for fungi). The molecular identification of 28 out of 30 isolated microorganisms was achieved (23 bacteria: 12 species, 11 genus, 5 filamentous; fungi: 4 species and 1 genus). Found in the northern zone inoculant: TS sample: 5 bacteria (*Bacillus pumilus*, *Bacillus thuringiensis*, 2 *Bacillus sp.* and *Stenotrophomonas sp.*) and 3 filamentous fungi (*Monascus pupureus*, *Neosartorya glabra* and *Aspergillus flavus*- reported as pathogen for crops). LS sample: 6 bacteria (*Bacillus megaterium*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus sp.*, 2 *Stenotrophomonas sp.*, and *Paenibacillus sp.*). LL sample: 3 bacteria (*Bacillus Megaterium*, *Staphylococcus succinus* and *Bacillus sp.*) and 2 filamentous fungi (*Byssochlamys nivea* - reported as contaminants in processed fruit and another that was not sequenced). Western zone, DCL sample: 9 bacteria (2 *Lysinibacillus macroides*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus flexus*, *Bacillus cereus* - pathogenic for humans, *Agrobacterium tumefaciens*,

2 *Bacillus sp.* and 1 *Stenotrophomonas sp.*) and 1 yeast fungus, that was not sequenced. The above shows great microbial diversity and the presence of pathogens in biofertilizer that are harmful to the plant and the human beings.

Introducción

La excesiva dependencia de los fertilizantes químicos para producir más cultivos inevitablemente daña la ecología ambiental y la salud humana con gran severidad. A nivel mundial en general y en Nicaragua en particular, país predominantemente agrícola, para contrarrestar el efecto nocivo de estas prácticas, existe una nueva corriente que promueve el consumo y producción orgánica [1]. En el país, existen serias limitaciones en la oferta y desarrollo de bienes y servicios orientados a la producción orgánica, uno de los casos particulares son los bioinsumos (biofertilizantes y biocontroladores de plagas) producidos a nivel local, la mayoría de estos productos poseen un bajo nivel tecnológico, por lo que se desconoce las alternativas de biocontrol (parasitoides, presencia del tipo de microorganismos, entre otros), no se tiene estudios del espectro de funcionamiento de los mismos. Sumado a esto, las instituciones públicas que deberían regular este tipo de productos, desconocen el tema, por lo que estos bioinsumos no cuentan con certificación, ni están registrados según lo indican las regulaciones para la certificación orgánica [2].

La caracterización de microorganismos y su posterior selección por su capacidad de hacer disponibles los nutrientes y promover su crecimiento, pueden contribuir a un posterior desarrollo de biofertilizantes. Con miras a lograr dicho objetivo, este estudio se planteó como un paso inicial la identificación molecular de microorganismos presentes en bioinsumos producidos artesanalmente en Nicaragua.

Materiales y métodos

En una primera etapa del proyecto de producción de bioinoculantes dirigida específicamente a la búsqueda de *Bacillus subtilis*, se aisló la fracción cultivable e identificó algunos microorganismos de interés (7 microorganismos) presentes en bioinsumos artesanales procedentes de las zonas seleccionadas (I y II), para la producción de un bioinsecticida a base de *B.subtilis* [3]. El presente trabajo muestra la completa identificación de toda fracción cultivable aislada y la caracterización de los microorganismos aislados en los bioinoculantes comerciales.

Aislamiento de microorganismos de bioinsumos artesanales

Se recolectaron 4 bioinsumos comerciales en presentaciones líquidas y sólidas [3], producidos en dos zonas del país (I y II), en donde la utilización de estos productos ha tenido un tremendo auge y los productos contaban con una autorización oficial del organismo competente. Estos se transportaron al laboratorio de microbiología de las aguas del Programa de Investigación Estudios Nacionales y Servicios Ambientales (PIENSA) de la Universidad Nacional de Ingeniería, ubicado en el Recinto Universitario Simón Bolívar, en la Avenida Universitaria, Managua, Nicaragua. Localizada geográficamente en las coordenadas UTM 12.1435887-86.2675189. El aislamiento de microorganismos se realizó en medios de cultivo sólidos (Agar Papa Dextrosa (PDA), Agar Plate Count (PCA), Agar Nutritivo (AN)) a partir de muestras individuales, para esto se inoculó en superficie, por triplicado. Posteriormente se seleccionaron los diferentes tipos de colonias obtenidas y se sembraron por estrías para la obtención de cultivos puros. Para los bioinsumos sólidos se prepararon filtrados, por medio de la suspensión aséptica de 1 g de muestra de bioinsumos en 5 mL de agua destilada estéril en un tubo de ensayo; en cambio para los bioinsumos líquidos solamente se tomó una muestra de 5 mL, la cual fue colocada en un tubo de ensayo. Todos los tubos con las muestras se agitaron en vortex por 20 s; luego se tomó

0.1 mL con una micropipeta y se depositó en gotas sobre el medio de cultivo en la placa Petri, el inóculo se distribuyó sobre toda la superficie del medio usando una espátula de Digralesky previamente esterilizada, finalmente todas las placas se incubaron a 35°C por 24 horas para bacterias y de 7 a 14 días para hongos [4].

Pruebas morfológicas a los microorganismos seleccionados

Se realizaron a través de observaciones al microscopio de luz OLYMPUS CHT, para las bacterias se efectuaron pruebas de tinción de Gram a las 24 horas de incubación con el objetivo de inmersión 100x, la observación de esporas para hongos filamentosos con cinta adhesiva transparente utilizando un objetivo de 40x. Los microorganismos se conservaron usando el método de transferencia periódica, que consiste en trasladar el microorganismo a un medio de cultivo fresco y nutritivo a intervalos que aseguren la viabilidad del mismo [5]. La transferencia se realizó en medio LB para bacterias y PDA para hongos filamentosos [6, 7].

Identificación molecular de los microorganismos seleccionados

Para el caso de las bacterias se amplificó la subunidad pequeña (16S) del ADNr con los cebadores pA (5' AGA GTT TGA TCC TGG CTCAG 3') y pc5B (5' TAC CTT GTT ACG ACT T 3) [8]. La identificación taxonómica de los aislamientos de hongos se realizó con base en la amplificación de las regiones ITS1 (5 TCC GTA GGT GAA CCT GCG G 3)-ITS4 (5' TCC TCCGCT TAT TGA TAT GC 3') (Internal Transcribed Space) [9], estos genes son una alternativa para buscar la información filogenética y taxonómica de microorganismos. La comparación de las secuencias del gen ADNr 16S permite establecer relaciones filogenéticas entre organismos procariontes, de forma similar la región ITS permite hacer lo mismo en eucariotas [10].

Los electroferogramas recibidos fueron corregidos visualmente usando el programa Bioedit v7.0.9 [11]. Para la comparación de las secuencias, se obtuvieron de la base de datos del GenBank del National Center for Biotechnology Information (NCBI) secuencias de las regiones estudiadas de hongos y bacterias relacionadas taxonómicamente con los microorganismos, utilizando la herramienta BLAST (Basic Local Alignment Search Tool) para comparar secuencias altamente similares, de cada secuencia parcial del gen 16S para bacterias e ITS para hongos [12]. Para la identificación final, se realizó un alineamiento múltiple con las cinco secuencias elegidas para cada secuencia en estudio, utilizando la aplicación Clustal W Multiple alignment versión 1.4 incluida en el menú Accesory Application del programa Bioedit v7.0.9 y se utilizaron los parámetros por defecto [10]. Se utilizó el programa MEGA 7.0.14 para la construcción de los árboles filogenéticos, usando el método Neighbor-Joining Tree, evaluando la confiabilidad haciendo bootstrapping de 1000 repeticiones, teniendo en cuenta que cada rama se deberá repetir como mínimo en el 50% de las veces [9, 12].

Resultados y discusión

Aislamiento de microorganismos de bioinsumos artesanales

De los trabajos de aislamiento, se logró obtener 30 aislados diferentes de colonias de microorganismos en las muestras de bioinsumos, figura 1. Esta publicación aborda por primera vez en nuestro país el contenido microbiano completo, que fue posible aislar e identificar a partir de muestras de bioinsumos que están siendo actualmente comercializados y producidos a nivel artesanal.

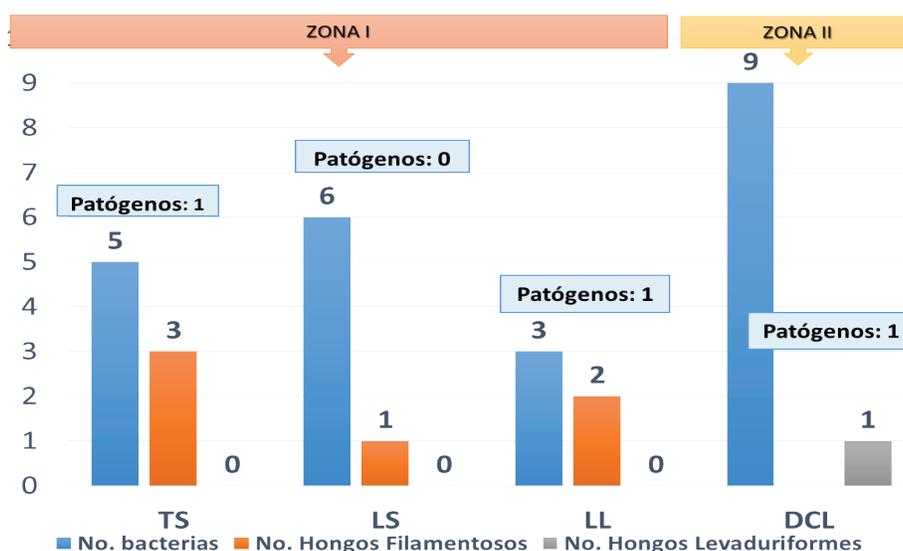


Figura 1. Distribución de bacterias y hongos aislados de Bioinsumos artesanales, por zona de origen (TS: Tisey Sólido; LS: Licoroy Sólido; LL: Licoroy Líquido; DCL: Del Campo Líquido).

Herrmann *et al.*, [13] caracterizaron el contenido microbiano de 65 biofertilizantes comerciales fabricados en los Estados Unidos, el Reino Unido, Australia, Sudáfrica, Tailandia, Kenia y Argentina. Los resultados mostraron que la mayoría (alrededor del 64%) contenía una o varias cepas de contaminantes y solo el 37% de los productos podían considerarse “puros”. El 40% de los productos probados no contenía ninguna de las cepas declaradas, sino solo contaminantes. Estos resultados se relacionan con los obtenidos en la presente investigación, donde se obtuvo que el 75% de los bioinsumos analizados contienen al menos una cepa contaminante y solo un 25% están libres de patógenos (figura 1).

El presente trabajo concuerda con Cuervo [4], en la necesidad de investigaciones que desarrollen un conocimiento paralelo a la preservación de los ecosistemas con el uso de biofertilizantes, con el fin de generar productos comerciales, los cuales también cuenten con pruebas de eficacia y estabilidad utilizadas con el objetivo de reducir costos, intensificar las interacciones biológicas y benéficas de los procesos naturales, proteger la salud y el ambiente. El presente trabajo, va encaminado en tal sentido.

Pruebas morfológicas a los aislados bacterianos

Aun cuando la morfología celular dice poco sobre las relaciones filogenéticas, sigue siendo útil para la identificación bacteriana. Por ejemplo: la presencia de endosporas y su localización resulta de mucha utilidad en la identificación de bacilos esporulados. Es posible sacar conclusiones en relación con la morfología de una bacteria, examinando una lámina que fue sometida a un proceso de tinción diferencial [14]. Algunos de los resultados obtenidos mediante aplicación Gram a cultivos bacterianos, se muestran en la figura 2.

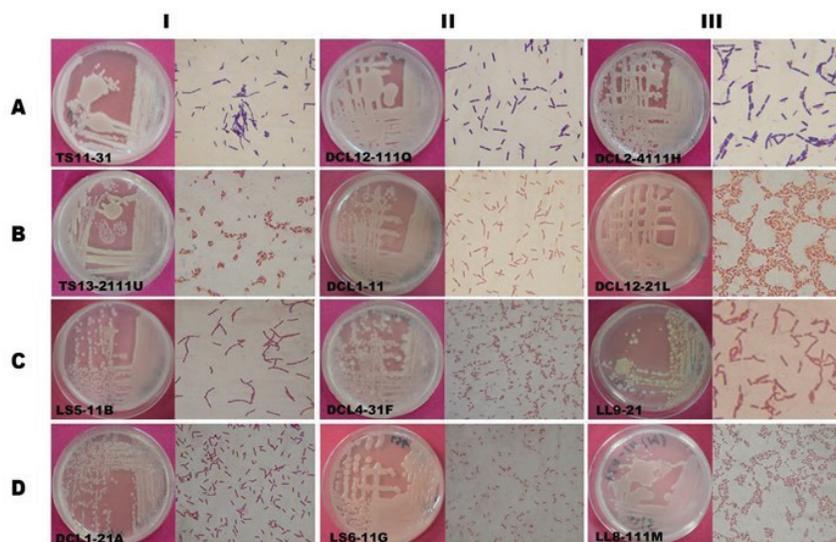


Figura 2. Morfología en placa y tinción de Gram de aislados bacterianos y su procedencia. Muestra 1: AI, BI; Muestra 2: CI, DII; Muestra 3: CIII, DIII, Muestra 4: AII, AIII, BII, BIII, CII y DI.

De la aplicación de las pruebas de tinción diferencial Gram a los cultivos bacterianos se obtuvieron los siguientes resultados: 22 bacterias de forma bacilar (15 Gram positivas y 7 Gram negativas) y 1 de forma coccal Gram positiva. En la figura 2, se detallan 12 bacterias que se lograron identificar hasta nivel de especie como una muestra representativa del material aislado. Se puede observar que 11 bacterias se clasifican como Gram positivas, 10 poseen forma bacilar (DCL4-31F, TS13-2111U, LS6-11G, LS5-11B, DCL1-21A, TS11-31, LL9-21, DCL1-11, DCL2-4111H, DCL12-111Q) y un coco (LL8-111M); también se observó presencia de un bacilo Gram negativo (DCL12-21L). Los aislados bacterianos obtenidos se conservaron en medio de cultivo fresco LB en placas Petri a 10°C, con siembras periódicas mensuales para su posterior identificación vía molecular.

Pruebas morfológicas a los aislados de hongos filamentosos

Los hongos representan la mayor diversidad eucariótica sobre la tierra y ellos están entre los principales degradadores en los ecosistemas. Se ha estimado, conservadoramente, que existen alrededor de 1.5 millones de especies de hongos [15]. Muchas especies de hongos son patógenos importantes para plantas y humanos. Los resultados de la caracterización morfológica de los aislados puros de una muestra representativa (No incluye todo lo aislado) de hongos filamentosos se reflejan en el cuadro 1.

Cuadro 1. Descripción de los resultados de una muestra representativa de la caracterización macro y microscópica de los hongos filamentosos aislados de muestras de bioinsumos artesanales.

Código	Color anverso de placa con PDA	Apariencia micelio	Forma de la espora
TS1-2111	Blanco con centros verdosos y zonas marrones	Algodonoso	Esférica
TS111-2111	Blanco	Aterciopelada	Esférica
<i>TS111-1212</i>	Verde	Pulvorolenta	Esférica
<i>LLVII</i>	Blanco	Algodonosa	Esférica

Fuente: [3]

En la figura 3, se observa una muestra representativa hongos filamentosos obtenidos por medio de la caracterización macroscópica describiendo el color y apariencia de las conidias; y de la identificación de esporas a través de las observaciones al microscopio de luz; para su posterior comparación con las referencias utilizadas [16].

Zeballos [17], aisló y purificó cepas provenientes de cuatro biofertilizantes diferentes, a partir de la purificación se obtuvo siete cepas de microorganismos: cuatro cepas de bacterias, dos de levaduras y una de hongo filamentosos. La baja abundancia y diversidad de microorganismos posiblemente se dio por la presencia de algunos ingredientes de los biofertilizantes que influyen en el medio de crecimiento. Esto difiere con los resultados de este estudio, ya que la variedad microbiológica es muy rica, teniendo en cuenta que se aislaron un total de 6 hongos: 5 filamentosos y 1 levaduriforme. Esto puede deberse al tipo de sustrato que se ha utilizado en la preparación.

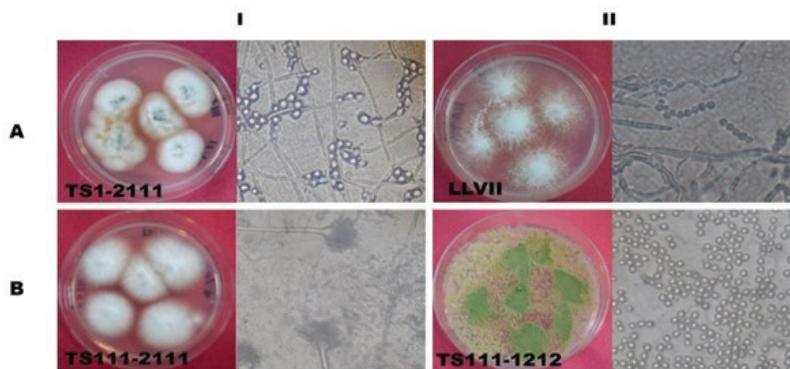


Figura 3. Morfología en placa y observación de esporas de algunos hongos filamentosos aislados de muestras de bioinsumos. AI, BI y BII: Muestra 1; AII: Muestra 3.

Identificación molecular de bacterias

El gen ribosomal 16S es frecuentemente empleado para estudios filogenéticos debido a que es una secuencia altamente conservada entre las diferentes especies de bacterias; el gen se encuentra ubicado en la subunidad pequeña del ribosoma (30S), asociado a esto, el gen ribosomal 16S es una región híper variable que prevé especificidad de especie, lo cual resulta muy útil para la identificación de especies bacterianas [12]. Los resultados obtenidos con las secuencias analizadas fueron utilizados para elaborar el árbol filogenético que se presenta en la figura 4.

De los 23 aislados de bacterias encontrados en los Bioinsumos, 12 se lograron identificar a nivel de especie mediante el análisis del árbol filogenético de la figura 4 y cuadro 2 como: TSII-31 (A1) como *Bacillus thuringiensis*, TS13-2111U(A3) como *Bacillus Pumilus*, LS5-11 (B) como *Bacillus megaterium*, DCL1-21(D1) como *Lysinibacillus macroides*, DCL12-111(D5) como *Bacillus cereus*, DCL1-11 (D6) como *Lysinibacillus macroides*, DCL4-31 (F) y LS6-11 (G) como *Bacillus subtilis*, DCL2-411 (H) como *Bacillus flexus*, DCL12-21 (L) como *Agrobacterium tumefaciens*, LL9-21(L1) como *Bacillus megaterium*, LL8-111 (M) como *Staphylococcus succinus*; 11 a nivel de género: TS13-1111J (A2), DCL3-4 (D4), LS5-21 (S1), LS6-211P(S3) como *Stenotrophomonas sp.*; TS13-3C (A4), DCL2-11(D2), DCL3-3 (D3), LL8-221 (L2), LS5-1K (S2), TS10-111(S5) como *Bacillus sp.* y LS7-2111(S4) como *Paenibacillus sp.* Cada especie bacteriana (cepa) confirma su identidad en su mayoría en 100% con las secuencias contenidas en el Genbank. De las 23 bacterias identificadas molecularmente, es importante destacar que 14 pertenecen al género

Bacillus. A diferencia de lo obtenido por [4], el cual solo logró aislar e identificar únicamente tres especies microbianas (*Bacillus subtilis* en medio sólido, *Bacillus firmus* y *Bacillus sphaericus* en medio líquido) partiendo de dos presentaciones diferentes de biofertilizantes; el presente trabajo logró aislar e identificar un lote mucho mayor de bacterias (23), llegándose a identificar 12 a nivel de especie.

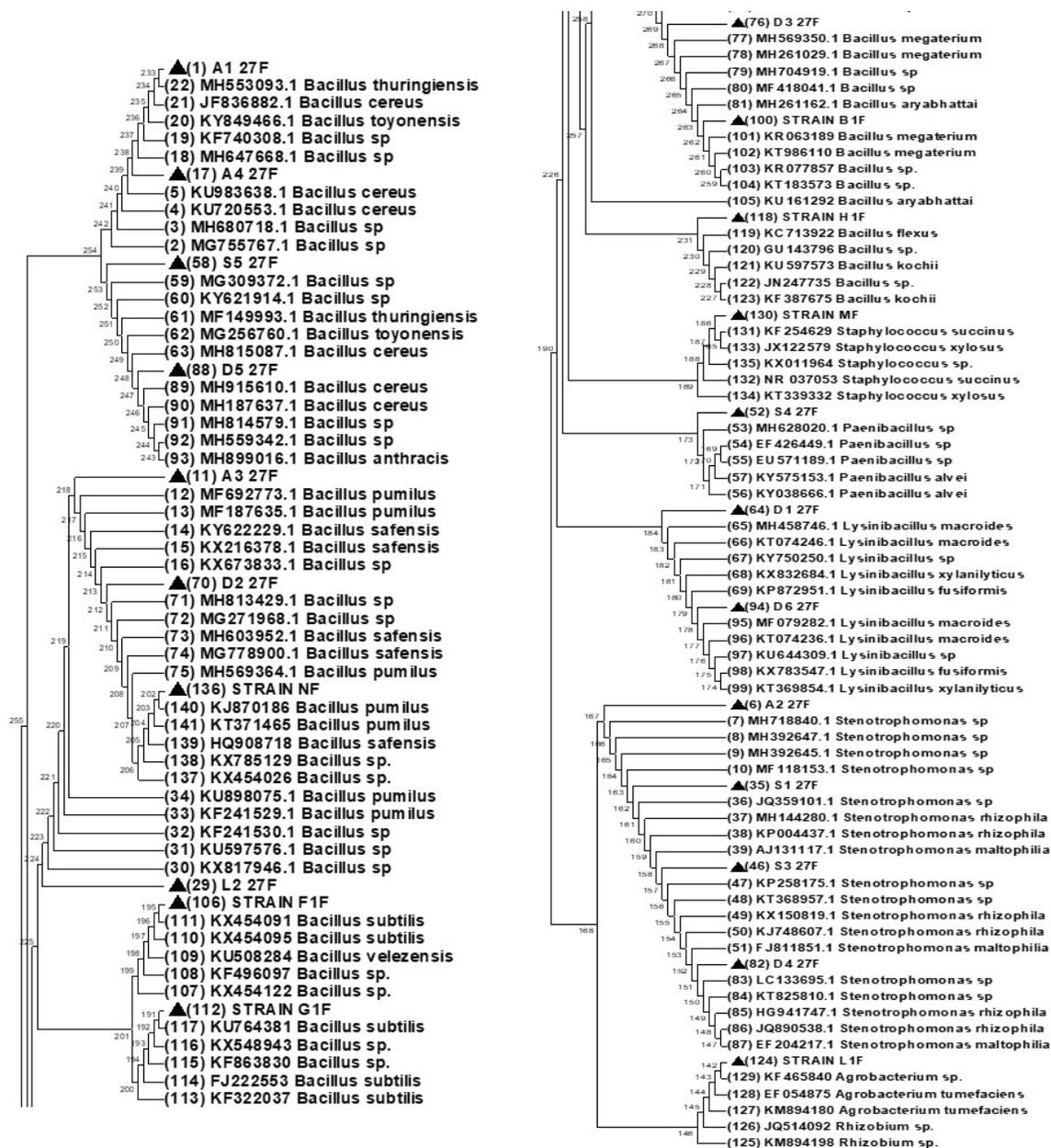


Figura 4. Se muestra el árbol filogenético de aislados bacterianos utilizando el método Neighbor-Joining con un Bootstrap de 1000 réplicas. El árbol fue realizado con el programa MEGA 7.0.14, el código de acceso al GenBank se especifica al inicio del nombre del microorganismo.

Cuadro 2. Se muestran los resultados de la identificación final de bacterias hasta el nivel de especie, mediante el análisis filogenético utilizando el árbol de la figura 4.

Código de secuencia	Código de microorganismo	Vecino cercano (Número de acceso)	Máxima identidad (%)	Identidad final
A1	TSII-31	<i>Bacillus thuringiensis</i> (MH553093.1)	99	<i>Bacillus thuringiensis</i>
A3	TS13-2111U	<i>Bacillus Pumilus</i> (MF692773.1)	99	<i>Bacillus Pumilus</i>
B	LS5-11	<i>Bacillus megaterium</i> (KR063189)	99	<i>Bacillus Megaterium</i>
D1	DCL1-21(A)	<i>Lysinibacillus macroides</i> (MH458746.1)	100	<i>Lysinibacillus macrolides</i>
D5	DCL12-111(Q)	<i>Bacillus cereus</i> (MH915610.1)	100	<i>Bacillus cereus</i>
D6	DCL1-11	<i>Lysinibacillus macroides</i> (MF079282.1)	100	<i>Lysinibacillus macrolides</i>
F*	DCL4-31	<i>Bacillus subtilis</i> (KX454091)	99	<i>Bacillus subtilis</i>
G*	LS6-11	<i>Bacillus subtilis</i> (KU764381)	99	<i>Bacillus subtilis</i>
H*	DCL2-4111	<i>Bacillus flexus</i> (KC713922)	100	<i>Bacillus flexus</i>
L*	DCL12-21	<i>Agrobacterium tumefaciens</i> (KM894180)	99	<i>Agrobacterium tumefaciens</i>
L1	LL9-21	<i>Bacillus megaterium</i> (MH910311.1)	100	<i>Bacillus Megaterium</i>
M*	LL8-111	<i>Staphylococcus succinus</i> (KF254629)	100	<i>Staphylococcus succinus</i>

Nota: * microorganismos identificados en una primera etapa por [3]. En el cuadro se muestra el código de la secuencia, el código de laboratorio del microorganismo, identidad máxima con el vecino cercano y la identidad final de la bacteria.

Con el propósito de entender, la función desempeñada (Datos no mostrados) por los diferentes microorganismos que fueron aislados e identificados en el contexto de los bioinsumos en estudio, se analizó y se concluyó que empleando estos bioinsumos artesanales, en los cuales no se tiene control de los microorganismos que se producen y están presentes en el producto final; se estarían aplicando inóculos a los cultivos que pueden ser beneficiosos para algunos procesos de promoción del crecimiento vegetal (*Bacillus Pumilus*, *Bacillus thuringiensis* y *Bacillus Subtilis*), a la inhibición y resistencia de patógenos (*Bacillus Pumilus*, *Bacillus thuringiensis*, *Bacillus cereus*, *Agrobacterium tumefaciens* y *Bacillus Subtilis*). No obstante, estas propiedades benéficas no se presentan en todos los bioinsumos estudiados por igual y no es posible preservar esta propiedad benéfica en el tiempo y en cada lote de producción, debido a que el proceso de selección del material de partida es siempre aleatorio (suelo de bosques con materia orgánica en proceso de degradación). Adicionando además estiércol, melaza y suero láctico, con sus propias cargas microbianas [18].

Algunos de los bioinsumos estudiados, presentan bacterias patógenas al ser humano como *Bacillus cereus* y muchos otros pudieran estar desarrollando actividades que no son aplicables a todo tipo de suelos, ni a todo tipo de cultivos, por ejemplo: *Agrobacterium tumefaciens* y *Staphylococcus succinus*. Todos estos inconvenientes, se pretenden superar, con la selección de bacterias aisladas de estos bioinsumos, elegidas por la función que realicen en los cultivos, por su no patogenicidad para el ser humano, por no mostrar antagonismo e inhibición entre las mismas y por garantizar un número de unidades formadoras de colonia estable para el cultivo final en el bioproceso desarrollado para ello.

Identificación molecular de hongos

Los métodos moleculares como PCR agilizan la identificación de hongos analizando regiones específicas dentro de los genes. Según [19], las secuencias de espacios transcritos internos (ITS) son de las más utilizadas en la identificación, como código de barras estándar para hongos. Para la identificación final de los hongos y corroborar los resultados morfológicos, se identificaron molecularmente a través de la secuenciación de la región ITS1-ITS4 (Internal Transcribed Space) del ADNr. De los resultados del análisis de las secuencias se obtuvo el siguiente árbol filogenético (figura 5). De los 6 hongos aislados de los bioinsumos artesanales en estudio, 4 de ellos se lograron identificar a nivel de especie: TSI-2III (B1) como *Monascus purpureus*, TSIII-2III (B3) como *Neosartorya glabra*, LLVII (B5) como *Byssochlamys nivea*, TSIII-1212 (B6) como *Aspergillus flavus* y 1 a nivel de género: TSII-2II (B3) como *Neosartorya sp.*

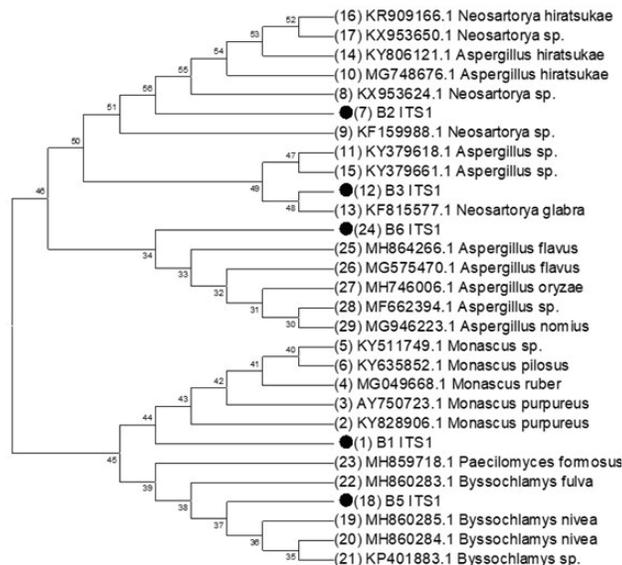


Figura 5. Árbol filogenético de hongos aislados de bioinsumos utilizando el método Neighbor-Joining con un Bootstrap de 1000 réplicas. El árbol fue realizado con el programa MEGA 7.0.14, el código de acceso al Gen Bank se especifica al inicio del nombre del microorganismo.

Estos resultados se resumen en el cuadro 3. Finalmente, uno de los hongos no se logró identificar debido a resultados no satisfactorios durante el proceso de secuenciación.

Cuadro 3. Se muestran los resultados de la identificación final de hongos aislados de bioinsumos. El cuadro resume el código de la secuencia y el código de laboratorio del microorganismo, identidad máxima con el vecino más cercano y la identidad final del hongo.

Código de secuencia	Código de laboratorio del microorganismo	Vecino cercano (Número de acceso)	Máxima identidad (%)	Identidad final
B1	TSI-2III	<i>Monascus purpureus</i> (KY828906.1)	99	<i>Monascus purpureus</i>
B2	TSII-2II	<i>Neosartorya</i> sp. (KX953624.1)	100	<i>Neosartorya</i> sp.
B3	TSIII-2III	<i>Neosartorya glabra</i> (KF815577.1)	100	<i>Neosartorya glabra</i>
B5	LLVII	<i>Byssoschlamys nivea</i> (MH860285.1)	100	<i>Byssoschlamys nivea</i>
B6	TSIII-1212	<i>Aspergillus flavus</i> (MH864266.1)	100	<i>Aspergillus flavus</i>

El género *Neosartorya* (Familia *Trichocomaceae*) son hongos filamentosos característicos del suelo y poseen diversas actividades y/o aplicaciones biotecnológicas (Datos no mostrados). El análisis de los resultados de la identificación de los hongos aislados de los bioinsumos (cuadro 3), nos muestra que algunos de los aislados identificados encuentran utilidad en la industria farmacéutica (*Monascus purpureus* y *Neosartorya glabra* [20], en procesos de biodegradación y en la agricultura (*Neosartorya* sp., *Byssoschlamys nivea* y *Neosartorya glabra* [19,20], algunos podrían resultar indeseables como (*Byssoschlamys nivea*) y hasta algunos pudieran resultar patógenos para los seres humanos y los animales como *Aspergillus flavus* [21]. Lo anterior aunado al análisis hecho para las bacterias aisladas e identificadas, nos da una idea de cómo algunos de estos bioinsumos podrían estar afectando los cultivos mediante la introducción de hongos y bacterias que no son adecuados para todo tipo de cultivos y suelos, además de que estarían afectando la salud humana por esporas y aflatoxinas que producen diferentes enfermedades.

Un gran número de biofertilizantes comerciales están disponibles en todo el mundo; sin embargo, la calidad y la eficacia de muchos de ellos no están probadas ni aprobadas. En ausencia de biofertilizantes eficaces de buena calidad y calidad constante, no es probable que disminuya la dependencia del uso de fertilizantes minerales a corto plazo. Por lo tanto, la disponibilidad de biofertilizantes de alta calidad debe ser una prioridad, especialmente en países donde la producción agrícola juega un papel clave en la economía y la seguridad alimentaria.

Conclusiones

La realización de este trabajo permitió obtener aislados de la microbiota cultivable presente en las muestras de bioinsumos analizadas, obteniéndose 30 aislados diferentes de colonias de microorganismos. Entre los aislados se obtuvo 23 bacterias y 7 hongos (6 filamentosos y 1 levaduriforme). De los aislados antes mencionados, se logró identificar el 93% de ellos. Identificándose de los aislados bacterianos (*Bacillus thuringiensis*, *Bacillus Megaterium* (2), *Bacillus cereus*, *Lysinibacillus macroides*, *Bacillus subtilis* (2), *Bacillus flexus*, *Bacillus pumilus*, *Bacillus cereus*, *Agrobacterium tumefaciens*, y *Staphylococcus succinus*). En cuanto a los hongos filamentosos aislados, se lograron identificar como: *Monascus purpureus*, *Neosartorya glabra*, *Byssoschlamys nivea*, *Aspergillus flavus*, y *Neosartorya* sp.

El análisis de las aplicaciones de los aislados identificados, permitió determinar que el 75% de los bioinsumos analizados contienen al menos una cepa contaminante y solo un 25% contienen cepas no patógenas. El empleo de los bioinsumos estudiados podría ser beneficioso para algunos procesos de promoción del crecimiento vegetal mediante *Bacillus Pumilus*, *Bacillus thuringiensis* y *Bacillus Subtilis*, a la inhibición y resistencia de patógenos mediante *Bacillus Pumilus*, *Bacillus thuringiensis*, *Bacillus cereus*, *Agrobacterium tumefaciens* y *Bacillus Subtilis*. No obstante, estas propiedades benéficas no se presentan en todos los bioinsumos estudiados por igual y no es posible preservar esta propiedad benéfica en el tiempo y en cada lote de producción. Finalmente, algunos de estos bioinsumos presentan bacterias patógenas al ser humano como *Bacillus cereus* y muchos otros podrían estar desarrollando actividades que no son aplicables a todo tipo de suelos, ni a todo tipo de cultivos, por ejemplo: *Agrobacterium tumefaciens* y *Staphylococcus succinus*.

Agradecimientos

Los autores desean transmitir sus mayores muestras de gratitud a la dirección del programa PIENSA de la Universidad Nacional de Ingeniería, por facilitar las instalaciones de laboratorio para el desarrollo del presente trabajo y brindarnos todo el apoyo de sus técnicos para hacer realidad el presente trabajo. Al mismo tiempo transmitimos nuestro agradecimiento a la Rectoría de la Universidad Nacional de Ingeniería y al Consejo Nacional de Universidades, por el apoyo financiero brindado para la realización de esta investigación. A todos ellos, nuestra gratitud.

Referencias

- [1] Mahanty, T., Bhattacharjee, S., Goswami, M. (2017). *Biofertilizers: a potential approach for sustainable agriculture development*. Environ Sci Pollut Res 24: 3315. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8104-0>.
- [2] Kuhl, R. (2010). *Caracterización de tecnologías y servicios necesarios para cerrar puntos críticos y brechas tecnológicas*. Fundación para el Desarrollo Tecnológico Agropecuario y Forestal de Nicaragua (FUNICA).
- [3] Méndez-Úbeda, J., M., Flores-Hernández, M., S y Páramo-Aguilera, L., A. (2017). *Aislamiento e identificación de Bacillus subtilis y evaluación del antagonismo in vitro frente a hongos Fito patógenos*. Rev. Cient. NEXO.30(2):96-110. ISSN19959516. <http://dx.doi.org/10.5377/nexo.v30i2.5530>. <http://revistas.uni.edu.ni/index.php/Nexo>.
- [4] Cuervo, J. (2010). *Aislamiento y caracterización de Bacillus spp como fijadores biológicos de nitrógeno y solubilizadores de fosfatos en dos muestras de biofertilizantes comerciales*. Trabajo de Grado para optar al título de Microbiólogo Agrícola y Veterinario, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- [5] Hernández, D., & Loaiza, A. (2014). *Selección de un método para la conservación y preservación de actinomicetos aislados del suelo del jardín botánico de la Universidad Tecnológica de Pereira* (Trabajo de Grado). Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira.
- [6] Lennox, E.S. (1955). *Transduction of Linked Genetic Characters of the Host by Bacteriophage P1*. Virology. Vol.1, N°2, pp.190-206. DOI: 10.1016/0042-6822(55)90016-7. ISSN: 0042-6822.
- [7] Atlas, R.M. (1993). *Handbook of Microbiological Media*, Parks L (ED.) CRC Press, INC.
- [8] Kuske, C., R., Bams, S., M., and Busch, J., D. (1997). *Diverse uncultivated bacterial groups from soils of the arid Southwestern United States that are present in many geographic regions*. Appl Environ Microbiology. 63(9):3614-3621.
- [9] Álvarez, C., Osorio, N., & Montoya, M. (2013). *Identificación molecular de microorganismos asociados a la rizosfera de plantas de vainilla en Colombia*. Acta Biológica Colombiana, 293-305.
- [10] Rodríguez, C. (2013). *Evaluación de microorganismos promotores de crecimiento vegetal en Tomate (Solanum lycopersicum) variedad Santa Clara, aislados de residuos Ligno Celulósicos de Higuera (Ricinus communis)*. Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de: Especialista en Microbiología Industrial, Universidad Católica de Manizales, Colombia.
- [11] Altschul, S.F., Gish, W., Miller, W., Myers, E.W and Lipman, D.J. (1990). Basic Local Alignment Search Tool. J. Mol. Biol. 215: 403-410

- [12] Castillo-Reyes, F., Hernández-Castillo, F., Gallegos-Morales, G., Flores-Olivas, A., Rodríguez-Herrera, R., & Aguilar, C. (2015). *Efectividad in vitro de Bacillus y polifenoles de plantas nativas de México sobre Rhizoctonia solani*. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 549-562.
- [13] Herrmann, L., Atieno, M., Bräu, L., Lesueur, D. (2015) *Microbial Quality of Commercial Inoculants to Increase BNF and Nutrient Use Efficiency*. Biological Nitrogen Fixation. DOI: 10.1002/9781119053095.ch101
- [14] López-Jacomé, L., E., Hernández-Durán, M., H., Colín-Castro, C., A., Ortega-Peña, S., Cerón-González, G., y Franco-Cendejas, R. (2014). *Las tinciones básicas en el laboratorio de microbiología*. Investigación es Discapacidad. Vol. 3. Um, 1. pp 10-18. Disponible en: <http://www.medigraphic.org.mx>.
- [15] Hawksworth, D., L. (2001). *The magnitude of fungal diversity: the 1.5 million species estimate revisited*. Mycological Research 105: 1422-1432.
- [16] Arias, E., Piñeros, P. (2008). *Aislamiento e identificación de hongos filamentosos de muestras de suelo de los páramos de Guasca y Cruz Verde*. Trabajo de Grado para optar al título de Microbiólogas Industriales, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.
- [17] Zeballos, H., M., F., (2017). *Caracterización de microorganismos de montaña (MM) en biofertilizantes artesanales*. Tesis. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Honduras.
- [18] Ito, S. (2006). *Caracterización y evaluación de los factores que determinan la calidad nutricional e inocuidad en la producción de fertilizantes orgánicos fermentados*. Tesis para optar a Magister Scientiae en Agricultura Ecológica. CATIE. Turrialba, Costa Rica.
- [19] Fernández-Ortuño, D., Loza-Reyes, E. A., & Fraaije, B. (2010). *The CYP51C gene, a reliable marker to resolve interspecific phylogenetic relationships within the Fusarium species complex and a novel target for species-specific PCR*. International Journal of Food Microbiology, (144), 301-309.
- [20] Pinheiro, V., Desagiacomo, C., Michelin, M., Maller, A., Monteiro, L., Jorge, J., & Plizeli, M. (2017). *Neosartorya glabra polygalacturonase produced from fruit peels as inducers has the potential for application in passion fruit and apple juices*. Brazilian Journal of Food Technology, 20, e2016163. doi:10.1590/1981-6723.16316.
- [21] Amaike, S., & Keller, N. (2011). *Aspergillus flavus*. The Annual Review of Phytopathology, 49, 108-133. doi: 10.1146/annurev-phyto-072910-095221.

Evaluación de los riesgos químicos por inhalación de las sustancias utilizadas en una industria gráfica

Evaluation of chemical risks by inhalation of substances used in a graphic industry

Wendy Villalobos-González¹, José Pablo Sibaja-Brenes²,
José Carlos Mora-Barrantes³, Benjamín Álvarez-Garay⁴

Fecha de recepción: 30 de enero de 2020
Fecha de aprobación: 15 de mayo de 2020

Villalobos-González, W; Sibaja-Brenes, J.P;
Mora-Barrantes, J.C; Álvarez-Garay, B. Evaluación de los riesgos químicos por inhalación de las sustancias utilizadas en una industria gráfica . *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-2. Abril-Junio 2021. Pág 122-136.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i2.4977>

- 1 Investigadora y académica, Universidad Estatal a Distancia (UNED), Costa Rica. Correo electrónico: wvillalobosg@uned.ac.cr.
 <https://orcid.org/0000-0002-3660-0169>
- 2 Investigadora y académico, Laboratorio de Química de la Atmósfera (LAQAT), Universidad Nacional (UNA), Costa Rica.
Correo electrónico: jose.sibaja.brenes@una.cr.
 <https://orcid.org/0000-0002-7056-2717>
- 3 Investigadora y académico, Laboratorio de Química de la Atmósfera (LAQAT), Universidad Nacional (UNA), Costa Rica.
Correo electrónico: jose.mora.barrantes@una.cr.
 <https://orcid.org/0000-0002-0409-5276>
- 4 Investigadora y académica, Universidad Estatal a Distancia (UNED), Costa Rica. Correo electrónico: balvarez@uned.ac.cr.
 <https://orcid.org/0000-0002-2180-0870>



Palabras clave

Industria gráfica; riesgo químico por inhalación; identificación; valorización; priorización.

Resumen

En el proceso productivo de una industria gráfica, se utilizan insumos y materias primas para la impresión de documentos. Un insumo son los productos químicos que podrían generar un riesgo químico, si no se controlan de forma adecuada mediante protocolos de uso, almacenamiento y disposición de desechos. Algunas sustancias químicas utilizadas son: tintas, disolventes, diluyentes, pegamentos, gomas protectoras, reveladores de plancha, entre otros. El riesgo químico por inhalación (RQI) es generado en los lugares de trabajo por el uso de sustancias con cantidades de compuestos orgánicos volátiles (VOCs), que podrían afectar negativamente la salud de los trabajadores, una evaluación de RQI podría contribuir a identificar y evaluar las sustancias químicas y generar medidas para la disminución en el impacto a la salud. Estas evaluaciones involucran medir factores como: la cantidad utilizada de una sustancia química, la exposición que tiene una persona con el contaminante en el medio y la toxicidad del producto químico. En el presente proyecto de investigación se realizó una identificación, valorización y priorización del nivel de riesgo químico por inhalación (NRQI) generados en una industria litográfica tipo “*offset*” en Costa Rica. La identificación de los riesgos y peligros se efectuó utilizando herramientas como: revisión bibliográfica, lista de chequeo, entrevistas e inspecciones de campo. La valorización y priorización de los NRQI se llevó a cabo mediante la metodología francés del Instituto Nacional de Investigación en Seguridad (INRS). Del total de los 15 productos químicos utilizados por la industria, se obtuvo que el 53,3 % presentan un RQI muy elevado. Los productos que presentan el mayor valor de NRQI son: el thinner y el limpiador de rodillos, los cuales se utilizan para la limpieza de las máquinas con residuos de tinta, con una frecuencia de uso continua en cantidades entre los 0,7 L/mes y los 20,0 L/mes. Por el contrario, se identificaron cinco productos con valores bajos de NRQI, tales como: la tinta en cartucho, el refrigerante, el limpiador 4, el isopropanol y la goma protectora de planchas.

Keywords

Graphic industry; chemical inhalation risk; identification; recovery; prioritization.

Abstract

In the production process of a graphic industry, inputs and raw materials used for printing documents. An input are chemical products that could generate a chemical risk, if not properly controlled through protocols for use, storage and disposal of waste. Some chemical substances used: inks, solvents, thinners, glues, protective rubbers, plate developers, among others. Chemical inhalation risk (RQI) generated in the workplace using substances with amounts of volatile organic compounds (VOCs), which could adversely affect the health of workers. A chemical risk assessment involves evaluating factors such as: the amount of a chemical, the exposure of a person with the contaminant in the environment and the toxicity of the chemical; its purpose is to identify and evaluate chemical substances and generate measures to reduce the impact on health. In the present research project an identification, valorization and prioritization of the level of chemical risk by inhalation (NRQI) generated in a lithographic offset industry in Costa Rica carried out. The identification of risks and dangers carried out using tools such as: literature review, checklist, interviews and field inspections. The valuation and prioritization of the RQI carried out using the French methodology of the National Institute for Security Research (INRS). Of the 15 chemical products used by the industry, it obtained that 53.3 % have a very

high RQI. The products with the highest NRQI value were the thinner and the roller cleaner, which used for cleaning machines, with a frequency of continuous use in quantities between 0,7 L/month and 20,0 L/month. On the contrary, five products with low NRQI values identified, such as: ink in cartridge, coolant, cleaner 4, isopropanol and plate gum.

Introducción

La industria gráfica es una actividad comercial dedicada a la impresión de documentos con diferentes sistemas tecnológicos y diversos procesos de impresión [1]. Un proceso litográfico generalmente se divide en tres etapas: pre-impresión, impresión y post-impresión. En la pre-impresión se incluye las actividades de diseño, diagramación, montaje y autoedición, transfiriéndose el diseño a un portador de imágenes (plancha). En la impresión, la plancha se coloca en la impresora y en la post-impresión se incluyen los acabados finales de los materiales para comercialización. Estas operaciones involucran procesos físicos y/o químicos [2].

En la industria litográfica como en cualquier otra industria de carácter químico pueden existir presencia de agentes físicos, biológicos y químicos en el ambiente laboral con efectos sobre la salud de los trabajadores [3]. La industria gráfica utiliza sustancias químicas como materia prima e insumos para el proceso productivo, que pueden generar peligros y riesgos químicos, que repercuten en la salud de los trabajadores. Dentro de las sustancias químicas utilizadas destacan: productos de preimpresión (reveladores), disoluciones diluyentes de tintas, disolventes limpiadores, tintas, adhesivos y pegamentos [2]. Un uso inadecuado de materias primas y sustancias químicas en la industria gráfica aumenta el riesgo químico y por lo tanto el efecto sobre las personas [4]. Los disolventes y limpiadores utilizados en procesos litográficos se componen principalmente de compuestos orgánicos volátiles (VOCs, por sus siglas en inglés). En el cuadro 1, se muestran algunos efectos de los disolventes que contienen VOCs según tiempo y forma de exposición.

Cuadro 1. Efectos de los VOCs en el organismo, según método de entrada y tiempo de exposición.

Método de exposición	Tiempo de exposición	Efectos
Contacto directo de la piel	Corto plazo	Dermatitis, irritación y sensibilización
Ingestión	Corto plazo	Toxicidad
Inhalación	Corto plazo	Depresión del sistema nervioso central
Inhalación	Mediano plazo	Falta de coordinación, atención y deterioro del equilibrio.
Inhalación	Largo plazo	Daños hepáticos, renales o del sistema nervioso central.

Elaboración propia a partir de [5].

Una forma de prevenir los efectos en la salud por uso y exposición a sustancias químicas es poner en práctica procesos de evaluación de riesgos, estos procesos utilizan métodos y técnicas aplicables a la evaluación de peligros, exposición y daños potenciales a la salud de los trabajadores. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), este proceso de se inicia con la formulación del problema e incluye los siguientes cuatro etapas fundamentales: 1) identificación del peligro, 2) caracterización del peligro, 3) evaluación de la exposición y 4) caracterización de riesgos. El riesgo depende de factores como: la cantidad utilizada de una sustancia química, el tiempo de exposición y el nivel toxicidad del producto químico [6].

Actualmente destacan dos evaluaciones de riesgo químico: el modelo británico COSHH Essentials, desarrollado por el Ejecutivo de Salud y Seguridad (HSE, por sus siglas en inglés); y el modelo francés del Instituto Nacional de Investigación en Seguridad (INRS). El modelo británico proporciona un diagnóstico inicial, comprende la etapa de estimación del riesgo (potencial) y no propiamente para determinar el nivel de riesgo existente [7]. El método del INRS es el más utilizado debido a que realiza una estimación más cercana a la realidad del riesgo laboral, considerando mayor cantidad de variables durante el proceso de evaluación, entre estas: propiedades de las sustancias químicas, cantidades utilizadas, forma de uso, valores límite umbrales y nivel de peligrosidad [8]. En el presente trabajo de investigación se determinó el nivel del riesgo químico por inhalación de sustancias químicas (NRQI) del proceso de impresión en una industria gráfica, para lo cual se identificaron y evaluaron los peligros y/o los riesgos químicos presentes en el ambiente laboral; mediante la metodología del INRS.

Metodología

Se realizó la evaluación del riesgo químico por inhalación (RQI) según las sustancias químicas utilizadas en una industria gráfica, durante un periodo 13 meses (entre mayo del 2018 y junio del 2019). La misma, comprendió las etapas de: a) identificación, b) valorización y c) priorización del RQI de las sustancias, utilizadas en el proceso productivo de la industria gráfica. Se utilizó la metodología de evaluación del riesgo químico denominada “método del INRS”.

Identificación del riesgo químico

Mediante la realización de 15 visitas guiadas por funcionarios de la industria gráfica se estudió el diagrama de flujo general del proceso mediante el uso de balances de masa y energía. Durante las inspecciones de campo se ejecutaron: entrevistas, encuestas, listas de chequeo y reuniones con grupos focales de la industria en estudio. Se realizaron además reuniones con expertos internos (de la empresa) y externos en el tema de evaluación del riesgo químico, parte de las actividades del trabajo de campo incluyó la realización de talleres y sesiones de trabajo con funcionarios de la planta productiva. Producto de las actividades mencionadas anteriormente se generó una base de datos con los principales peligros químicos (PQs) y riesgos químicos (RQs) del proceso productivo de industria gráfica

Las listas de chequeo utilizadas evaluaron parámetros relativos a la gestión de productos químicos como: tipo de etiquetado según Sistema Globalmente Armonizado (GHS), uso de criterios de compatibilidad química para almacenamiento, condiciones de almacenamiento (ventilación, drenajes, señalización, iluminación y tipo de estantería), estado de los recipientes donde se almacenan, dispositivos de retención en caso de derrame o fuego, materiales de seguridad, equipo de protección personal, capacitación al personal en temas de seguridad e información sobre el seguimiento de la salud de los colaboradores.

Por su parte las encuestas higiénicas aplicadas a los funcionarios, permitió identificar y tabular información relacionada con el uso de sustancias químicas como: composición, cantidades utilizadas, frecuencia de uso, frases R y/o H y peligrosidad según NFPA (anexo 1 y 2). Los datos recopilados se complementaron y verificaron con fuentes de información como: hojas de datos de seguridad de los materiales (MSDS, por sus siglas en inglés) y bases de datos de instituciones internacionales como: La Administración de Seguridad y Salud de los Estados Unidos (OSHA, por sus siglas en inglés), la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés), Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional de Estados Unidos (NIOSH, por sus siglas en inglés) y el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo de España. (INSHT).

Valorización del riesgo químico

La cuantificación (valoración) del NRQI mediante la metodología del INRS consideró las siguientes variables: clase de peligro según frases de seguridad de las sustancias, cantidad de sustancia química utilizada, frecuencia de exposición a la sustancia química, la determinación de la exposición potencial, la volatilidad de las sustancias, el procedimiento de uso, formas de protección colectiva y los valores límites ambientales (VLA) [8]. En los siguientes apartados se describe la forma para la asignación de los valores de las variables según la metodología INRS.

Clase de peligro (P)

El valor para la clase de peligro se determina para cada sustancia química mediante las frases R o H, y/o los VLA en mg/m³, y/o el tipo de materiales y procesos. En función a estas variables una sustancia química puede obtener un valor para la clase de peligro 1, 2, 3, 4 y 5, siendo el valor 5, el que representa el mayor peligro hacia la salud

Clase de cantidad (Q)

El valor asignado a la clase de cantidad se obtuvo mediante las masas y/o volúmenes diarios de sustancia utilizada: (cuadro 2). Para las sustancias químicas sin información, se procedió con el cálculo del valor de la clase de cantidad mediante la aplicación del índice Qi/Qmax, esto es cantidad almacenada de sustancia de interés entre la cantidad de aquella sustancia almacenada en mayor volumen.

Cuadro 2. Clases de cantidad en función de la cantidad utilizada de la sustancia. Elaboración propia a partir de Aguilar et al [8].

Clase de cantidad para sustancias con riesgo por inhalación	Cantidad/día	Qi/Qmax
1	< 100 g o mL	< 1 %
2	≥ 100 g o mL y < 10 kg o L	≥ 1 % a < 5 %
3	≥ 10 kg o L y < 100 kg o L	≥ 5 % a < 12 %
4	≥ 100 kg o L y < 1000 kg o L	≥ 12 % a < 33 %
5	≥ 1000 kg o L	≥ 33 % a < 100 %

Clase de frecuencia (F)

Los valores de la clase de frecuencia en el uso de las sustancias químicas se determinaron de acuerdo con lo mostrado en el cuadro 3.

Cuadro 3. Clases según frecuencia de uso de la sustancia química.

Uso	Ocasional	Intermitente	Frecuente	Permanente
Día	≤ 30 min	>30 min a ≤ 120 min	> 2 h a ≤ 6 h	> 6 h
Semana	≤ 2 h	> 2 h a 8 h	1 día a 3 días	> 3 días
Mes	1 día	2 días a 6 días	7 días a 15 días	> 15 días
Año	≤ 15 días	> 15 días a ≤ 2 meses	>2 meses a ≤ 5 meses	> 5 meses
Clase	1	2	3	4

Elaboración propia a partir de Aguilar et al [8].

Clase de exposición potencial (EP)

Los valores de la clase de exposición potencial para cada uno de los productos químicos se determinaron en función a los valores obtenidos para las clases de cantidad y de frecuencia de uso, obteniéndose valores de 0, 1, 2, 3 y 4. El mayor valor (4) representa la mayor exposición potencial a determinado producto químico.

Clase y puntuación del riesgo potencial (RP)

Este valor se generó mediante la combinación de los valores asignados para las clases de peligro y las clases de exposición potencial. La combinación de estas dos variables permite obtener valores de riesgo potencial de 1, 2, 3, 4 y 5. El valor 5 representa el mayor riesgo potencial del producto químico evaluado.

El valor del riesgo potencial se obtiene de acuerdo con el valor de la clase de riesgo potencial, de forma que, si la clase es 1, 2, 3, 4 o 5; el valor del riesgo será 1, 10, 100, 1000 o 10000, respectivamente.

Clase y puntuación por volatilidad de las sustancias (V)

Este valor se determinó con la temperatura de ebullición de la sustancia más volátil contenida en cada producto químico utilizado en la industria. La temperatura de ebullición se obtuvo de las MSDS. Mediante el gráfico de la figura 1 y considerando una temperatura de trabajo de 25 °C, se obtuvo el dato numérico de la clase de volatilidad.

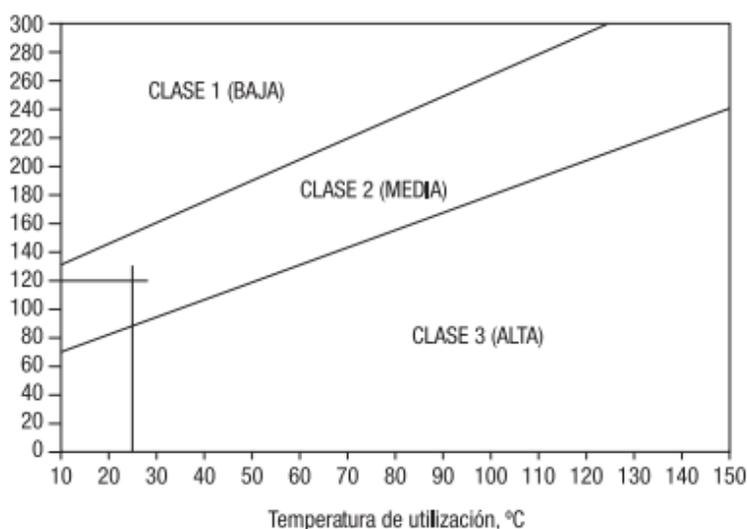


Figura 1. Tendencia por volatilidad de la sustancia [8].

Clase y puntuación de procedimiento de uso (PU)

El valor asignado a la clase de procedimiento de uso se basó en la descripción del procedimiento de uso de las sustancias químicas según el tipo proceso. Para un proceso de uso tipo dispersivo se asigna un valor de 4 (puntuación de 1), para un uso en tanques o conductos abiertos se asigna una clase de 3 (puntuación 0,5), si se utiliza en tanques cerrados con apertura ocasional se asigna un valor de 2 (puntuación 0,05) y si el uso es en tanques totalmente cerrados la clase es de 1 (puntuación 0,001).

Clase y puntuación del tipo de protección colectiva en la industria (PC)

La puntuación de esta categoría se determinó utilizando la información del cuadro 4.

Cuadro 4. Determinación de puntuación, de acuerdo con las condiciones de trabajo.

Tipo protección colectiva	Clase	Puntuación
Espacio con aberturas limitadas de entrada y salida	5	10
Espacio con ausencia de ventilación mecánica	4	1
Trabajo a la intemperie, ventilación mecánica general	3	0,7
Campana superior, rendija de aspiración, mesa con aspiración. Aspiración integrada a la herramienta	2	0,1
Captación envolvente (campana de laboratorio)	1	0,001

Elaboración propia a partir de Aguilar et al [8].

Puntuación según los valores límites ambientales (VLA)

Los VLA (mg/m³) de cada sustancia se obtuvieron de la MSDS. El valor de la puntuación se asigna de la siguiente manera: valor de 1 para un VLA > 0,1, valor 10 para 0,01 < VLA ≤ 0,1, valor 30 para un 0,001 < VLA ≤ 0,01 y valor de 100 para un VLA ≤ 0,001.

Priorización del riesgo químico

El valor final del RQI para cada sustancia química se obtuvo mediante la ecuación:

$$P_{inh} = P_{riesgo\ potencial} \times P_{volatilidad} \times P_{procedimiento} \times P_{protección\ colectiva} \times FC_{VLA} \quad (\text{Ecuación 1})$$

El NRQI de cada sustancia química se priorizó de acuerdo con lo mostrado en el cuadro 5

Cuadro 5. Caracterización del riesgo por inhalación.

Puntuación del riesgo por inhalación	Prioridad de acción	Caracterización del riesgo
> 1000	1	Riesgo muy elevado (medidas correctoras inmediatas)
> 100 a ≤ 1000	2	Riesgo moderado. Necesita probablemente medidas correctoras y/o una evaluación más detallada (mediciones).
≤ 100	3	Riesgo bajo (sin necesidad de modificaciones).

Elaboración propia a partir de Aguilar et al [8].

Discusión y resultados

Identificación de riesgos químicos

Las visitas de campo realizada en la industria, permitió determinar las sustancias químicas utilizadas en el proceso productivo, así como cantidades y frecuencias de uso. Los principales productos químicos utilizados son: limpiadores con distintas composiciones (ver anexo 1), isopropanol, thinner, tintas, aceite, goma protectora y revelador de planchas, los cuales se consumen en cantidades entre los 0,5-77,0 litros mensuales.

Por otra parte, el análisis integral de los datos obtenidos con las diferentes encuestas y lista de chequeo, así como la consulta de otras fuentes de información mencionadas anteriormente, permitió identificar los principales peligros, características fisicoquímicas y toxicológicas de los productos químicos. Esta información se encuentra tabulada en los anexos 1 y 2, información fundamental para establecer el NRQI actual de la industria evaluada. Los datos incluidos en los anexos 1 y 2 se resume en el cuadro 6.

Cuadro 6. Síntesis de la situación riesgo químico actual en la industria gráfica.

Aspecto: Uso de sustancias químicas con alto contenido de VOCs, compuestos cancerígenos y con alta toxicidad	
Síntesis de la situación de riesgo	Indicadores
<p>Fuentes de generación: uso de compuestos químicos como materias primas para la impresión de documentos.</p> <p>Información de las sustancias: Las sustancias químicas utilizadas contienen las siguientes características:</p> <ul style="list-style-type: none"> -El 75% de las sustancias químicas son de uso diario. -El 12,5% de las sustancias presentan valores de 3 y 4 en salud en la escala de la Asociación Nacional de Protección contra el Fuego de los Estados Unidos (NFPA, por sus siglas en inglés), indicativo de su alta toxicidad. -El 62,5% presentan una temperatura de inflamación entre un rango de 12 °C a 62 °C, indicativo de su alta peligrosidad por incendio. -Un 56,3% de las sustancias son consideradas mortales por inhalación ya que presentan valores de categoría 1, según escala del Sistema Globalmente Armonizado (SGA). -Un 12,5% son clasificadas como mortales en caso de ingestión -El 6,25% son clasificadas como mortales por contacto con la piel. -De las sustancias químicas 3 son clasificadas como mutagénicas y 7 como cancerígenas. <p>Disposición de residuos: los residuos químicos generados son tratados por incineración por un gestor externo.</p>	<p>En total se estima que se utilizan 87 L/mes de sustancias químicas (ver anexo 1).</p>

Respecto a la gestión de productos y residuos químicos (producto de las visitas de campo y aplicación de la lista de chequeo) se identificaron 9 aspectos positivos y 16 aspectos negativos. Uno de los principales aspectos positivos es que la industria mantiene un inventario actualizado de productos químicos y un buen sistema de compras (no se encontró productos expirados).

De los aspectos negativos se evidenció la colocación de materiales en la parte superior de los gabinetes exclusivos para productos químicos. Esto además de ser una práctica de trabajo inadecuada, implica un mayor riesgo, debido a que los gabinetes no disponen de protección contra incendios, además de la inexistencia de protección en los bordes de los gabinetes para recolección derrames.

Valoración del riesgo químico por inhalación

Una vez recolectada la información preliminar, se procedió a la asignación de valores a los factores incluidos en la metodología del INRS, según cada sustancia química utilizada en la industria gráfica. A continuación, se detalla la forma de asignación de los valores:

- P: se asignó en función a las frases R y H de las MSDS de los productos químicos, disponibles en el registro digital de la industria.
- Q: se estableció considerando la cantidad de producto químico utilizado mensualmente según inventario de la industria (anexo 1).

- F: se estableció según la frecuencia de uso del producto químico, determinado a través de las encuestas higiénicas al personal de producción de impresiones de la industria gráfica (anexo 1).
- EP: lo constituye la relación entre los valores de las clases de frecuencia y cantidad.
- RP: es la relación entre los valores de las clases de peligro y de exposición potencial.,
- V: Valor obtenido según la relación (figura 1) entre la temperatura de ebullición de la sustancia (anexo 1) y la temperatura de trabajo (25 °C) en las instalaciones de la industria.
- PU: Para un 40,0 % de los productos químicos el valor asignado fue de 1 (procedimiento de uso dispersivo) y para un 40,0 % el valor fue de 0,5 (procedimiento de uso abierto) Para productos específicos como la goma y el revelador se asignó un valor de 0,05 (procedimiento de uso cerrado), debido a que estos productos se utilizan en tanques cerrados. Los cartuchos de tinta permanecen cerrados completamente y por esta razón se le asignó un valor de 0,001.
- PC: Para un total de 12 productos químicos se asignó un valor de 10, debido a que estos productos son manipulados en zonas con ausencia de circulación de aire (no se dispone de sistemas mecánicos y/o naturales de inyección y extracción de aire). Para los productos químicos manipulados en preimpresión, los cuales son un total de 3, se les incluyó un valor de 1, debido que estos productos son manipulados en áreas del taller que disponen de apertura de puertas durante el día.
- VLA: se colocó un valor de 1 a todos los productos químicos, debido a que todos presentan un $VLA > 1$ (anexo 2).

En el cuadro 7 se detallan los productos químicos y los valores de las variables evaluadas, así como el valor final del RQI para cada producto (ecuación 1). Del total de 15 productos químicos, un 53,3% presentan un NRQI clasificado como muy elevado, lo que implica la ejecución de medidas correctoras inmediatas. Entre estos productos químicos se destacan principalmente el thinner y el limpiador de rodillos, cuya composición se observa en el anexo 1

Priorización del nivel de riesgo químico por inhalación

La figura 2 muestra la caracterización final del NRQI para cada sustancia química utilizada en el proceso de impresión y, por ende, su priorización para futuras acciones preventivas y correctivas, tanto desde el punto de vista operativo como de gestión administrativa.

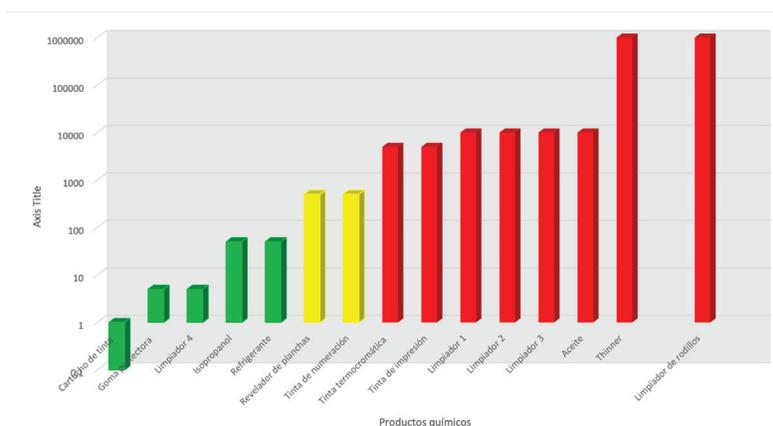


Figura 2. Priorización de sustancias según su riesgo por inhalación.

Cuadro 7. Evaluación del riesgo químico en los diferentes subprocesos.

Proceso	Preimpresión											
	Clase de:					Puntuación de:						
Sustancia	Peligro	Cantid	Frecuen	Exposición potencial	Riesgo potencial	Riesgo potencial	Volatilid	Procedim de uso	Protección colectiva	VLA	Total riesgo	Clasific del riesgo
Revelador de planchas	4	2	4	2	3	100	100	0,05	1	1	500	Moderado
Cartucho de tinta	4	2	3	2	3	100	1	0,001	1	1	0,1	Bajo
Goma protectora de planchas	4	1	2	1	3	100	1	0,05	1	1	5	Bajo
Proceso	Impresión											
Limpiador 1	3	2	2	2	2	10	100	1	10	1	10000	Alto
Limpiador 2	3	2	2	2	2	10	100	1	10	1	10000	Alto
Thinner	5	2	3	2	4	1000	100	1	10	1	1000000	Alto
Isopropanol	2	2	4	2	1	1	10	0,5	10	1	50	Bajo
Limpiador 3	3	2	2	2	2	10	100	1	10	1	10000	Alto
Limpiador de rodillos	5	1	2	1	4	1000	100	1	10	1	1000000	Alto
Tinta de numeración	4	2	4	2	3	100	1	0,5	10	1	500	Moderado
Limpiador 4	2	2	3	2	1	1	1	0,5	10	1	5	Bajo
Aceite	3	2	2	2	2	10	100	1	10	1	10000	Alto
Refrigerante	3	2	4	2	2	10	1	0,5	10	1	50	Bajo
Tinta termocromática	3	2	4	2	2	10	100	0,5	10	1	5000	Alto
Tinta de impresión	3	2	4	2	2	10	100	0,5	10	1	5000	Alto

*Información detallada de las sustancias mostradas en anexo 1 y 2.

Los productos químicos con los menores (color verde) valores de NRQI son: la tinta en cartucho (0,1), el refrigerante (50), el limpiador 4 (5), el isopropanol (50) y la goma protectora (5). Estos productos son utilizados principalmente; en la impresión, para mantener la temperatura de la máquina de impresión, como limpiador, como disolución de fuente y para la protección de placas. Las cantidades utilizadas son de entre 2 L/mes y 40 L/mes, y con una frecuencia de uso no mayor a 2 veces por semana. Los menores valores del NRQI para estos productos químicos se deben a los puntos de ebullición, los cuales son mayores a los 100 °C, por lo tanto, el valor de la clase de volatilidad es bajo (1 a 10). El resto de los productos (Por ejemplo: el thinner, revelador, limpiador de rodillos, entre otros) presentan valores para la clase de volatilidad de 100, por lo tanto, reportan valores mayores de NRQI. Otra variable importante que influye en el valor del riesgo final es el procedimiento de uso, todos estos productos químicos con bajos NRQI son utilizados en contenedores cerrados o que se pueden abrir de forma ocasional, por lo tanto, su valor varía entre 0,001 y 0,05.

Contrariamente, los productos con mayores (color rojo) NRQI son el thinner y el limpiador de rodillos, los cuales son utilizados en el área de impresión para la limpieza de las máquinas, con una frecuencia de uso continua, se utilizan cantidades entre los 0,7 L/mes y los 20,0 L/mes. Los valores obtenidos de RQI (1000000) se debe principalmente a la variable denominada la clase de peligro, con las frases H340 y 350 para el thinner y la frase R45 para el limpiador. La frase R45 indica que es una sustancia que puede “causar cáncer” [9]. La MSDS del limpiador indica “Este producto contiene los siguientes productos químicos conocidos por el estado de California como causantes de cáncer: el benceno y de daños reproductivos: benceno, tolueno”. Por otra parte, las frases H340 y H350 señalan: pueden causar efectos genéticos y cáncer [9], respectivamente. El thinner contiene tolueno, los valores de campo obtenidos para el tolueno en la industria gráfica evaluada están entre los rangos de 73,3 ppm a 123,0 ppm, estas concentraciones son superiores al VLA (50,0 ppm, INSHT)

En general, los limpiadores 1, 2 y 3 utilizados contienen destilados de petróleo, alcoholes, cetonas, alcanos, cicloalcanos y aromáticos; los cuales presentan RQI alto para la exposición por vía inhalatoria, Sin embargo, el limpiador 4 presenta un NRQI bajo, debido a la baja volatilidad y clase de peligro, siendo una buena opción para sustituir otros disolventes utilizados durante la limpieza.

El revelador y la tinta de numeración muestran valores intermedios (color amarillo) para el NRQI. El revelador se utiliza en preimpresión, para la elaboración diaria de las planchas en cantidades de 60 L/mes. El valor intermedio de NRQI asignado para este producto se debe principalmente al procedimiento de uso en tanque cerrado (0,05), sin embargo, el valor del riesgo obtenido de las frases R/H es alto (4). En el caso de la tinta de numeración, esta se utiliza continuamente y en una cantidad de 16 L/mes; además presenta una puntuación de volatilidad baja, ya que su temperatura de ebullición es superior a los 200 °C.

Los resultados obtenidos indican que el nivel de NRQI para la industria gráfica es elevado y por tanto se deben implementar medidas para su disminución. Las acciones deben estar dirigidas a: 1) regular la forma de uso y manejo de sustancias químicas, 2) substituir productos químicos utilizados actualmente y 3) seguimiento de la salud de los funcionarios.

La primera propuesta comprende desarrollar y poner en práctica un “Protocolo para el Manejo de Productos Químicos”, el cual debe contener y evaluar: 1) criterios de compra, 2) forma de almacenamiento, 3) buenas prácticas de trabajo (evitar excesos y desperdicios de materia prima, disminuir la generación de desechos, 4) uso de equipo de protección personal (EPP) y 5) adecuada gestión de desechos [10, 11]. La puesta en marcha de esta propuesta implica procesos de capacitación y fiscalización.

La segunda acción tiene como objetivo principal la eliminación y sustitución de los productos actualmente utilizados que contienen: porcentajes superiores al 10% en VOCs (incluye productos con temperaturas de inflamación menores a los 60 °C), componentes clasificados como cancerígenos y altas toxicidades (valor 3 y 4 en escala de la NFPA).

Finalmente, la tercera propuesta se enfoca a la vigilancia a la salud de los trabajadores, mediante exámenes médicos en orina y sangre, realización de pruebas físicas, así como la realización de entrevistas al personal expuesto a productos químicos para un mejor control y seguimiento de sus estados de salud.

Los funcionarios del sitio estudiado pueden estar expuestos a altas concentraciones de vapores orgánicos (VOCs), en especial al tolueno proveniente del thinner; razón por la cual se sugiere realizar exámenes médicos en orina y sangre. En el caso del tolueno se puede cuantificar la cantidad de *o*-cresol o ácido hipúrico en orina [12]. Exposiciones repetidas de tolueno puede afectar el sistema nervioso central provocando dolores de cabeza, incoordinación, pérdidas de visión y audición. Algunos efectos adversos a largo plazo pueden afectar el hígado, los riñones, los pulmones y el sistema inmunitario [12]. Por lo anterior, la vigilancia a la salud de los trabajadores es importante para medir posibles afectaciones por exposición ocupacional y tomar decisiones en pro de la salud de los funcionarios.

Conclusiones

Las visitas de campo a la empresa, la aplicación encuestas higiénicas, listas de chequeo y la consulta de otras fuentes de información, permitieron conocer el flujo del proceso de impresión, las sustancias utilizadas, así como la cantidad y frecuencia de uso y la identificación de los principales riesgos y peligros en la industria gráfica.

Lo anterior dio como resultado la sistematización de la información fisicoquímica y toxicológica de las 15 sustancias utilizadas por la industria gráfica. Con respecto a los valores fisicoquímicos, se encontró que el 12,5 % presentaron valores en NFPA de 3 y 4 en salud y el 62,5 % presentan una temperatura de inflamación entre un rango de 12 °C y 62 °C, aumentando esto, el riesgo por inhalación. Las propiedades toxicológicas indicaron que un 56,3% de las sustancias son consideradas mortales por inhalación, un 12,5 % clasificadas como mortales en caso de ingestión y un 6,25 % como mortales por contacto con la piel. Del total de las sustancias químicas 3 fueron clasificadas como mutagénicas y 7 como cancerígenas.

En la evaluación del NRQI con la metodología del INRS, se determinó que, del total de 15 productos químicos, el 53,3 % presentan un RQI muy elevado. Los productos que presentaron el mayor valor de RQI (1000000) son; el thinner y el limpiador de rodillos. Por el contrario, se identificaron cinco productos con valores bajos de riesgo: la tinta en cartucho (0,1), el refrigerante (50), el limpiador 4 (5), el isopropanol (50) y la goma protectora (5).

Se determinó que la industria gráfica en estudio presenta un RQI alto, por lo que es necesario desarrollar y poner en práctica medidas para su disminución. Se proponen 3 tipos de acciones dirigidas a 1) crear disposiciones para el manejo seguro y adecuado de sustancias químicas, 2) sustitución de productos con alto contenido de VOCs, temperaturas de inflamación bajas y con alta toxicidad, y 3) vigilancia a la salud de los trabajadores expuestos.

Referencias

- [1] Medaglia, C., and Vargas, F. (2013). *Oportunidades para la industria gráfica costarricense en Panamá* [online]. PROCOMER, San Jose, Costa Rica. Disponible: <https://procomer.com/uploads/downloads/43aa5e0839d8cf5d51efa444ec45e7064184b7fa.pdf>



- [2] Occupational Safety and Health Branch Labour Department. (2004). *Chemical Safety in the Workplace: Guidance Notes on Chemical Safety in Printing Industry*. Disponible: https://www.labour.gov.hk/eng/public/os/C/GN_Printing.pdf
- [3] Knezović, Z., Trgo, M., Sutlović, D. (2016). Monitoring mercury environment pollution through bioaccumulation in meconium, *Process Saf. Environ*, 101, 2-8. DOI: 10.1016/j.psep.2016.01.013
- [4] Prica, M. Kecic, V. Adamović, S. Radonić, J. Turk, M. "Occupational Exposure to Hazardous Substances in Printing Industry," Proceedings of 8th International Engineering Symposium, Bánki [online], 1-95, 2016.
- [5] Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. Ministerio de Medio Ambiente. (2011). *Manual de Buenas Prácticas Ambientales en la Familia Profesional: Industrias Gráficas; España*. Disponible: https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/red-de-autoridades-ambientales-raa-/indgrafica_tcm30-166749.pdf
- [6] Organización Mundial de la Salud. Programa Internacional sobre Seguridad de las Sustancias Químicas (IPCS). (2010). *Herramienta de Evaluación de Riesgos para la Salud Humana de la OMS: Peligros Químicos*. Disponible: https://www.who.int/ipcs/publications/ra_toolkit/es/
- [7] Marín, D. Montes de Oca, O. González, J. (2017). Evaluación de riesgos químicos en un laboratorio de Química Analítica por el método COSSH Essentials [online], *Ciencia en su PC*, 91-106. Disponible: <https://www.redalyc.org/pdf/1813/181353026008.pdf>
- [8] Aguilar, J. Bernaola, M. Gálvez, V. (2017). *Riesgo Químico: Sistemática para la Evaluación Higiénica*. Instituto de Seguridad e Higiene en el Trabajo de España. Disponible: <https://www.insst.es/documents/94886/96076/Riesgo+qu%C3%ADmico+Sistem%C3%A1tica+para+la+evaluaci%C3%B3n+higi%C3%A9nica.pdf/55fdf7ce-7f1b-43b4-97d2-3b36b4574c9e>
- [9] Guardino, X. (2015). Regulación UE sobre productos químicos (II). Reglamento CLP: aspectos básicos. Disponible: <https://www.insst.es/>
- [10] García, C., Leone, I. D., & Williams, E. (2014). *Buenas Prácticas Ambientales en Industrias Gráficas y Afines* [online]; Union Gráfica Argentina Regional, Rosario, Argentina, 11-31. Disponible pdf: https://www.rosario.gob.ar/web/sites/default/files/manual_graficos
- [11] Avalo, R. (2014). *Estrategia de Manejo Ambiental para una Industria Gráfica*. Tesis para optar por el título de Ingeniero Ambiental. Universidad Nacional Agraria, Perú. Disponible pdf: https://www.academia.edu/36558486/Estrategia_de_Manejo_Ambiental_para_una_Industria_Gr%C3%A1fica
- [12] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSST). 2007. Documentación Toxicológica para el Establecimiento del Límite de Exposición Profesional del Tolueno.

Anexo 1. Propiedades físicas de los productos químicos utilizados en la industria gráfica.

Subproceso	Preimpresión				NFPA			pH	T.Eb °C	T.Inflam °C	Presión de vapor kPa*	Límites de inflamabilidad	
	Producto	Composición	Cantid	Frec de uso	Frases H/R	S	I					R	LIE
Revelador	5% Dietanolamina, 10% 2-fenoxietanol, 5% destilados de petróleo	40 L / mes	Diario	H302, H315, H318, H373, H412	3	1	0	10,5	245	127	0,0013	1,4%	9,0%
Goma protectora de planchas	1% Ácido aminotrimetilenfosfónico, 0,1% 5-Cloro-2-metil-2H-isotiazol-3-ona, 0,1% 2-Metil-2H-isotiazol-3-ona	0,9 L / mes	Diario	R36/38, R23/24/25, R34, R43, R50/53	1	0	0	2,9	>100	NR	2,3	NR	NR
Cartucho de tinta en polvo	10% carbón negro, 1% dióxido de titanio, 70% Resina de poliéster, 20% polvo de ferrita, 10% pigmento.	10 cartuchos / mes	Diario	H226, H315, H332, H351	0	1	0	NR	145	31	5	1,1	6,1
Subproceso	Impresión				NFPA			pH	T.Eb °C	T.Inflam °C	Presión de vapor kPa	Límites de inflamabilidad	
Producto	Composición	Cantidad	Frec de uso	Frases H/R	S	I	R					LIE	LSE
Limpiador 1	10% ácido ortofosforico, 10% de destilados de petróleo	0,52 L/mes	1-2 veces por semana	R52/53, H319, H412, R34, R65, R10, R37, R51/53	3	2	0	2	158	62	0,016	0,5	7,0
Limpiador 2	60% destilados de petróleo y keroseno, 10% ácido fosfórico, 5% de trimetilbenceno, 5% xileno, 5% mestileno,	6 L /mes	1-2 veces por semana	H226, H315, H319, H373, H336,	2	3	0	2	150	42	0,4	0,7	5,0
Thinner	60% aromáticos, alcohol metílico, cetonas, hexanos, alcoholes, xileno, esterés.	20, 5 L /mes	1-2 veces por semana	H225, H340, H350, H373, H304	2	3	0	NA	98	43	0,3	1,0	13,5
Isopropanol	99% Isopropanol	77 L /mes	Diario	R11, R36, R67	2	3	0	NA	82	12	5,8	2,0	12,7
Limpiador 3	60 % alcanos, 10% a 30% acetona, 10% a 30 % tolueno, 10% a 30% propanol, 5% a 10% cicloalcanos	17,5 L /mes	1-2 veces por semana	H315, H319, H361d, H336, H373, H304	2	2	0	NA	114	15	4,9	NR	NR
Limpiador de rodillos	99% Destilados de petróleo	0,7 L / mes	Diario	R45	2	3	0	NA	115	10	6,9	0,5	7,0
Limpiador 4	90% 2-(2-etoxietoxi) etil acetato	4 L /mes	Diario	R19, R36/37/38	2	0	1	NA	217	100	0,13	1,5	NR
Tinta de numeración	40% Triacrilato de trimetilpropano, 30% diacrilato de 1,6-hexanodiol, 10% caprolactama de vinil, 5% alquilfenona, 0,2% éster acrilato	16 L /mes	Diario	R36/38, R43, R52/53	1	0	0	NA	>200	>60	<0,0101	2,0	11,8
Aceite	97% aceite nafténico pesado	4 L / mes	Diario	H336, H304				NA	>260	>150	NR	NR	NR
Refrigerante	70% etilenglicol, 30% dietilenglicol	21 L /mes	Diario	H302, H361, H373	2	1	0	10,8	107	NR	NR	NR	NR
Tinta termocromática	Pigmento, 20% a 30% destilados de petróleo	10 kg /mes	Diario	R65, R66	2	1	0	NA	115	10	6,9	0,5	7,0
Tinta impresión	Pigmento, 30% destilados de petróleo, terbutil hidroquinona menor a 1%, cobalto menor a 1%, manganeso menor a 1%	25 L / mes amarillo y magenta. 20 L / mes negro	Diario	H302, H315, H317, H319, H361f, H361d, H373,	2	1	0	NA	115	10	6,9	0,5	7,0

Fuente: Hojas de seguridad de las sustancias, proporcionadas por la industria gráfica, nombre y marca de las sustancias no colocadas por protección de imagen.

Anexo 2. Propiedades toxicológicas de los productos químicos utilizados en la industria gráfica.

Producto	LD50 (mg/kg)		LC50 (mg/L)	SGA			Mutagénic		Cancernogénico		Valores TLV (ppm)				
	Toxicidad oral aguda	Toxicidad dérmica		Oral	Dérmica	Inhalación	Si	No	Si	No	TWA	IST	STEL	IST	Celling
Revelador	1,902	2,2014	> 100	4	4	2		X	X		2	INSHT	NR	-	NR
Goma protectora	2,100	> 6,310	0,16	4	5	1		X		X	10	ACGIH	NR	-	NR
Cartucho de tinta en polvo	> 5000	> 5000	> 5000	5	5	4		X		X	10	NR	NR	-	NR
Limpiador 1	1,53	2470	NR	1	2	1		X		X	1	HSE	2	HSE	NR
Limpiador 2	> 5000	> 2000	> 5	5	2	1		X	X		200	OSHA	1600	ACGIH	NR
Thinner	1515	3333	16,42	3	2	1		X	X		100	ACGIH	NR	-	NR
Isopropanol	5045	5045	16000	5	5	3		X		X	400	OSHA	500	OSHA	NR
Limpiador 3	NR	NR	NR	1	2	1	X		X		20	ACGIH	NR	-	300
Limpiador de rodillos	> 5000	> 3160	> 1000	5	4	3	X		X		100	ACGIH	NR	-	NR
Limpiador 4	11000	15251	NR	5	5	-		X		X	15	NGV	30	NGV	NR
Tinta de numeración	5709	2	> 0,85	5	1	1		X		X	10	INSHT	NR	-	NR
Aceite	> 5000	> 2000		5	2	1		X		X	5	OSHA	NR	-	NR
Refrigerante	4000	9530	2725	4	5	4		X		X	50	OSHA	NR	-	125
Tinta termocromática	> 5000	> 3160	> 1000	5	5	4	X		X		100	ACGIH	NR	-	NR
Tinta de impresión	1131	> 1000	0,37	2	2	1		X		X	10	OSHA	NR	-	NR

Fuente: Hojas de seguridad de las sustancias, proporcionadas por la industria gráfica, nombre y marca de las sustancias no colocadas por protección de imagen.

Principales microorganismos entomopatógenos de *Tecia solanivora* y sus mecanismos de acción

Main entomopathogenic microorganisms of *Tecia solanivora* and their mechanisms of action

Emmanuel Jose Guerra-Luran¹, Jovanna Acero-Godoy²

Fecha de recepción: 31 de enero de 2020
Fecha de aprobación: 28 de abril de 2020

Guerra-Luran, E. J; Acero-Godoy, J. Principales microorganismos entomopatógenos de *tecia solanivora* y sus mecanismos de acción. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-2. Abril-Junio 2021. Pág 137-146.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i2.4981>



- 1 Bacteriólogo y Laboratorista Clínico. Instituto de Diagnostico Medico (IDIME). Bogotá, Colombia. Correo electrónico: ejgularan@gmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-1647-6527>
- 2 Docente en la Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca. Bogotá, Colombia. Correo electrónico: jacerog@unicolmayor.edu.co
 <https://orcid.org/0000-0003-1656-6888>

Palabras clave

Actividad entomopatógena; *Tecia solanivora*; control biológico.

Resumen

La papa (*Solanum tuberosum*) es uno de los cultivos de mayor importancia en Colombia y a nivel mundial, se destaca por ser una de las fuentes vegetales de proteínas y carbohidratos. *S. tuberosum* se ve afectado por una gran cantidad de plagas, entre ellas se encuentra *Tecia solanivora*, este importante fitopatógeno fue identificado en Guatemala - (Centroamérica). El presente artículo está centrado en exponer el control biológico utilizado para contrarrestar el ataque de *T. solanivora*, que abarca el uso de microorganismos y la producción de exo-productos microbianos. Actualmente los principales microorganismos antagónicos de *T. solanivora* son: *Bacillus thuringiensis* (*Bt*), granulovirus, y los nematodos *Steinernema* sp y *Heterorhabditis* sp. Para lograr la infección, estos microorganismos deben sobrevivir las condiciones adversas del ambiente, colonizar su entorno y finalmente evadir la respuesta inmune del huésped, lo anterior lo logran produciendo diferentes exo-productos con actividades antimicrobianas, líticas y tóxicas, entre otros. Esta importante característica le permite a un agricultor mantener las poblaciones del insecto a niveles inferiores.

Keywords

Entomopathogenic activity; *Tecia solanivora*; biological control.

Abstract

Potato (*Solanum tuberosum*) is one of the most important crop in Colombia and worldwide, stands out as one of the vegetable sources of proteins and carbohydrates. *S. tuberosum* is affected by a large number of pests; among them is *Tecia solanivora*, this important phytopathogen was identified in Guatemala - (Central America). This article is focused on exposing the biological control used to counter the attack of *T. solanivora* that covers the use of microorganisms and the production of exo-microbial products. Actually the main antagonistic microorganisms of *T. solanivora* are: *Bacillus thuringiensis* (*Bt*), granulovirus, and nematodes *Steinernema* sp and *Heterorhabditis* sp. To achieve the infection, these microorganisms must survive the adverse conditions of the environment, colonize the environment and finally evade the host immune response, this is achieved by producing different exo-products with antimicrobial activities, lithic and toxic substances, among others. This important feature allows a farmer to maintain populations of the insect at lower levels.

Introducción

En el ámbito de la agricultura, la búsqueda de productos libres de pesticidas químicos ha llevado a la innovación de productos agrícolas que puedan controlar naturalmente determinada malezas, enfermedad, o plagas. Hoy en día se han evidenciado diferentes alternativas, una de las más eficientes se encuentra el control biológico, el cual se constituye como una forma eficiente de controlar determinada plaga mediante el uso de otro organismo o microorganismo. [1], [2], [3], [4].

Solanum tuberosum es una planta dicotiledónea, perteneciente a la familia *Solanaceae* [5]. A partir del crecimiento de sus raíces se originan nuevos tubérculos indispensables para la acumulación de nutrientes y sustancias [6]. Las condiciones óptimas para su desarrollo abarcan diferentes variables climáticas tales como la temperatura (entre 10°C hasta 15°C) y la

altitud (entre 2000 y 3000 msnm). La papa es aprovechada por aproximadamente mil millones de consumidores en todo el mundo [7]. Durante la producción agropecuaria, *S. tuberosum* es atacado por agentes oportunistas que afectan el producto final y su comercialización, uno de estos oportunistas son los insectos, los cuales se centran en atacar diferentes partes de la planta [8]. Las familias de insectos *Lepidoptera*, *Coleoptera* e *Hymenoptera* son las principales oportunistas de la papa. [9], [10].

Tecia solanivora y su manejo integral

T. solanivora pertenece al orden *Lepidoptera* y familia *Gelechiidae*, este insecto es uno de los fitopatógenos de *S. tuberosum*. El ciclo de vida de *T. solanivora* consta de cuatro estados: huevo, larva este es subdividido en los instares larvales (L1, L2, L3 y L4), pupa y adultos. El ciclo inicia posterior a la eclosión de los huevos, emerge la larva L1, esta sale en busca de alimento al interior de los tubérculos y se alimenta de estos hasta llegar al instar L4. Posteriormente se convierte en pupa, para finalmente emerger como adulto (figura 1) [11], [12], [13].

Para el manejo de este insecto se observan múltiples opciones. Primordialmente, el uso de pesticidas, los cuales inhiben a *T. solanivora* actuando como una neurotoxina causando parálisis hasta inducir su muerte, entre los grupos más utilizados están: los organofosforados, piretroides y carbamatos [14], [15].

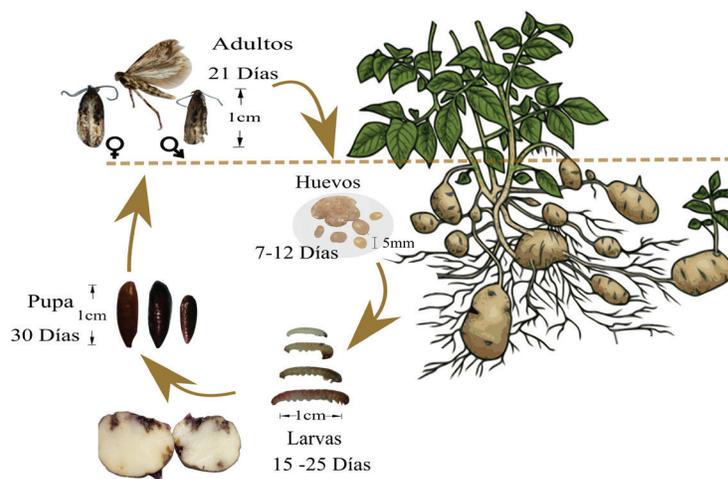


Figura 1. Ciclo de vida de *T. solanivora*.

Existen otras opciones innovadoras que han aportado significativamente al control de *T. solanivora*, entre ellas encontramos el control de tipo biológico que se basa en la implementación de bioplaguicidas constituidos de microorganismos con actividad antagónica contra el insecto. Actualmente, se conocen distintos grupos de microorganismos entomopatógenos de *Tecia solanivora*, estos poseen distintos mecanismos de acción para el insecto [16], [17].

Otra división del control de *T. solanivora* comprende la producción de plantas genéticamente modificadas, las cuales logran expresar en cierto tipo de proteína Cry de *Bt* [18]. Se han evaluado distintos métodos para esta modificación genética, uno de ellos es mediante la transferencia de ADN. Esto se logra mediante el uso de plásmidos, con la ayuda de la bacteria *Agrobacterium tumefaciens*, esta posee un plásmido denominado Ti y a través de este se logra

la transferencia de genoma directamente a la planta [19]. Finalmente, se encuentra el control de tipo etológico, este comprende el uso de feromonas sexuales que actúan como trampas atrayentes para machos y hembras, evitando la copulación [20].

Actividad entomopatógena

La actividad entomopatógena en el ámbito de la agricultura, significa la regulación de determinada población de insectos plagas a través de determinado microorganismo, este posee exo-productos biológicamente activos, y se caracterizan por tener propiedades líticas y tóxicas, alguno de estos compuestos son: proteasas, lipasas, quitinasas, hemolisinas, entre otros. A continuación se activarán estos compuestos en condiciones *in vivo*, los cuales se verán implicados en la invasión del hemocele y la proliferación sistemática en todo el insecto hasta finalmente causar su muerte [12], [13]. Primordialmente, los microorganismos entomopatógenos son ingeridos por el insecto plaga, otro método de invasión es la penetración de la cutícula esto es realizado por determinados nematodos tales como: *Steinernema sp* y *Heterorhabditis sp* [22], [23], [24].

Bt y su mecanismo de acción

Una de las bacterias más estudiadas como biocontrolador de insectos es *Bt*, está clasificada como Gram positiva, aerobia facultativa, esporulante, esta ha sido aislada principalmente del suelo y del agua; la mayoría de las cepas de *Bt* producen cristales de proteínas, los cuales le otorgan su poder insecticida frente a insectos plaga, abarcando los órdenes *Lepidóptera*, *Díptera*, *Coleóptera*, *Hemíptera*, *Himenóptera* y *Malófaga* entre otros; las principales proteínas implicadas en esta acción, son: Cry I, Cry II, Cry III. Los genes que interactúan en la producción de estas proteínas, residen en plásmidos conjugativos. Hasta el 2014 se encontraron aproximadamente 700 toxinas Cry subclasificadas dentro de 72 grupos. Se han evidenciado cepas nativas de *Bt* como biocontroladoras de *T. solanivora* hallándose la cepa 146-15801 que mejor actúa [11], [13], [19], [20] [21].

El principal factor de virulencia es la producción de cristales, el cual al ser ingeridos por el insecto, se despliegan las sub-unidades de proteínas denominadas Cry y son activadas proteolíticamente en determinados ambientes de pH del intestino medio, se evidencia que las toxinas Cry I, se activa en el pH alcalino del intestino medio; mientras tanto la toxina Cry III tiene solubilidad en pH ácidos (3,9 hasta 4,2) y alcalinos (9,5 hasta 11,3) [27]. Los síntomas que un insecto susceptible presenta al ingerir los cristales de proteínas son: cese de ingesta, parálisis del intestino, aumento en las deposiciones, emesis, parálisis total y finalmente la muerte [25], [28], [29], [30].

El mecanismo de acción de *Bt* inicia cuando las larvas de *T. solanivora* ingieren las pro-toxinas provenientes de *Bt*, estas se solubilizan en el intestino medio por acción del pH y enzimas proteolíticas, liberando la toxina, a continuación, las toxinas se une a receptores específicos ubicados sobre las vesículas de la membrana de las microvellosidades apicales, al darse el reconocimiento inician la formación de poros (entre 1,0 ó 2,0 nm), causando permeabilidad de la membrana y lisis. Finalmente, las esporas de *Bt* ingresan a la hemolinfa, donde germinan y ocasiona septicemia y muerte en la larva (figura 2) [28], [31], [32], [33].

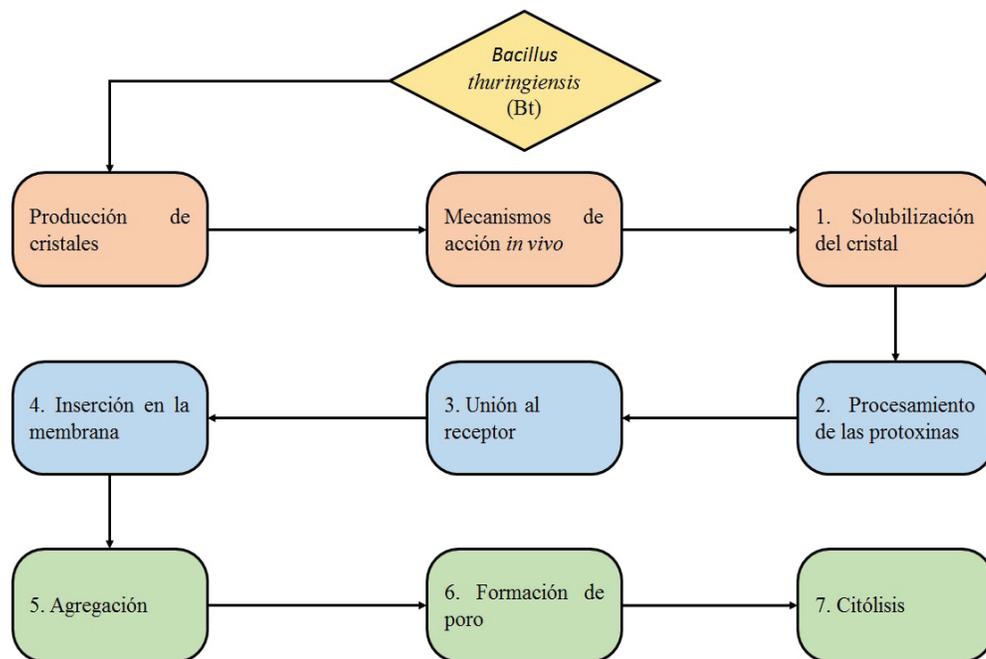


Figura 2. Mecanismos de acción de *Bt* implicados en la muerte de *T. solanivora*.

Bioprospección de *Bt*

López-Pasos y colaboradores en el 2013 [25] rescataron información sobre la aplicación de *Bt* con *T. solanivora* y se evidencia la actividad biológica en larvas de *T. solanivora* y cuyos resultados mostraron una mortalidad superior al 20 %. En la actualidad el principal uso de las proteínas de *Bt*, se ha fortalecido en la aplicación a plantas transgénicas, por otra parte también se han realizado recombinaciones de proteínas para la evitar la resistencia de esta plaga a las proteínas [20], [34], [35].

La implementación de *Bt* se logra gracias al uso de bioformulaciones, en un estudio realizado en el 2014 por Villanueva y colaboradores destaca las mezclas con *Bt* y granulovirus y se comprobó que al usar materiales excipientes como carbonato de calcio lograron ocasionar en condiciones de pos-cosecha mortalidad de larvas de *T. solanivora* hasta en un 82.7% [20].

Granulovirus (PhopGV)

Otra estrategia exitosa para el control de esta plaga es el uso de los virus, donde se destaca la familia *Baculoviridae*, caracterizada por poseer ADN de doble cadena y está compuesta por cuatro géneros, dentro de los que se destacan dos grupos: los nucleopoliedrovirus (NPV) y los granulovirus (GV), este último grupo tienen como blanco algunos insectos, sus formas infectivas son: viriones derivados de cuerpos de inclusión (CI) y viriones brotados (BV) [36], [37]. En el estudio filogenético se ha logrado establecer los genes involucrados en la afectación a un insecto plaga entre ellos encontramos el gen *p143* que interviene en la replicación del ADN, el gen *ie-2* que actúa como controlador del ciclo celular, el gen *lef-7* que estimula en la replicación de ADN [36].

La infección inicia cuando las partículas virales que se encuentran en el ambiente están en forma de CI, y son ingeridas por el insecto, estas llegan al intestino y por acción del pH, se liberan los CI. Posteriormente, estos viriones atraviesan la membrana del intestino y se unen por

fusión a las microvellosidades de las células epiteliales, en el núcleo de cada célula, comienza la transcripción de genes virales, las nucleocápsides formadas dentro de las células constituyen los nuevos BV, estos BV circularan a través de la hemolinfa diseminando la infección a los demás tejidos y órganos susceptibles como hemocitos, cuerpo grasso entre otros produciendo una infección secundaria (figura 3) [37], [38], [39].

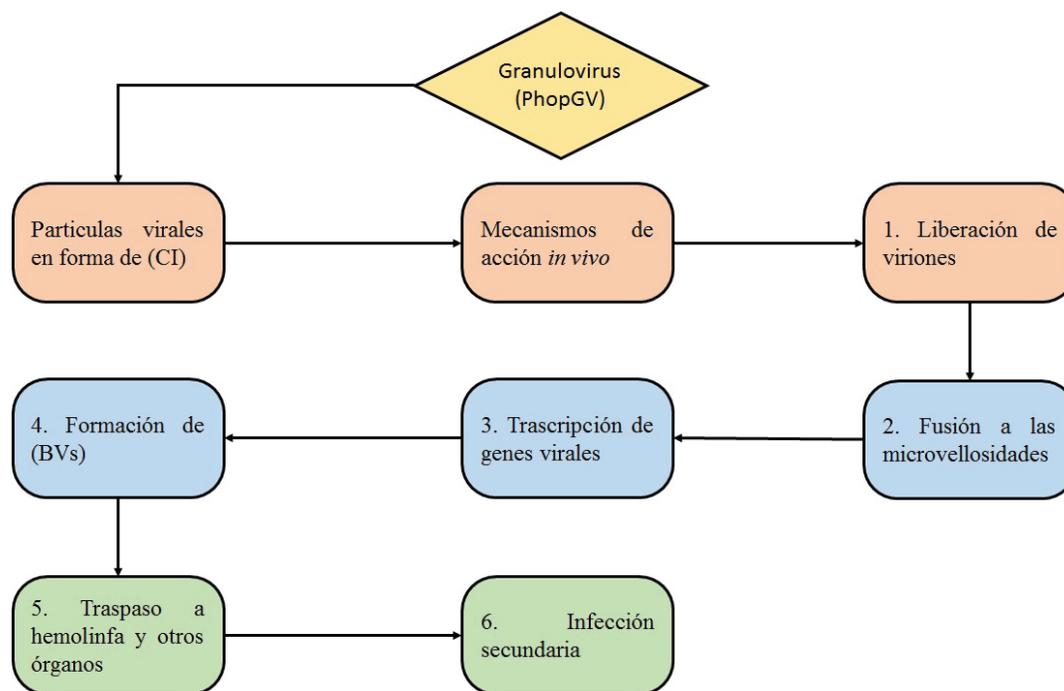


Figura 3. Mecanismos de acción de granulovirus implicados en la muerte de *T. solanivora*.

Bioprospección de Granulovirus

A partir de un estudio realizado por Espinel-Correal y colaboradores en el 2010, el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) estandarizó un producto de uso comercial, el cual presenta una eficacia en contra de *T. solanivora* del 90% y una duración de 24 meses a temperatura ambiente. Y hasta el 2017 se realizó un proceso de escalamiento al producto, pues se evidenció que adicionalmente presenta actividad antagónica a *Tuta absoluta* [23].

En un estudio realizado por Carpio C. y colaboradores en el 2013 desarrollaron un producto a partir de un granulovirus aislado, este producto fue preparado en un bioformulado compuesto por carbonato de calcio y algunos coadyuvantes tales como: cloruro de magnesio y lectina de soja encontrándose una mortalidad >98% siendo promisorio como opción al tratamiento [40].

Nematodos Mutualistas

Otro modelo importante de bacterias con actividad entomopatógena son *Xenorhabdus* y *Photorhabdus*, las cuales establecen relaciones mutualistas con nematodos de las familias *Steinernema sp* y *Heterorhabditis sp* respectivamente [41]. Ambos nematodos tienen ciclos de vida similares, y se divide en huevo, larva, estadios juveniles (J1, J2, J3, J4), y adultos, únicamente el tercer estadio juvenil (J3) de estos nemátodos son infectivos y buscan al hospedador, detectando sus excrementos y la producción de CO₂ [42]. *Steinernema spp*

sólo es capaz de entrar en el hospedador a través de las aberturas naturales: boca, ano y espiráculos, mientras que las especies de *Heterorhabditis spp* lo pueden hacer a través de la epidermis del insecto [43].

En cuanto al estudio del genoma de las bacterias mutualistas, en una investigación realizada por Peteira y colaboradores en 2014, las huellas genéticas de los aislados del nematodo y de la bacteria simbiote. En general, contienen relaciones filogenéticas para el control de insectos [44].

Para lograr la infección los nematodos logran el siguiente mecanismo de acción: Una vez *Steinernema sp* y *Heterorhabditis sp* localizan el insecto, penetran en él a través de la cutícula o aberturas naturales (boca, o ano). Posteriormente son liberadas las bacterias, las cuales producen y secretan toxinas, lipasas y proteasas. Estos causan una depresión del sistema inmune del insecto e inhiben el crecimiento del mismo, la proliferación de las bacterias en el hemocele y la disgregación de órganos y tejidos llevará finalmente a la muerte del insecto por septicemia finalmente, el nematodo se alimentara de los tejidos que la bacteria ha metabolizado (figura 4) [41], [45], [46].

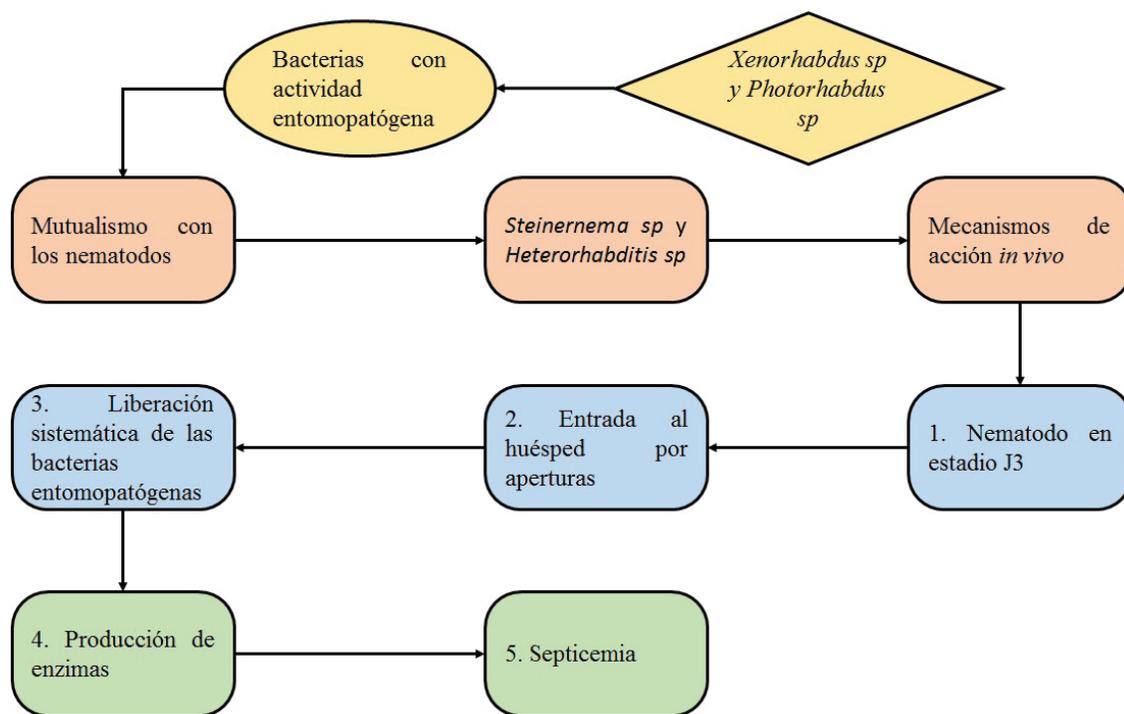


Figura 4. Mecanismos de acción de los nematodos mutualistas implicados en la muerte de *T. solanivora*.

Bioprospección de nematodos entomopatógenos

El uso de nematodos entomopatógenos en contra de *T. solanivora* en los últimos años se ha visto muy limitado, pues estos nematodos se han visto mayormente utilizados para atacar otro tipo de insectos plagas, uno de los principales estudios realizados por Fan XueJuan y colaboradores en el año 2000, estos implementaron a *Steinernema spp* y *Heterorhabditis spp*, y evidenciaron que estos son capaces de producir una mortalidad en *T. solanivora* hasta en un 70% a las 72 horas [47], [48], [49].

En el 2010 Argotti y colaboradores evaluaron estos nematodos en larvas de *Galleria mellonella* y larvas del cuarto instar de *T. solanivora* evidenciando una mortalidad superior al 90% y del 72% respectivamente [50].

Limitaciones al uso de microorganismos entomopatógenos

A pesar de su especificidad existen múltiples factores que pueden afectar el rendimiento para la aplicación de microorganismos entomopatógenos, principalmente los factores ambientales suelen reducir la eficacia tal como es el caso de *Bt* [20], [23], [28], [51], que se ve afectado por la radiación solar, otra limitación presente es el tiempo que tarda el microorganismo en causar la muerte, como tal es el caso de granulovirus, generalmente este virus suele causar la muerte del insecto entre los 12 y 21 días tiempo para que *T. solanivora* ocasione daño al tubérculo [23]; a su vez granulovirus se ve afectado por la luz ultravioleta que causa la inactivación afectando la replicación del ADN, para el caso de *Xenorhabdus* y *Photorhabdus*, es indispensable la existencia de los nematodos que los transporta hasta el insecto, ocasionando que las aplicaciones de estos microorganismos en los cultivos sean más complejas [52], [53].

Referencias

- [1] K. L. Giles, B. P. McCornack, T. A. Royer, y N. C. Elliott, "Incorporating biological control into IPM decision making", *Curr. Opin. Insect Sci.*, vol. 20, pp. 84–89, 2017, doi: 10.1016/j.cois.2017.03.009.
- [2] L. A. Lacey, D. Grzywacz, D. I. Shapiro-Ilan, R. Frutos, M. Brownbridge, y M. S. Goettel, "Insect pathogens as biological control agents: Back to the future", *J. Invertebr. Pathol.*, vol. 132, pp. 1–41, 2015, doi: 10.1016/j.jip.2015.07.009.
- [3] A. Kergunteuil, M. Bakhtiari, L. Formenti, Z. Xiao, E. Defosse, y S. Rasmann, "Biological control beneath the feet: A review of crop protection against insect root herbivores", *Insects*, vol. 7, núm. 4, 2016, doi: 10.3390/insects7040070.
- [4] P. A. Marchand, "Synthetic agrochemicals: a necessary clarification about their use exposure and impact in crop protection", *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 26, núm. 18, pp. 17996–18000, 2019, doi: 10.1007/s11356-019-05368-8.
- [5] M. Cerón-Lasso, A. F. Alzate-Arbeláez, B. A. Rojano, y C. E. Ñuztez-Lopez, "Composición Físicoquímica y Propiedades Antioxidantes de Genotipos Nativos de Papa Criolla (*Solanum tuberosum* Grupo Phureja) Physicochemical Composition and Antioxidant Properties of Native Diploid Potato (*Solanum tuberosum* Phureja Group)", *Inf. Tecnológica*, vol. 29, núm. 23, pp. 205–216, 2018, doi: 10.4067/S0718-07642018000300205.
- [6] T. Milton, *El cultivo de papa en honduras*. Honduras, 2016.
- [7] E. S. Torres, J. Torres, C. Moreno, y R. Arango, "Desarrollo de líneas transgénicas de una variedad androes-téril de papa, potencialmente resistentes a *Tecia solanivora* Povolny", *Agron. Colomb.*, vol. 30, núm. 2, pp. 163–171, 2012.
- [8] ICA, "Manual Fitosanitario de la Papa.", *ICA, Línea Agrícola*, p. 51, 2011, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [9] FAO, "El mundo de la papa", *Insumos y Factores Asoc. a la Prod. Agropecu.*, vol. 15, pp. 1–7, 2008.
- [10] W. Pérez y G. Forbes, "Guía de identificación y control de las principales plagas que afectan a la papa en la zona andina", Lima, Perú, 2011.
- [11] D. Carrillo y E. Torrado-Leon, "*Tecia solanivora* povolny (Lepidoptera: Gelechiidae), an invasive pest of potatoes *Solanum tuberosum* L. in the northern andes", en *Potential Invasive Pests of Agricultural Crops*, CABI Publishing, 2013, pp. 126–136.
- [12] E. Trujillo García y S. Perera González, "Plagas y enfermedades de la papa . Identificación y control .", Mosquera, Colombia, 2009.
- [13] C. Camargo, D. Rincón, y E. Valencia, "Localización de hospedero por larvas neonatas de *Tecia solanivora* (Lepidoptera: Gelechiidae)", *Corpoica Cienc. y Tecnol. Agropecu.*, vol. 11, núm. 1, pp. 5–10, 2010.
- [14] University of Florida, *Potential invasive pests of agricultural crops*. Wallingford: CABI, 2013.
- [15] DANE, "Boletín mensual insumos y factores asociados a la producción agropecuaria", Bogotá, Colombia, 2019.

- [16] D. Fischbein, "Introducción a la teoría del control biológico de plagas", en *Manejo integrado de plagas forestales*, INTA EEA B., vol. 15, J. Villacide y J. Corley, Eds. San Carlos de Bariloche. Río Negro. Argentina.: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 2012, pp. 4–6.
- [17] R. Ximhai, E. Nava-Pérez, C. García-Gutiérrez, ; Jesús, R. Camacho-Báez, y E. Lorena Vázquez-Montoya, "Bioplaguicidas: una opción para el control biológico de plagas", *Rev. Soc. Cult. y Desarro. Sustentable*, vol. 8, pp. 17–29, 2012.
- [18] M. Fernanda Ordóñez Ch, J. V Fernando Rosero, y T. Bacca, "Resistencia de cinco variedades de (*Solanum* spp., Solanaceae) al ataque de teña solanívora (Lepidoptera: Gelechiidae)", *Univ. Caldas*, vol. 16, pp. 108–119, 2012.
- [19] D. D. Portela-Dussán, A. Chaparro-Giraldo, y S. A. López-Pazos, "La biotecnología de *Bacillus thuringiensis* en la agricultura", *Nova*, vol. 11, núm. 20, p. 87, 2013, doi: 10.22490/24629448.1031.
- [20] D. Villanueva, J. Torres, H. Rivera, V. Núñez, R. Arango, y F. Ángel, "Líneas Colombianas de papa genéticamente modificadas resistentes a Teña solanívora (Lepidoptera: Gelechiidae) bajo campo confinado", *Rev. Colomb. Entomol.*, vol. 40, núm. 2, pp. 148–157, 2014.
- [21] A. Rodríguez *et al.*, "Proyecto Demostrativo Con Implementación De Bpa En El Cultivo Del Banano Las Buenas Prácticas Agrícolas (Bpa) En El Cultivo Del Banano", *Corporación Banan. Nac.*, vol. 2, pp. 2–3, 2010.
- [22] R. P. Kamaliya, D. M. Jethva, N. M. Kachhadiya, V. R. Ahir, y G. S. Vala, "Bio-efficacy of *Heterorhabditis indica* against Groundnut White Grub", *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.*, vol. 8, núm. 04, pp. 830–836, 2019, doi: 10.20546/ijcmas.2019.804.093.
- [23] A. M. Cotes, *Control Biológico de Fitopatógenos, Insectos y Acaros*, AGROSAVIA. Mosquera, Colombia: AGROSAVIA, 2018.
- [24] B. Ruffner *et al.*, "Oral insecticidal activity of plant-associated pseudomonads", *Environ. Microbiol.*, vol. 15, núm. 3, pp. 751–763, mar. 2013, doi: 10.1111/j.1462-2920.2012.02884.x.
- [25] S. López, A. Rojas, y A. Chaparro, "Actividad biológica de *Bacillus thuringiensis* sobre la polilla guatemalteca de la papa , Teña solanívora Povolny (Lepidoptera: Gelechiidae)", *Rev. Mutis*, vol. 3, núm. 2, pp. 31–42, 2013.
- [26] B. Senthil Kumar *et al.*, "Characterization of *Bacillus thuringiensis* Cry1 class proteins in relation to their insecticidal action", *Interdiscip. Sci. Comput. Life Sci.*, vol. 5, núm. 2, pp. 127–135, jun. 2013, doi: 10.1007/s12539-013-0160-2.
- [27] A. Bravo y J. Ceron, *Bacillus thuringiensis En el control Biológico*, Buena Semi. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2013.
- [28] A. H. Badran *et al.*, "Continuous evolution of *Bacillus thuringiensis* toxins overcomes insect resistance", *Nature*, vol. 533, núm. 7601, pp. 58–63, may 2016, doi: 10.1038/nature17938.
- [29] J. A. Baum *et al.*, "Binary toxins from *Bacillus thuringiensis* active against the western corn rootworm, *Diabrotica virgifera virgifera* LeConte", *Appl. Environ. Microbiol.*, vol. 70, núm. 8, pp. 4889–4898, ago. 2004, doi: 10.1128/AEM.70.8.4889-4898.2004.
- [30] D. H. Sauka y G. B. Benintende, "Bacillus thuringiensis: Generalidades. Un acercamiento a su empleo en el biocontrol de insectos lepidópteros que son plagas agrícolas", *Rev. Argent. Microbiol.*, vol. 40, núm. 2, pp. 124–140, 2008.
- [31] A. L. D. A. Melo, V. T. Soccol, y C. R. Soccol, "Bacillus thuringiensis: Mechanism of action, resistance, and new applications: A review", *Critical Reviews in Biotechnology*, vol. 36, núm. 2. Taylor and Francis Ltd, pp. 317–326, mar. 03, 2016, doi: 10.3109/07388551.2014.960793.
- [32] A. Bravo, S. Likitvatanavong, S. S. Gill, y M. Soberón, "Bacillus thuringiensis: A story of a successful bioinsecticide", 2011, doi: 10.1016/j.ibmb.2011.02.006.
- [33] L. M. Fiuzza, R. A. Polanczyk, y N. Crickmore, *Bacillus thuringiensis and Lysinibacillus sphaericus: Characterization and use in the field of biocontrol*. Springer International Publishing, 2017.
- [34] C. J. Nova-López, J. M. Muñoz-Pérez, L. F. Granger-Serrano, M. E. Arias-Zabala, y R. E. Arango-Isaza, "Expresión de la proteína recombinante Cry 1Ac en cultivos de células de papa en suspensión: Establecimiento del cultivo y optimización de la producción de la biomasa y la proteína mediante la adición de nitrógeno", *DYNA*, vol. 84, núm. 201, pp. 34–41, 2017, doi: 10.15446/dyna.v84n201.59829.
- [35] B. Schaub y J. Kroschel, "Developing a biocontrol strategy to protect stored potato tubers from infestation with potato tuber moth species in the Andean region", *J. Appl. Entomol.*, vol. 142, núm. 1–2, pp. 78–88, feb. 2018, doi: 10.1111/jen.12426.

- [36] S. Haase, A. Sciocco-Cap, y V. Romanowski, "Baculovirus Insecticides in Latin America: Historical Overview, Current Status and Future Perspectives", *Viruses*, vol. 7, pp. 2230–2267, 2015, doi: 10.3390/v7052230.
- [37] J. Gómez Valderrama y L. Villamizar, "Baculovirus: Hospederos y especificidad", *Rev. Colomb. Biotecnol.*, vol. 15, núm. 2, p. 143, dic. 2013, doi: 10.15446/rev.colomb.biote.v15n2.41273.
- [38] L. Villamizar *et al.*, "Desarrollo de un bioplaguicida a base de granulovirus para el control de la polilla guatemalteca de la papa (*Tecia solanivora*) en campo", *Foreign Affairs*, vol. 91, núm. 5. Foreign Affairs, Mosquera, Colombia, p. 287, 2012, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [39] C. E. Correal, A. Marina, y C. Prado, "Efecto de la infección con granulovirus en el desarrollo de *Tecia solanivora* (Lepidoptera: Gelechiidae)", *Rev. Fac. Nac. Agron.*, vol. 62, núm. 1, pp. 4797–4805, 2009.
- [40] C. Carpio *et al.*, "Development of a viral biopesticide for the control of the Guatemala potato tuber moth *Tecia solanivora*", *J. Invertebr. Pathol.*, vol. 112, núm. 2, pp. 184–191, feb. 2013, doi: 10.1016/j.jip.2012.11.014.
- [41] R. K. Raja *et al.*, "Response of three cyprinid fish species to the Scavenger Deterrent Factor produced by the mutualistic bacteria associated with entomopathogenic nematodes", *J. Invertebr. Pathol.*, vol. 143, pp. 40–49, feb. 2017, doi: 10.1016/j.jip.2016.11.013.
- [42] A. Sáenz y J. C. López, "Ciclo de vida y patogenicidad del aislamiento nativo *Heterorhabditis* sp. SL0708 (Rhabditida: Heterorhabditidae)", *Rev. Colomb. Entomol.*, vol. 37, núm. 1, pp. 43–47, 2011.
- [43] K. Bohorquez Benitez y A. del pilar Duarte Barrero, "Prospección de patógenos con potencial para el control biológico de la polilla guatemalteca de la papa (*Tecia solanivora*, Fam. Gelechiidae)", Universidad Santo Tomás, Bogotá, 2016.
- [44] B. I. Peteira *et al.*, "Variabilidad molecular de aislamientos venezolanos de nematodos entomopatógenos y sus bacterias simbiotas 1 Molecular variability of Venezuelan isolates of entomopathogenic nematodes and their symbiont bacteria", 2014.
- [45] S. R. Cagnolo, "Nematodos entomopatógenos (familias Steinernematidae y Heterorhabditidae) en Argentina. Recopilación de hallazgos de poblaciones naturales en medio siglo de prospecciones", *Rev. Fac. CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y Nat.*, vol. 6, núm. 1, pp. 1–8, 2019.
- [46] Ž. Laznik y S. Trdan, "Attraction Behaviors of Entomopathogenic Nematodes (Steinernematidae and Heterorhabditidae) to Synthetic Volatiles Emitted by Insect Damaged Potato Tubers", *J. Chem. Ecol.*, vol. 42, núm. 4, pp. 314–322, abr. 2016, doi: 10.1007/s10886-016-0686-y.
- [47] F. Xuejuan, A. Maggiorani, y S. Gudiño, "Uso de nemátodos entomopatógenos como una alternativa en el control de polilla (*Tecia solanivora*), importante plaga de la papa (*Solanum tuberosum*). mérida-venezuela", *Rev. For. Venez.*, vol. 44, núm. 1, pp. 115–118, 2000.
- [48] E. San-Blas, C. Rosales, y T. Ángel, "Entomopathogenic nematodes in tropical agriculture: Current uses and their future in Venezuela", en *Nematode Pathogenesis of Insects and Other Pests: Ecology and Applied Technologies for Sustainable Plant and Crop Protection*, Springer International Publishing, 2015, pp. 375–402.
- [49] C. V. Edmunds, C. S. Wilding, y R. Rae, "Susceptibility of *Chironomus plumosus* larvae (Diptera: Chironomidae) to entomopathogenic nematodes (Rhabditida: Steinernematidae and Heterorhabditidae): Potential for control", *Eur. J. Entomol.*, vol. 114, pp. 526–532, 2017, doi: 10.14411/eje.2017.067.
- [50] E. Argotti, P. Gallegos, J. Alcázar, y H. Kaya, "Patogenicidad de nematodos entomopatógenos del genero *Steinernema* y *Heterorhabditis* sobre larvas de *Tecia solanivora* en Ecuador", *Boletín Técnico*, pp. 162–172, 2010.
- [51] C. Ballardo, M. del C. Vargas-García, A. Sánchez, R. Barrena, y A. Artola, "Adding value to home compost: Biopesticide properties through *Bacillus thuringiensis* inoculation", *Waste Manag.*, vol. 106, pp. 32–43, abr. 2020, doi: 10.1016/j.wasman.2020.03.003.
- [52] S. Edgington *et al.*, "Diversity and distribution of entomopathogenic nematodes in Chile", *Nematology*, vol. 12, núm. 6, pp. 915–928, oct. 2010, doi: 10.1163/138855410X498897.
- [53] P. Kupferschmied, M. Maurhofer, y C. Keel, "Promise for plant pest control: Root-associated pseudomonads with insecticidal activities", *Front. Plant Sci.*, vol. 4, pp. 1–17, jul. 2013, doi: 10.3389/fpls.2013.00287.

Revisión sistemática de literatura: aplicaciones de las comunicaciones moleculares

Systematic review of literature: applications of molecular communications

Maximiliano Centeno-Romero¹, German Chacón-Arrieta², José Alexander Vega-Aguilar³, Antonio González-Torres⁴, Jason Leitón-Jiménez⁵

Fecha de recepción: 1 de febrero de 2020
Fecha de aprobación: 14 de junio de 2020

Centeno-Romero, M; Chacón-Arrieta, G; Vega-Aguilar, J.A; González-Torres, A; Leitón-Jiménez, J. Revisión sistemática de literatura: aplicaciones de las comunicaciones moleculares. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-2. Abril-Junio 2021. Pág 147-160.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i2.4982>



- 1 Profesional de tecnologías de la información. ULACIT. Costa Rica. Correo electrónico: mcentenor702@ulacit.ed.cr
- 2 Profesional de tecnologías de la información. ULACIT. Costa Rica. Correo electrónico: gchacona815@ulacit.ed.cr
- 3 Profesional de tecnologías de la información. ULACIT. Costa Rica. Correo electrónico: jvegae967@ulacit.ed.cr
- 4 Profesor universitario. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: antonio.gonzalez@tec.ac.cr
- 5 Profesor universitario. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: jleiton@tec.ac.cr

Palabras clave

Comunicación molecular; nanotecnología; bionanomáquina; nanoredes.

Resumen

Las comunicaciones moleculares constituyen un área de investigación dinámica que ha mostrado tener un gran potencial para resolver problemas en disciplinas tan diversas como la ingeniería de las telecomunicaciones, la nanotecnología, la medicina, la biotecnología y la bioquímica. El estudio de este tipo de tecnología es reciente y ha dado origen a un gran número de publicaciones que se encuentran dispersas, por lo que su estudio requiere un esfuerzo para localizarlas, organizarlas y estudiarlas. Este artículo presenta una revisión sistemática de la literatura sobre las comunicaciones moleculares, a fin de analizar la forma en que está siendo aplicada en diferentes ámbitos. El estudio efectuado contempla el periodo comprendido entre el 2006 y 2018, y tomó en cuenta 28 artículos, después de haber pasado por varios filtros y criterios de selección. El resultado demuestra que la mayoría de los trabajos de investigación publicados desarrollan aspectos generales, pero un grupo importante aborda la experimentación en campos de la salud y la biomedicina. La discusión de los resultados plantea otros posibles usos de este tipo de comunicaciones y su posible integración con otras tecnologías.

Keywords

Molecular communication; nanotechnology; bionanomachine; nanonetworks.

Abstract

Molecular communications constitute a dynamic research area that has a great potential to solve problems in disciplines as diverse as telecommunications engineering, nanotechnology, medicine, biotechnology and biochemistry. The study of this type of technology is recent and has given rise to a large number of publications that are scattered, and so, their study requires an effort to locate, organize and study them. This article presents a systematic literature review on molecular communications, in order to analyze how it is being applied in different fields. The study carried out contemplates the period between 2006 and 2018, and took into account 28 articles, after having passed through several filters and selection criteria. The result shows that the majority of published research works develop general aspects, but an important group addresses experimentation in the fields of health and biomedicine. The discussion of the results raises other possible uses of this type of communications and their possible integration with other technologies.

Introducción

Los avances tecnológicos y científicos han facilitado la solución de diversidad de problemas, y han originado nuevos desarrollos para tratar otros para los cuales no existían los medios que hicieran posible su abordaje. Entre estos avances se encuentra la miniaturización a nivel nano de componentes existentes y la aparición de nuevos elementos, y esto ha dado origen a la nanotecnología.

En este contexto han surgido las nanomáquinas, las cuales cuentan con componentes funcionales a escala nano y cuya definición incluye a las células. Los materiales con los cuales se construyen pueden ser orgánicos y no orgánicos, y se considera que el material, el dispositivo y su función son prácticamente inseparables [1]. Estos pequeños dispositivos se utilizan en

diferentes campos, pero su importancia en la producción de algunos dispositivos médicos ha impulsado su evolución. Por otra parte, también están las nanomáquinas biológicas, a las cuales se continuará haciendo referencia como nanomáquinas. Su función está limitada a cálculos simples, detecciones elementales (i.e., sensor simple) y acciones sencillas [2], pero tienen diversas aplicaciones tanto en la medicina como en la ingeniería molecular, la química, la física, la agricultura, la manufactura, en aplicaciones ambientales y en aplicaciones computacionales [3]. El tamaño de las nanomáquinas oscila entre las medidas de una macromolécula y una célula biológica, y se crean con proteínas, ácido nucleótido, liposomas y células biológicas.

Las aplicaciones que utilizan nanomáquinas requieren que estas, al igual que los elementos de un sistema convencional, cooperen y se comuniquen entre sí para llevar a cabo una tarea específica. Esto es ilustrado por Nakano et al. [2] con un ejemplo en el cual las nanomáquinas (nanorobots) deben cooperar entre sí para identificar tumores y liberar drogas para destruirlos. Así, las nanomáquinas necesitan el uso de redes de comunicación, que en su ámbito se conocen como nanoredes.

Una nanored es la interconexión de un grupo de nanomáquinas para compartir información y cooperar entre sí, con el fin de llevar a cabo tareas de cierta complejidad. Debido al carácter crítico de las aplicaciones de las nanomáquinas, el diseño de estas redes debe ser robusto y las comunicaciones deben ser rápidas y confiables, lo cual se logra mediante comunicaciones moleculares (CM).

Las ventajas de las CM son su facilidad de implementación; tamaño a nanoescala; integración con organismos vivos; eficiencia energética; y una alta complejidad funcional, debido a la evolución de las moléculas durante millones de años. En cuanto a sus desventajas, se deben mencionar su carácter estocástico, por la propagación aleatoria de moléculas y ruido ambiental; baja velocidad; pequeños rangos de cobertura; y fragilidad, debido a condiciones ambientales.

El objetivo de este trabajo de investigación es realizar una revisión sistemática de la literatura sobre el uso de las comunicaciones moleculares, con el fin de orientar a nuevos investigadores sobre los aspectos más relevantes, las principales tendencias y la forma en que se están utilizando en diferentes sectores como la salud, la industria y el ambiente.

En las siguientes secciones se presentan los antecedentes (sección II), la descripción de la metodología utilizada para realizar la revisión (sección III), los resultados obtenidos (sección IV), el análisis de los resultados (sección V) y las conclusiones y trabajo futuro (sección VI).

Antecedentes

Las comunicaciones moleculares forman parte de la nanociencia y estudian las propiedades y características de las moléculas biológicas para enviar, recibir y detectar pequeñas cantidades de moléculas a través de canales de transmisión acuosos o gaseosos, con alcances de nanómetros o micrómetros. Estas redes pueden operar en el cuerpo humano de forma pasiva o activa, y a nivel intracelular, intercelular e interórganos.

Cuando este tipo de comunicaciones difunde las moléculas en el modo pasivo, lo hace en todas las direcciones, por lo que se requiere un mayor número de moléculas para alcanzar destinos distantes, los tiempos de transmisión son más grandes y utilizan la energía de forma eficiente al usar el movimiento browniano, característico de moléculas en libre dispersión [4],[5]. En contraste, cuando estas comunicaciones se realizan en el modo activo, se envían las moléculas de forma dirigida a un destino definido, lo que permite que puedan llegar a distancias mayores, se use una menor cantidad de estas y se necesite menos energía química [6].

En algunos casos, es necesario usar una fuente externa para generar el movimiento de las moléculas en la propagación activa, a lo cual se le conoce comúnmente como ‘motor molecular’ y ‘utilización de bacterias’ [7]. Un ejemplo que no requiere de una fuente externa es el proceso que se usa para controlar el azúcar en la sangre. En este procedimiento, las hormonas de insulina utilizan el flujo sanguíneo para transportarse y regular la glucosa de las células en el cuerpo humano [5].

La principal ventaja de las comunicaciones moleculares es que muchas de sus funcionalidades se encuentran en la naturaleza, por estar basadas en partículas biológicas. Algunas moléculas que se pueden usar en las transmisiones son las hormonas, los neurotransmisores del sistema endocrino.

Sin embargo, en comparación con otros tipos de comunicación, la CM posee un corto alcance y velocidades extremadamente lentas, aunque en función de los materiales biológicos y el entorno en que se desarrollen, su velocidad puede variar. El único sistema biológico que tiene una gran velocidad de transmisión es el sistema neuronal, el cual es capaz de transportar información hasta a 100 m/s [7].

De forma similar a la comunicación entre dispositivos electrónicos, la CM está estructurada por elementos claves, como el emisor, el canal, el receptor y la información. El cuadro 1 muestra y contrasta algunas de las principales características de ambos tipos de comunicación [2].

Cuadro 1. Telecomunicaciones VS Redes de comunicación molecular.

Características	Telecomunicaciones	Comunicación molecular
Tipos de dispositivos	Electrónicos	Bionanomáquinas
Tipo de señal	Óptica/ eléctrica	Química
Tipo de información	Digital	Química
Alcance de propagación	Metros y kilómetros	Nanómetros y micrómetros
Canal	Cable/aire	Acuoso/aire

Los emisores y receptores en este tipo de redes son nanomáquinas, y pueden ser varias o todas a la vez. Los emisores deben ser capaces de sintetizar, almacenar y enviar la información codificada en moléculas. Una vez que la codificación se realiza, las nanomáquinas inician la propagación de la información. Por su parte, los receptores deben reaccionar a ciertos patrones de modulación de las moléculas para que los mensajes sean decodificados con procesos bioquímicos y la comunicación sea completada de forma efectiva. Así, cuando los receptores detectan una señal, la decodifican y procesan o la reenvían a otras nanomáquinas.

Los contenidos de los mensajes en las comunicaciones electromagnéticas se forman por medio de señales moduladas, en donde cada valor de la modulación representa un símbolo diferente de la codificación utilizada. Este proceso también se debe realizar en la CM, y existen varias maneras de hacerlo. Una forma de efectuar la modulación se basa en agrupaciones de moléculas, es decir, cada símbolo de información es representado como un patrón de agrupación de las moléculas [5].

Metodología

En esta sección se presenta la metodología que se utilizó para realizar la revisión sistemática de literatura. Esta se basa en los elementos claves del protocolo [PRISMA](#) [8] y contempla los pasos que se ilustran en la figura 1.



Figura 1. Metodología.

La metodología contempla dos fases: preparación y análisis. La fase de preparación incluye definir los criterios de elegibilidad de los artículos, identificar las bases de datos en las cuales se realizarán las búsquedas, definir las palabras claves, realizar las búsquedas y seleccionar los artículos usando los criterios de elegibilidad. Por su parte, la etapa de análisis consiste en efectuar la extracción de datos de los artículos, analizarlos, presentar los resultados, efectuar una discusión de estos y realizar las conclusiones del estudio. Las fases mencionadas y cada una de sus tareas se explican en detalle a continuación.

Establecer los criterios de elegibilidad

Las tres pautas que se utilizaron para seleccionar los artículos son el año, el tipo de publicación y el idioma en que fueron escritos.

El periodo de tiempo del estudio no fue limitado, pero una vez que los artículos fueron filtrados se estudiaron los trabajos publicados entre los años 2006 y 2018. En cuanto a los tipos de publicaciones, se consideraron solo artículos completos publicados en *proceedings* de conferencias o *journals*, tanto en inglés como en español. Los artículos que hacen revisiones de las investigaciones realizadas, como los *survey*, también fueron incluidos en el análisis.

Identificar las bases de datos

Las bases de datos que fueron seleccionadas son las siguientes librerías digitales:

- Google Scholar
- IEEE Xplorer
- Science Direct

La ventaja de utilizar Google Scholar es que indexa artículos de un gran número de editores y otras bases de datos, y también ofrece el texto completo de algunas investigaciones. Sin embargo, en algunas ocasiones, la gran cantidad de resultados que se obtienen mezcla trabajos relevantes con aquellos que no lo son. El uso de esta plataforma es de gran utilidad para hacer búsquedas iniciales e identificar trabajos relevantes.

Por su parte, IEEE Explorer es la base de datos de las publicaciones que realiza el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos ([IEEE](http://www.ieee.org)), por lo que su contenido es especializado y un gran número de las investigaciones en el tema de las redes moleculares son publicadas por este organismo. Los trabajos disponibles en esta biblioteca digital, en su mayoría, han pasado por un proceso de revisión exhaustivo y son arbitradas, lo que asegura un alto nivel de calidad.

El caso de Science Direct es similar al de IEEE Explorer, aunque también almacena publicaciones de áreas diferentes a las redes de comunicación y la computación. El tipo de publicaciones que se pueden acceder mediante este portal es de muy alta calidad, por la rigurosidad y factor de impacto de la mayoría de *journals* que la utilizan como medio de acceso a sus artículos.

Cabe mencionar, que esta plataforma es gestionada por Elsevier, una de las editoriales más grandes y de mayor prestigio, lo que la hace un punto de referencia para realizar búsquedas bibliográficas.

La última fecha en la que se realizaron búsquedas de documentos para esta revisión fue el 24 de marzo de 2019.

Definir las palabras claves

Las frases y palabras utilizadas para realizar las búsquedas fueron redes moleculares, *molecular networks*, comunicación molecular y *molecular communication*.

Seleccionar artículos

Para realizar las búsquedas se utilizaron las opciones que ofrecen las bases de datos mencionadas. El proceso que se sigue para las tres es muy similar, y a continuación se muestran como ejemplo, los pasos realizados para hacer las consultas en la plataforma de IEEE Xplore:

- Se ingresó al sitio web de IEEE Xplore.
- Se seleccionó la opción *All* en el área de búsqueda.
- Se ingresó la frase *Molecular communication*.
- Se escogió la opción *All Results* en el cuadro *Show*.

El resultado que se obtuvo con esta búsqueda es el siguiente:

- 2.397 artículos de conferencias.
- 15 cursos.
- 815 artículos de *journals* y *magazines*.
- 6 libros.
- 29 artículos categorizados como de acceso temprano.
- 5 estándares.

Selección de los estudios

Los resultados obtenidos en las búsquedas son generales para los criterios utilizados, por lo que se realizó el filtrado de los documentos, usando los criterios de elegibilidad establecidos.

El proceso de selección inició con 3.267 documentos que coincidían con las palabras claves en las búsquedas. Luego, se aplicaron los filtros especificados en los criterios; se descartaron varios artículos que abordaban el tema de forma muy general y se centraban en describir partes de la comunicación, fundamentos y generalidades; y el resultado se redujo a 36 trabajos de investigación. El conjunto final de artículos para el estudio es de 28 artículos.

Extraer datos

Este es el primer paso para realizar el análisis de los artículos, una vez que fueron seleccionados los que serían incluidos en el estudio. La recopilación de información se realizó usando una hoja de cálculo a partir de la revisión cuidadosa de cada investigación. Los datos recopilados por trabajo fueron los siguientes:

- Título del artículo.
- Idioma en que fue escrito.
- Fecha de publicación.

- Tipo de artículo.
- Disciplina del trabajo de investigación.
- Aplicación de las comunicaciones moleculares.
- País de origen de las universidades de los autores.
- Autores del trabajo.
- Cantidad de autores.
- Número de páginas del documento.
- Cantidad de referencias bibliográficas.
- Fuente (e.g., base de datos, revista o conferencia).
- Palabras claves.
- Contribuciones de la investigación.
- Resumen.

Analizar artículos de forma colegiada

El análisis de cada artículo fue realizado por dos investigadores, para disminuir el riesgo de sesgo [9], [10]. Esta evaluación consiste tanto en hacer una doble revisión de la pertinencia del trabajo, como en discutir los principales aspectos relacionados con la información que se extrae de estas publicaciones. Posteriormente a esto, se les aplicó un filtro adicional utilizando la técnica de Cohen's Kappa [9], con el fin de reducir el sesgo durante la elección final de las investigaciones por considerar. En síntesis, los siguientes fueron los pasos aplicados:

- La información de cada artículo es recopilada por dos investigadores.
- Cada investigador analiza la pertinencia del artículo por separado y extrae la información mencionada en el punto anterior.
 - Si ambos investigadores coinciden en la pertinencia y el análisis, aprueban la inclusión del artículo y unifican la síntesis realizada.
 - Si alguno de los investigadores no coincide en la pertinencia o existen discrepancias en el análisis del contenido, un tercer investigador realiza el arbitraje y emite el criterio para llegar a un acuerdo.
- Los artículos pertinentes y la síntesis integrada de sus análisis son incorporados en otra hoja de cálculo.

En las siguientes secciones se presentan los resultados del análisis y su discusión, y se llevan a cabo las conclusiones del estudio.

Resultados

Los resultados presentados en esta sección corresponden a la evaluación y síntesis de los 28 artículos seleccionados del periodo comprendido entre los años 2006 y 2018. Los aspectos que se abarcan incluyen... y se muestran a continuación.

Idioma en que fueron escritos los artículos

El 96% de los artículos estudiados se encuentran en inglés, mientras que solo el 4% está en español, lo que representa que 27 trabajos se encuentran escritos en el primer idioma y solamente uno se encuentra en español.

Idioma en que fueron escritos los artículos

El 96% de los artículos estudiados se encuentran en inglés, mientras que solo el 4% está en español, lo que representa que 27 trabajos se encuentran escritos en el primer idioma y solamente uno se encuentra en español.

Tipo de artículo

La totalidad de los trabajos que fueron considerados son artículos completos (i.e., *full papers*), de los cuales 22 (79%) fueron publicados por revistas (i.e., *journals*), 6 (21%) en *proceedings* de conferencias y 2 eran del tipo *survey*. Estos últimos fueron incluidos porque realizan diversos tipos de análisis [11] sobre la aplicación de la CM en diferentes áreas.

Fechas de publicación

El periodo de búsqueda de los artículos no se delimitó a un rango de tiempo, pero una vez que fueron filtrados, el resultado se encontró entre el año 2006 y el 2018. En los últimos años existe una tendencia creciente a realizar investigaciones en CM, y el año con mayor concentración es el 2018.

La evolución de la comunicación molecular a lo largo de las últimas dos décadas se divide en tres generaciones. En la primera generación se sentaron las bases, y comprende del año 2002 al 2009. Luego, la segunda generación amplía la investigación sobre el tema para incluir enfoques teóricos y problemas de capa física, y va del año 2009 al 2013. Por último, la tercera generación, con artículos desde el año 2013 hasta el 2018, continuaron el seguimiento con problemas de capas superiores, aplicaciones y opciones de interconectar con redes macro, por ejemplo, internet [12].

Disciplinas y aplicaciones de la CM

Las investigaciones sobre comunicaciones moleculares se han venido realizando desde hace poco más de 15 años, pero es hasta en años recientes que se han enfocado en su aplicación a problemas concretos. De acuerdo con el análisis efectuado, las disciplinas en las cuales se ha aplicado más frecuentemente esta nanotecnología son la medicina, el ambiente y la industria.

Algunos de los artículos estudiados se refieren a la aplicación en varias disciplinas. Así, 17 trabajos hacen referencia a la aplicación de la CM en la medicina, 14 investigaciones se refieren a la industria y 3 al ambiente. En el cuadro 2 se muestran las diferentes áreas concretas de estas disciplinas en las cuales se ha aplicado la CM.

En general, las áreas en las cuales se han utilizado las comunicaciones moleculares son diversas (20 en total), de acuerdo con el análisis efectuado y los resultados que se muestran en la tabla II. Las que concentran más investigaciones son el monitoreo del estado de salud de las personas, la entrega dirigida de medicamentos y el uso de nanoredes en entornos industriales; no obstante, otras áreas, como la implementación de laboratorios en un nanochip, las redes moleculares intracorporales y el control de desechos y contaminación también tienen gran importancia.

Cuadro 2. Principales aplicaciones en los artículos analizados.

Aplicaciones	Disciplina	Referencias
Laboratorio de un nanochip	Medicina	[13],[14],[7],[15]
Monitoreo de la salud	Medicina	[7],[13],[16],[17],[14],[18],[19]
Nanomedicina	Medicina	[20]
Nanoredes moleculares intracorporales	Medicina	[21],[22],[12],[23]
Ingeniería de tejidos	Medicina	[7],[15]
Mejorar sistema inmunológico	Medicina	[5],[15]
Entrega dirigida de medicamentos	Medicina	[13],[14],[7],[5],[24],[3],[25],[3]
Monitoreo del ambiente	Ambiente	[7]
Control de desechos y contaminación	Ambiente	[7],[26],[25]
Aplicaciones de manufactura	Ambiente	[7],[25]
Soluciones industriales con nanoredes	Industria	[27],[28],[29],[30],[31],[32]
Envío de mensaje corto	Industria	[33]
Internet de las cosas (IoT)	Industria	[15],[27]
Internet del Bionano Thing (IBoT)	Industria	[17]
Modelización farmacocinética	Industria	[34]
Estimación de la biodistribución	Industria	[34]
Detección de partículas	Industria	[35]
Computación molecular	Industria	[26][36]
Seguridad y privacidad	Industria	[37]

Procedencia de los artículos

La información del país de origen de los autores no se puede extraer a partir de la información que se consigna en los artículos, por lo que esta información no se incluye en el análisis. Las universidades de procedencia de los investigadores permiten dar seguimiento a las tendencias de investigación de los países.

La información en la figura 2 muestra que los investigadores con mayor interés en realizar trabajos sobre comunicaciones moleculares proceden de universidades de Estados Unidos, seguidos por quienes están relacionados con universidades chinas, japonesas, turcas y británicas.

Un aspecto que por lo general no se toma en cuenta al examinar la producción científica de los países es la relación entre el número de publicaciones y los habitantes. Así, podría inferirse que la cantidad de publicaciones realizadas por países con alta densidad de población como China, no son significativas en relación con el volumen de sus habitantes.

Total de autores

Los investigadores que participaron en las publicaciones son 71, y quienes tienen mayor participación son Tadashi Nakano y Tatsuya Suda, de origen asiático (ver Figura 3). Esto contrasta con la posición predominante de Estados Unidos, según la ubicación geográfica de las universidades en las cuales se originan los artículos.

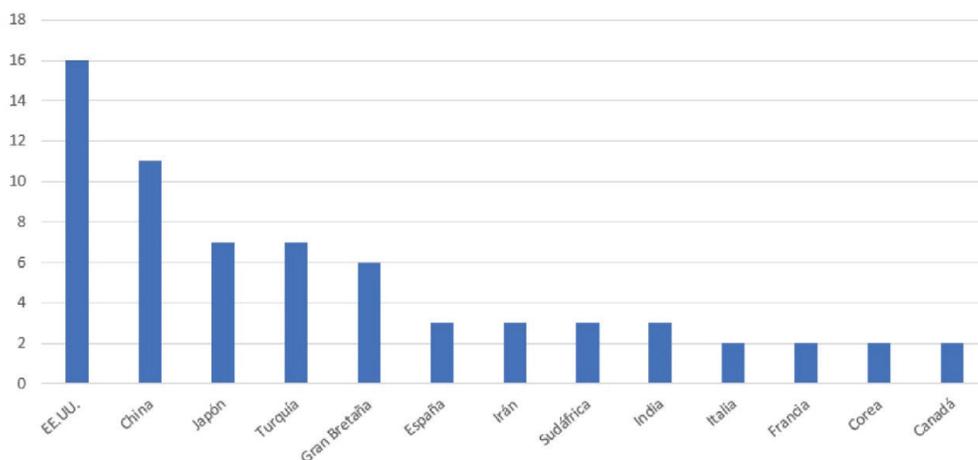


Figura 2. Número de artículos por país de procedencia de las universidades.

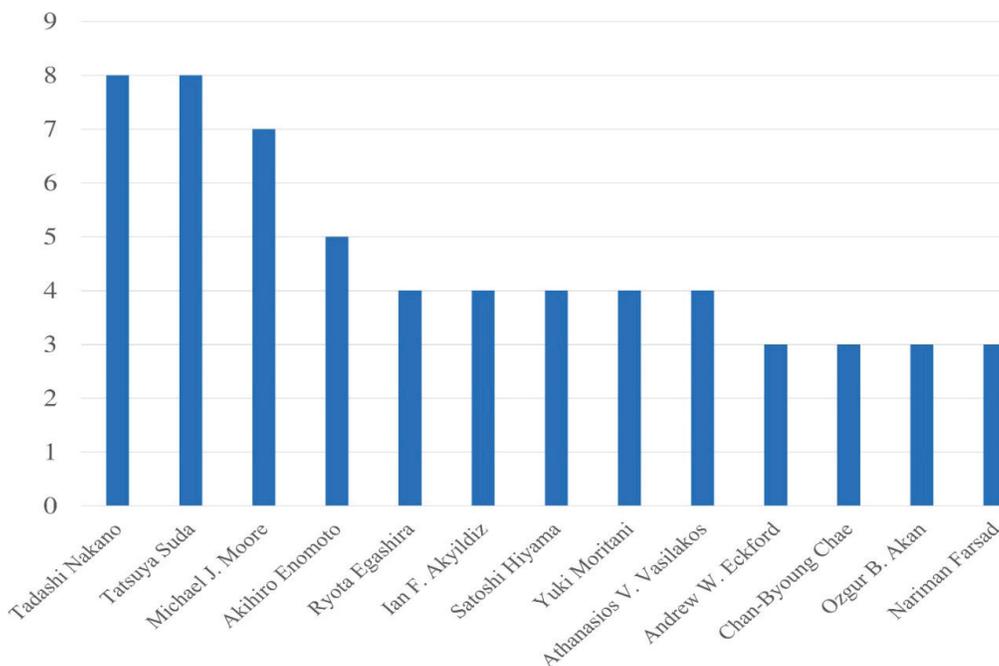


Figura 3. Cantidad de artículos por autor.

El caso de Tatsuya Suda es sobresaliente, porque su registro de investigaciones data del año 1980 en diferentes ramas de las redes de comunicación, y su nombre aparece asociado hasta después del 2005 con trabajos relacionados con las comunicaciones moleculares. En cuanto a la mayoría de los autores --55 en total--, de acuerdo con la información recopilada, estos aparecen asociados a solo una publicación.

Autores por artículo

La cantidad de autores por artículo es un factor importante, debido al crédito que se otorga a quienes participaron directamente en una investigación [38]. Aunque no existe un número límite de investigadores por artículo, generalmente se toma como referencia el promedio de autores que hacen las publicaciones sobre un tema. El número de autores también es relevante según la complejidad de la investigación y en algunas universidades se pondera el factor de impacto

y el número de autores de la publicación para acreditar la actividad de sus investigadores. La mayoría de los artículos cuenta con 2 o más autores, y es predominante la participación de 2 a 3 investigadores en trabajos de comunicaciones moleculares.

Páginas por publicación

En el caso de los resultados obtenidos en este estudio, el tamaño de la mayoría de los artículos es de menos de 20 páginas.

Referencias bibliográficas

El número de referencias de los artículos depende de la naturaleza de la investigación, pero por lo general esta sección se extiende en un 12% del contenido total del artículo [39], lo cual representa en promedio 42 referencias por publicación. En el caso del estudio efectuado, el número de referencias es variable y oscila entre las 10 y las 103, aunque el promedio es de 70, con una concentración mayoritaria en 9 de los trabajos.

Fuentes de las publicaciones

Las conferencias y journals de la IEEE concentran el 6% (18 de 28) de las publicaciones estudiadas; y entre las editoriales destaca Elsevier, con un 19% de los trabajos. El *journal* que concentra más publicaciones es *IEEE Transactions on Nanobioscience* (14%), seguido por *Nano Communication Networks* (11%), mientras que la conferencia más representativa es la IEEE Annual Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (11%).

Discusión

Un patrón predominante en los artículos es la redacción descriptiva y estructurada, lo cual se puede deber a que en su mayoría contemplan fundamentos teóricos y modelos matemáticos sobre comunicaciones moleculares. Algunos de los trabajos comienzan haciendo una exposición sobre el estudio de las comunicaciones en las células, mientras que otros se concentran en el estudio de la capa física con diferentes modelos de propagación. Además, varios trabajos también exponen detalles sobre los componentes que se requieren para efectuar este tipo de comunicaciones, y discuten sobre sus ventajas y desventajas.

El papel predominante de las investigaciones sobre las aplicaciones de esta tecnología en la medicina se debe a la necesidad de ofrecer nuevos tratamientos a los pacientes, para combatir distintos tipos de enfermedades, principalmente debido a las posibilidades que ofrece la nanotecnología para intervenir en partes del organismo donde no se puede acceder en cirugías ordinarias. Algunas áreas de la medicina en las cuales se están utilizando las comunicaciones moleculares son la ingeniería de tejidos [13], [15], la inmunología, el seguimiento de factores de riesgo en la salud y la entrega dirigida de medicamentos.

La entrega dirigida de medicamentos contempla mecanismos que hacen uso de las comunicaciones moleculares. De acuerdo con las investigaciones estudiadas, por ejemplo, se están usando técnicas para encapsular fármacos en nanovectores (e.j. liposomas, micelas, dendrímeros) que son enviados a través del sistema cardiovascular sin afectar las células y también se están suministrando medicamentos con la ayuda de moléculas portadoras, como las hormonas. En la entrega dirigida avanzada de medicamentos, además se combina el monitoreo, diagnóstico y control de enfermedades para profundizar su alcance [3].

En el ámbito de la salud, los científicos también están explorando métodos para mitigar los efectos secundarios que pueden ocasionar ciertos fármacos. En este contexto, las CM pueden contribuir a la implementación de medicamentos amigables con los sistemas biológicos del

cuerpo humano [40]. Este tipo de métodos buscan aplicar fármacos que incluyan en su mezcla compuestos químicos que actúen como factores preventivos en caso de que ocurra un efecto secundario en la persona. Lo que se pretende es disminuir las secuelas de los tratamientos, debido a que todos los organismos son diferentes y no tienen la misma reacción a los medicamentos.

La aplicación de las CM en el área ambiental está relacionada con la detección de virus y enfermedades, y la entrega de fertilizantes y pesticidas de forma localizada y distribuida. Este tipo de uso puede ser de gran utilidad no solo para el ambiente y la medicina, sino también para crear dispositivos de defensa contra armas químicas en el ámbito de la defensa militar.

En cuanto a las CM en la industria, uno de los artículos describe un experimento para enviar mensajes cortos haciendo uso de un *spray* y un ventilador. Los elementos que utilizaron son de bajo costo, con la intención de que el experimento pueda ser reproducido por otros investigadores [33].

En el área computacional, las CM tienen un futuro prometedor, por las posibilidades de emplearlas en *Internet of NanoThings* (IoNT) e *Internet of BioNanoThings* (IoBNT), pero además porque podrían interactuar con redes convencionales y el internet de las cosas [13], [15], [27].

Las CM, al igual que las telecomunicaciones electrónicas, tienen vulnerabilidades de seguridad que pueden ser aprovechadas por diferentes amenazas o ataques, tales como la congestión o saturación del medio, agotamiento de paquetes o inundaciones y colisiones [37]. Lo anterior puede causar grandes perjuicios si están siendo utilizadas por dispositivos médicos, que sufren problemas de entrega de mensajes y pérdida de información. Esto hace crítico que las investigaciones sobre CM aborden el tema de la seguridad, para disminuir el riesgo a niveles aceptables y que garanticen su funcionamiento en áreas sensibles, como la medicina, la industria y el ambiente.

Conclusiones

La nanociencia y la nanotecnología en combinación con la comunicación molecular demuestran tener un potencial importante en áreas de gran impacto para el ser humano, como la medicina. Este tipo de tecnología promete contribuir en el mediano plazo a la prevención, detección y cura de enfermedades, y también a la disminución de los efectos secundarios de algunos medicamentos. Además, se espera que realice aportes a diferentes campos, tales como el ambiente y la industria alimentaria.

Este trabajo de investigación ha permitido realizar una síntesis de las aplicaciones sobre las cuales se han realizado investigaciones en este ámbito, con el fin de ofrecerles una introducción al tema a aquellas personas interesadas en realizar estudios en esta área. En general, la revisión realizada ha permitido explorar tanto los conceptos básicos sobre las comunicaciones moleculares, como sus aplicaciones; además del estado general en que se encuentra esta tecnología en el momento de este trabajo.

En general, el trabajo efectuado permite inferir que el impulso de las comunicaciones moleculares, y de forma derivada la nanotecnología, se debe a las fuertes inversiones de capital en campos relacionados con la medicina. Las investigaciones futuras sobre este tema se orientan, de acuerdo con los artículos analizados, a la implementación de aplicaciones de las CM para favorecer la vida diaria de las personas.

El desarrollo de las comunicaciones moleculares requiere esfuerzos de investigadores de diferentes disciplinas, como la biología, la química, la medicina, las ciencias de la computación y la electrónica. El aporte de diferentes puntos de vista permitirá su avance de forma más rápida e integral, así como su profundización y la atracción de mayores fuentes de financiamiento para hacer investigaciones.

Referencias

- [1] F. Allhoff, P. Lin, and D. Moore, *What Is Nanotechnology and Why Does It Matter?: From Science to Ethics*. Wiley, 2010.
- [2] T. Nakano, A. W. Eckford, and T. Haraguchi, *Molecular Communication*. Cambridge University Press, 2013.
- [3] U. A. K. Chude-Onkonkwo, R. Malekian, B. T. Maharaj, and A. V. Vasilakos, "Molecular communication and nanonetwork for targeted drug delivery: A survey," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 19, no. 4, p. 3046–3096, 2017.
- [4] M. A. Wilson, A. Pohorille, and L. R. Pratt, "Molecular dynamics test of the brownian description of na motion in water," Dec 1985.
- [5] H. Yan, G. Chang, T. Sun, Y. Xu, Z. Ma, T. Zhou, and L. Lin, "Molecular communication in nanonetworks," *Nano Biomedicine and Engineering*, vol. 8, no. 4, Dec 2016.
- [6] A. Noel, "Modeling and analysis of diffusive molecular communication systems," Ph.D. dissertation, University of British Columbia, 2015.
- [7] T. Nakano, M. J. Moore, F. Wei, A. V. Vasilakos, and J. Shuai, "Molecular communication and networking: Opportunities and challenges," *IEEE Transactions on NanoBioscience*, vol. 11, no. 2, p. 135–148, 2012.
- [8] D. Moher, A. Liberati, J. Tetzlaff, and D. G. Altman, "Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The prisma statement," *Journal of Clinical Epidemiology*, vol. 62, no. 10, p. 1006–1012, July 2009.
- [9] J. Cohen, "A coefficient of agreement for nominal scales," *Educational and Psychological Measurement*, vol. 20, no. 1, p. 37–46, Apr 1960.
- [10] P. Watson and A. Petrie, "Method agreement analysis: A review of correct methodology," *Theriogenology*, vol. 73, no. 9, p. 1167–1179, 2010.
- [11] B. Clark, J. Sitzia, K. Kelley, and V. Brown, "Good practice in the conduct and reporting of survey research," *International Journal for Quality in Health Care*, vol. 15, no. 3, pp. 261–266, 05 2003. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1093/intqhc/mzg031>
- [12] T. Suda and T. Nakano, "Molecular communication: A personal perspective," *IEEE Transactions on NanoBioscience*, vol. 17, no. 4, p. 424–432, 2018.
- [13] Y. Moritani, S. Hiyama, and T. Suda, "Molecular communication for health care applications." 01 2006, pp. 549–553.
- [14] Y. Moritani, S. S. Hiyama, and T. Suda, "Molecular communication for health care applications," *Fourth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOMW06)*, Jan 2006.
- [15] T. Nakano, T. Suda, Y. Okaie, M. J. Moore, and A. V. Vasilakos, "Molecular communication among biological nanomachines: A layered architecture and research issues," *IEEE Transactions on NanoBioscience*, vol. 13, no. 3, pp. 169–197, 2014.
- [16] R. A. Quinn, L.-F. Nothias, O. Vining, M. Meehan, E. Esquenazi, and P. C. Dorrestein, "Molecular networking as a drug discovery, drug metabolism, and precision medicine strategy," *Trends in Pharmacological Sciences*, vol. 38, no. 2, pp. 143 – 154, 2017.
- [17] O. B. Akan, H. Ramezani, T. Khan, N. A. Abbasi, and M. Kuscu, "Fundamentals of molecular information and communication science," *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 2, pp. 306–318, Feb 2017.
- [18] L. P. Gin'e and I. F. Akyildiz, "Molecular communication options for long range nanonetworks," *Computer Networks*, vol. 53, no. 16, p. 2753–2766, Aug 2009.
- [19] T. Nakano, M. Moore, A. Enomoto, and T. Suda, *Molecular Communication Technology as a Biological ICT*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 49–86. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-642-15102-6_2
- [20] B. Atakan, O. B. Akan, and S. Balasubramaniam, "Body area nanonetworks with molecular communications in nanomedicine," *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. 1, pp. 28–34, January 2012.

- [23] Q. H. Abbasi, K. Yang, N. Chopra, J. M. Jornet, N. A. Abuali, K. A. Qaraqe, and A. Alomainy, "Nano-communication for biomedical applications: A review on the state-of-the-art from physical layers to novel networking concepts," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 3920–3935, 2016.
- [21] T. Suda, M. Moore, T. Nakano, R. Egashira, and A. Enomoto, "Exploratory research on molecular communication between nanomachines," in *Proceedings of the ACM Conference on Genetic and Evolutionary Computation (GECCO 2005)*, 2005.
- [22] D. Malak and O. B. Akan, "Molecular communication nanonetworks inside human body," *Nano Communication Networks*, vol. 3, no. 1, pp. 19 – 35, 2012.
- [24] E. R., E. A., H. S., M. M., M. Y., N. T., and S. T., "Molecular communication," *TechConnect Briefs*, vol. 3, pp. 391 – 394, May. 2005.
- [25] M. Zambrano, "Comunicación molecular," *PRISMA Tecnológico*, vol. 6, no. 1, 2015.
- [26] N. Farsad, H. B. Yilmaz, A. Eckford, C.-B. Chae, and W. Guo, "A comprehensive survey of recent advancements in molecular communication," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 18, no. 3, p. 1887–1919, Feb 2016.
- [27] A. Galal and X. Hesselbach, "Nano-networks communication architecture: Modeling and functions," *Nano Communication Networks*, vol. 17, pp. 45 – 62, 2018.
- [28] G. K. Walia, D. K. K. Randhawa, and K. S. Malhi, "A brief survey on molecular communications in nanonetworks," in *2016 International Conference on Computational Techniques in Information and Communication Technologies (ICCTICT)*, March 2016, pp. 343–348.
- [29] M. Moore, A. Enomoto, T. Nakano, R. Egashira, T. Suda, A. Kayasuga, H. Kojima, H. Sakakibara, and K. Oiwa, "A design of a molecular communication system for nanomachines using molecular motors," in *Fourth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOMW'06)*, March 2006, pp. 6 pp.–559.
- [30] A. Gohari, M. Mirmohseni, and M. Nasiri-Kenari, "Information theory of molecular communication: directions and challenges," *IEEE Transactions on Molecular, Biological and Multi-Scale Communications*, vol. 2, no. 2, pp. 120–142, Dec 2016.
- [31] S. Hiyama, Y. Moritani, T. Suda, R. Egashira, A. Enomoto, M. Moore, and T. Nakano, "Molecular communication," *TechConnect Briefs*, vol. 3, pp. 391 – 394, 5 2008.
- [32] W. Guo, T. Asyhari, N. Farsad, H. B. Yilmaz, B. Li, A. Eckford, and C. Chae, "Molecular communications: channel model and physical layer techniques," *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, no. 4, pp. 120–127, August 2016.
- [33] N.-R. Kim, N. Farsad, C.-B. Chae, and A. W Eckford, "A realistic channel model for molecular communication with imperfect receivers," 06 2014, pp. 1–6.
- [34] Y. Chahibi, M. Pierobon, and I. F. Akyildiz, "Pharmacokinetic modeling and biodistribution estimation through the molecular communication paradigm," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 62, no. 10, pp. 2410–2420, Oct 2015.
- [35] I. Akyildiz, F. Fekri, R. Sivakumar, C. Forest, and B. Hammer, "Monaco: fundamentals of molecular nano-communication networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 19, no. 5, p. 12–18, Oct 2012.
- [36] I. F. Akyildiz and J. M. Jornet, "Electromagnetic wireless nanosensor networks," *Nano Communication Networks*, vol. 1, no. 1, pp. 3 – 19, 2010.
- [37] V. Loscri, C. Marchal, N. Mitton, G. Fortino, and A. V. Vasilakos, "Security and privacy in molecular communication and networking: Opportunities and challenges," *IEEE Transactions on NanoBioscience*, vol. 13, no. 3, pp. 198–207, Sep. 2014.
- [38] L. Artilles Visbal, "El artículo científico," *Revista Cubana de Medicina General Integral*, vol. 11, pp. 387 – 394, 08 1995.
- [39] F. J. M. y Cynthia Martínez-Garrido y Guillermina Belavi, "Sugerencias para escribir un buen artículo científico en educación," REICE. *Revista Iberoamericana sobre Calidad, Eficacia y Cambio en Educación*, vol. 15, no. 3, 2017.
- [40] R. Langer, "Where a pill won't reach," *Scientific American*, vol. 288, pp. 50–7, 05 2003.

Producción de chile dulce en invernadero: correlación entre densidad de siembra y variables de rendimiento

Sweet pepper production under greenhouse conditions: correlation among plant density and yield variables

José Eladio Monge-Pérez¹, Michelle Loría-Coto²

Fecha de recepción: 4 de febrero de 2020

Fecha de aprobación: 28 de abril de 2020

Monge-Pérez, J.E; Loría-Coto, M. Producción de chile dulce en invernadero: correlación entre densidad de siembra y variables de rendimiento. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-2. Abril-Junio 2021. Pág 161-177.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i2.4983>



- 1 Ingeniero agrónomo, Investigador de la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Universidad de Costa Rica, Costa Rica. Correo electrónico: melonescr@yahoo.com.mx
- 2 Economista agrícola, Investigadora de la Escuela de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Estatal a Distancia, Costa Rica. Correo electrónico: michelle_loria@yahoo.com

Palabras clave

Capsicum annuum; poda; peso del fruto; calidad; correlación de Pearson; regresión lineal.

Resumen

Se establecieron correlaciones de Pearson en chile dulce (*Capsicum annuum*) cv. FBM-9, cultivado bajo condiciones de invernadero, utilizando dos tipos de poda (española y holandesa), entre la densidad de siembra y las siguientes variables: número de frutos por planta y por metro cuadrado, peso del fruto (g), y rendimiento total y comercial (ton/ha). El cultivo se manejó con fertirrigación, en sustrato de fibra de coco. Se presentaron 10 correlaciones de Pearson con significancia estadística ($p \leq 0,05$), en cuyo caso se obtuvieron las regresiones lineales. Independientemente del tipo de poda, se obtuvo una correlación significativa entre la densidad de siembra y: número de frutos de calidad de rechazo por planta ($r = -0,55^{**}$); número de frutos de primera calidad por metro cuadrado ($r = 0,58^{**}$); rendimiento total ($r = 0,42^*$); rendimiento de primera calidad ($r = 0,65^{**}$); y rendimiento comercial ($r = 0,43^*$). Además, únicamente para los tratamientos con poda española, se halló una correlación significativa entre la densidad de siembra y: número de frutos de segunda calidad por planta ($r = -0,59^*$); peso del fruto ($r = 0,76^{**}$); y peso del fruto de primera calidad ($r = 0,62^*$). Se concluye que el uso de una mayor densidad de siembra es lo más beneficioso para los productores, desde el punto de vista económico. Se recomienda ensayar densidades de siembra superiores a las incluidas en esta investigación (2,60-3,90 plantas/m²), para definir una densidad óptima.

Keywords

Capsicum annuum; pruning; fruit weight; quality; Pearson correlation; linear regression.

Abstract

For sweet pepper (*Capsicum annuum*) cv. FBM-9 grown under greenhouse conditions and using two pruning systems (Spanish and Dutch), the researchers estimated Pearson correlations among plant density and the following variables: number of fruits per plant and per square meter, fruit weight (g), and total and commercial yield (ton/ha). The crop was planted on coconut fiber as substrate, and managed with fertigation. There were 10 statistically significant Pearson correlations ($p \leq 0,05$). In those cases the linear regression statistics were calculated. Independently of pruning system, there was significant correlation between plant density and: number of noncommercial fruits per plant ($r = -0,55^{**}$); number of first quality fruits per square meter ($r = 0,58^{**}$); total yield ($r = 0,42^*$); first quality yield ($r = 0,65^{**}$); and commercial yield ($r = 0,43^*$). Furthermore, only for Spanish pruning treatments there was significant correlation between plant density and: number of second quality fruits per plant ($r = -0,59^*$); fruit weight ($r = 0,76^{**}$); and first quality fruit weight ($r = 0,62^*$). It is concluded that the use of a higher plant density is the best option for growers, from an economical point of view. It is recommended to evaluate higher plant densities than those used in this trial (2,60-3,90 plants/m²), to determine the optimum plant density.

Introducción

El chile dulce (*Capsicum annuum* L.) es una de las principales hortalizas que se cultivan en Costa Rica; pertenece a la familia Solanaceae, y es un importante cultivo bajo invernadero en muchos países [1]. En el año 2009 en Costa Rica existían alrededor de 41 hectáreas de chile dulce y tomate cultivadas bajo ambientes protegidos [2] [3].

En chile dulce, una baja densidad de siembra aumenta la producción por planta, pero disminuye la producción por unidad de área [4] [5] [1], debido a que la densidad de siembra afecta la intercepción de la luz por parte del cultivo, y es un factor que puede ser utilizado para mejorar el rendimiento de frutos por unidad de área [5] [1].

El peso (y por ende, el tamaño) del fruto de chile dulce es una variable muy importante, pues determina el precio del producto, ya que los frutos más grandes tienen mayor precio [4] [1]. Una forma de optimizar la producción comercial de chile dulce por unidad de área es mediante la combinación apropiada de densidad de siembra y sistema de poda [6] [7] [1].

El coeficiente de correlación es una herramienta estadística que generalmente muestra relaciones entre caracteres independientes, y el grado de relación lineal entre esas características. En la investigación en fitomejoramiento, por lo general se toman medidas de varios caracteres o variables a partir de la misma planta. Para determinar el grado y la dirección de las relaciones lineales que corresponden a esas mediciones, se utiliza el análisis de correlación simple [8].

La capacidad productiva en chile dulce es una característica compleja, que resulta de varios componentes morfológicos: número de flores, tamaño del fruto, grosor de la pared del fruto (pericarpio), peso del fruto; todos estos caracteres son específicos de cada genotipo, y son altamente influenciados por las condiciones de crecimiento y desarrollo. El chile dulce presenta una alta variabilidad de caracteres, y pocas correlaciones entre ellos. El establecimiento de correlaciones entre caracteres, y el grado de su influencia recíproca, es muy útil en los procesos de selección genética. El conocimiento de las correlaciones ofrece la posibilidad de evaluar los caracteres complejos, mediante la evaluación de los caracteres menos complejos [9].

En la India, unos investigadores encontraron que, en el caso del chile dulce, la longitud del fruto, el ancho del fruto, y el número de frutos por planta, mostraron una correlación positiva significativa con el rendimiento [10]. Otros investigadores también han realizado investigación en la correlación de variables en esta hortaliza [8] [11] [12] [9].

El objetivo de esta investigación fue evaluar las correlaciones de Pearson entre la densidad de siembra y las variables de rendimiento, en el híbrido F-1 de chile dulce denominado FBM-9, cultivado bajo condiciones de invernadero, utilizando dos tipos de poda (española y holandesa).

Materiales y métodos

El trabajo se desarrolló en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno (EEAFBM) de la Universidad de Costa Rica, que está ubicada a 10° 1' latitud Norte y 84° 16' longitud Oeste, en el distrito San José del cantón Central de Alajuela, Costa Rica, a una altitud de 883 msnm, con una precipitación anual promedio de 1940 mm (distribuida de mayo a noviembre), y una temperatura anual promedio de 22 °C.

El ensayo se realizó en un invernadero modelo XR (Richel, Francia), tipo multicapilla, con techo de plástico, con ventilación cenital automática, y con un sistema de riego por goteo para brindar agua y nutrientes al cultivo.

Se cultivó el híbrido F-1 de chile dulce (*Capsicum annuum* L.) denominado FBM-9, cuyos frutos presentan forma cónica y un color rojo a la madurez. El almácigo se sembró el 30 de junio de 2010, en bandejas plásticas de germinación de 128 alvéolos; se usó como sustrato una mezcla de fibra de coco molida (50%) y abono orgánico (50%). El trasplante se llevó a cabo el 7 de agosto del mismo año. Las plántulas se sembraron en sacos plásticos de 1 m de largo, 22 cm de ancho y 22 cm de altura, rellenos con fibra de coco molida. Se evaluaron dos tipos de poda y tres densidades de siembra, para un total de seis tratamientos (cuadro 1).

La poda holandesa consiste en dirigir la planta a dos guías, eliminando posteriormente una de las dos bifurcaciones en que se va dividiendo cada rama [13] [14] [1]; y la poda española consiste en dejar la planta a libre crecimiento [6] [1] [3]. El día 14 de setiembre de 2010 se realizó la poda holandesa por primera vez, y luego se continuó aplicando en forma periódica. Las densidades de siembra de 2,60; 3,25; y 3,90 plantas/m², corresponden a cuatro, cinco y seis plantas por metro lineal (cada saco), respectivamente; es decir, una distancia entre plantas de 25,00; 20,00; y 16,67 cm, respectivamente, y una distancia entre hileras de 1,54 m.

Cuadro 1. Tratamientos evaluados en el ensayo.

Tratamiento	Tipo de poda	Densidad de siembra (plantas/m ²)
1	Española	2,60
2	Española	3,25
3	Española	3,90
4	Holandesa	2,60
5	Holandesa	3,25
6	Holandesa	3,90

A los 79 ddt se realizó la primera cosecha, y la última cosecha se hizo el 6 de abril de 2011 (242 ddt). El punto de cosecha correspondió al momento en que los frutos mostraban al menos un 50 % de coloración roja en la epidermis. Los frutos cosechados se clasificaron de acuerdo a los parámetros de calidad que se muestran en el cuadro 2.

Cuadro 2. Parámetros de calidad utilizados en el ensayo.

Parámetro	Categoría de calidad		
	Primera	Segunda	Rechazo
Longitud del fruto	Igual o mayor a 12 cm	Entre 6 y 12 cm	Menor a 6 cm
Forma del fruto	Cónica normal	Frutos "curvados"	Frutos deformes
Presencia de manchas, cicatrices, o quema de sol	Ninguna	No mayores a 1 cm ²	Mayores a 1 cm ²
Estrías o grietas	Ninguna	No mayores a 3 cm	Mayores a 3 cm
Daño por plagas o enfermedades	Ninguno	Ninguno	Presente

En el invernadero se contó con sensores de temperatura y humedad relativa, y los datos de dichas variables se registraron en un equipo de colecta de datos.

Se evaluaron las siguientes variables:

1. Número de frutos por planta y por metro cuadrado: se realizó la sumatoria de los frutos obtenidos por parcela para cada categoría de calidad, a lo largo del ciclo productivo, y luego se dividió ese dato entre el número de plantas por parcela. Con base en este resultado y en la densidad de siembra, se calculó el número de frutos por metro cuadrado.
2. Peso del fruto (g): se determinó mediante una sumatoria del peso de todos los frutos registrados durante todas las cosechas, y luego se dividió entre el número de frutos totales; esta variable se determinó para cada categoría de calidad del fruto. Para la evaluación de esta característica, se utilizó una balanza electrónica marca Ocony, modelo TH-I-EK, con una capacidad de 5000,0 ± 0,1 g.

- Rendimiento por área (ton/ha): para cada categoría de calidad del fruto, se calculó el rendimiento a partir del peso de los frutos cosechados por parcela y de la densidad de siembra. El rendimiento comercial se calculó sumando el peso de la producción de las categorías de primera y segunda calidad; y el rendimiento total se obtuvo sumando el peso obtenido para las tres categorías de calidad.

El diseño experimental consistió en parcelas divididas; la parcela grande correspondió al tipo de poda, y la parcela pequeña a la densidad de siembra, y se utilizaron cuatro repeticiones. La unidad experimental estuvo constituida por dos sacos con cuatro, cinco o seis plantas cada uno (según la densidad de siembra), y la parcela útil estuvo conformada por las cuatro plantas ubicadas en la posición central de la misma.

Se calcularon las correlaciones de Pearson entre la densidad de siembra y las variables de rendimiento, tanto a nivel general, como según el tipo de poda. Para las correlaciones que fueron significativas ($p \leq 0,05$), se calculó la ecuación de regresión y el coeficiente de determinación (R^2).

Resultados y discusión

Durante el período en que se desarrolló el ensayo, la temperatura diurna promedio se ubicó en 27 °C, y la temperatura nocturna promedio fue de 19 °C (figura 1). La humedad relativa diurna promedio fue de 56 %, y la humedad relativa nocturna promedio fue de 85 % [1] [3]. A partir de diciembre de 2010, aumentó la temperatura diurna y descendió la temperatura nocturna, y también bajó la humedad relativa, tanto diurna como nocturna; estos cambios correspondieron al inicio y establecimiento de la temporada seca [1]. En la figura 2 se muestran plantas de chile dulce del ensayo.

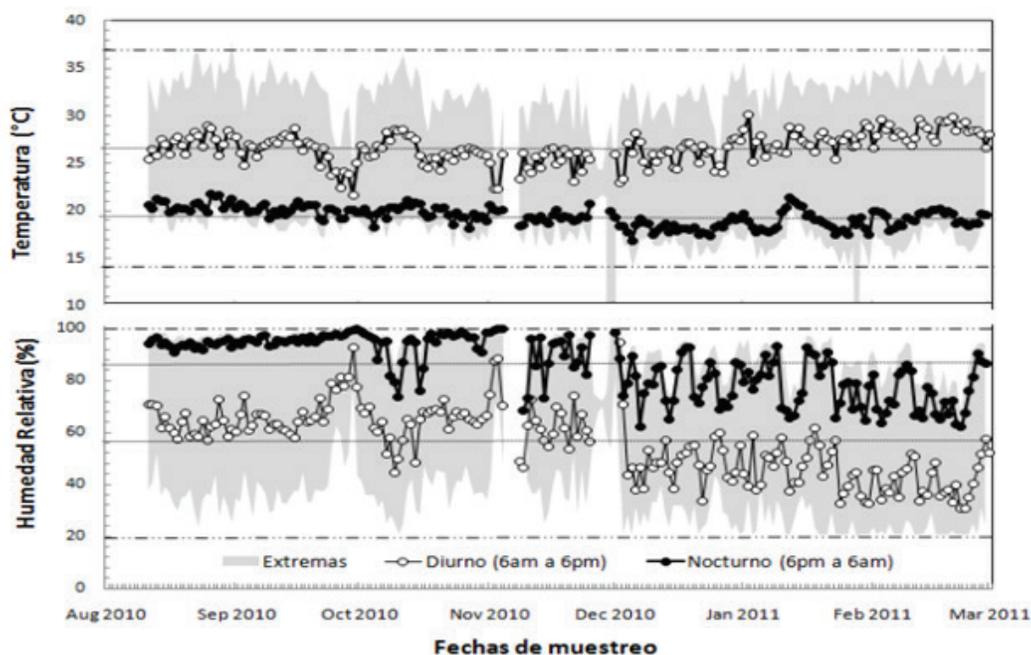


Figura 1. Valores de temperatura y humedad relativa del aire dentro del invernadero. Datos de los valores extremos y promedio por día (diurnos y nocturnos) en Alajuela, agosto 2010 a marzo 2011.



Figura 2. Plantas de chile dulce del ensayo.

En los cuadros 3 al 12 se muestran los resultados de las correlaciones de Pearson que fueron significativas ($p \leq 0,05$), entre la densidad de siembra y las variables de rendimiento evaluadas.

En cuanto a la correlación entre la densidad de siembra y el número total de frutos por planta [3], se halló una correlación negativa y significativa, tanto para la poda española ($r = -0,62$; $R^2 = 0,39$) (cuadro 3, figura 3), como para la poda holandesa ($r = -0,57$; $R^2 = 0,33$) (figura 4), por separado; pero fue no significativa para el total de tratamientos.

Cuadro 3. Coeficientes de correlación de Pearson entre densidad de siembra y número total de frutos por planta.

Tratamiento	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coeficiente de determinación de la regresión lineal (R^2)
Total	-0,34	ns	
Poda española	-0,62	*	0,39
Poda holandesa	-0,57	*	0,33

Nota. ns = no significativo; * = significativa ($p \leq 0,05$); ** = altamente significativa ($p \leq 0,01$).

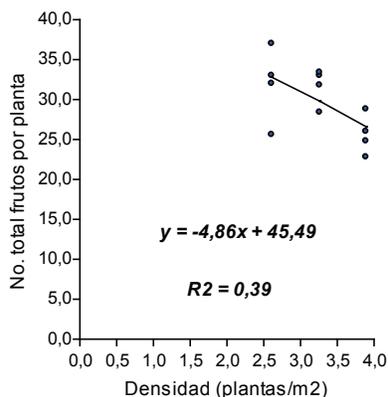


Figura 3. Regresión lineal del número total de frutos por planta versus la densidad de siembra (plantas/m^2) para los tratamientos de poda española.

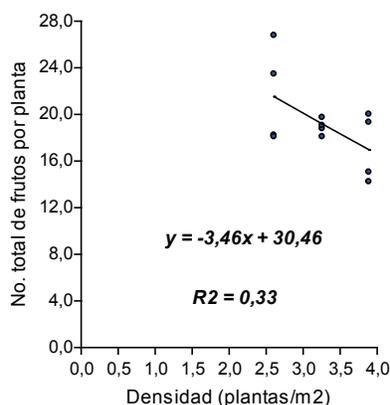


Figura 4. Regresión lineal del número total de frutos por planta versus la densidad de siembra (plantas/m²) para los tratamientos de poda holandesa.

En chile dulce, generalmente el número de frutos por planta muestra valores mayores conforme disminuye la densidad de siembra [15] [4] [16] [17] [18]; esos resultados están en concordancia con los valores obtenidos en el presente ensayo, tanto para los tratamientos con poda española, como con poda holandesa.

Con respecto a la correlación entre la densidad de siembra y el número de frutos de segunda calidad por planta [3], el valor obtenido fue negativo y significativo, únicamente para los tratamientos de poda española ($r = -0,59$; $R^2 = 0,35$) (cuadro 4, figura 5).

Cuadro 4. Coeficientes de correlación de Pearson entre densidad de siembra y número de frutos de segunda calidad por planta.

Tratamiento	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coeficiente de determinación de la regresión lineal (R ²)
Total	-0,20	ns	
Poda española	-0,59	*	0,35
Poda holandesa	-0,08	ns	

Nota. ns = no significativo; * = significativa ($p \leq 0,05$); ** = altamente significativa ($p < 0,01$).

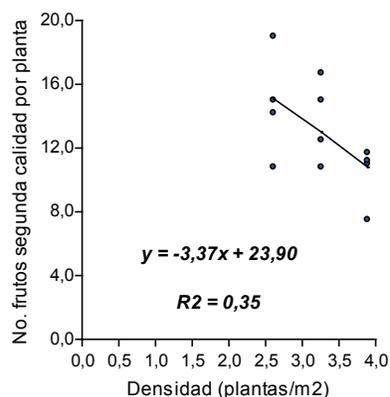


Figura 5. Regresión lineal del número de frutos de segunda calidad por planta versus la densidad de siembra (plantas/m²) para los tratamientos de poda española.

En cuanto a la correlación entre la densidad de siembra y el número de frutos de calidad de rechazo por planta, los valores hallados fueron negativos, y significativos o altamente significativos, tanto para el total de tratamientos ($r = -0,55$; $R^2 = 0,30$) (cuadro 5, figura 6), así como para la poda española ($r = -0,58$; $R^2 = 0,34$) (figura 7) y la poda holandesa ($r = -0,61$; $R^2 = 0,37$) (figura 8).

Cuadro 5. Coeficientes de correlación de Pearson entre densidad de siembra y número de frutos de calidad de rechazo por planta.

Tratamiento	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coeficiente de determinación de la regresión lineal (R^2)
Total	-0,55	**	0,30
Poda española	-0,58	*	0,34
Poda holandesa	-0,61	*	0,37

Nota. ns = no significativo; * = significativa ($p \leq 0,05$); ** = altamente significativa ($p \leq 0,01$).

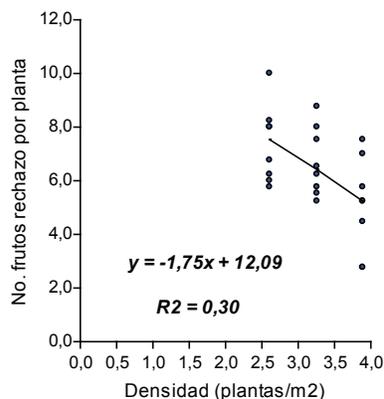


Figura 6. Regresión lineal del número de frutos de calidad de rechazo por planta versus la densidad de siembra (plantas/m^2) para el total de tratamientos.

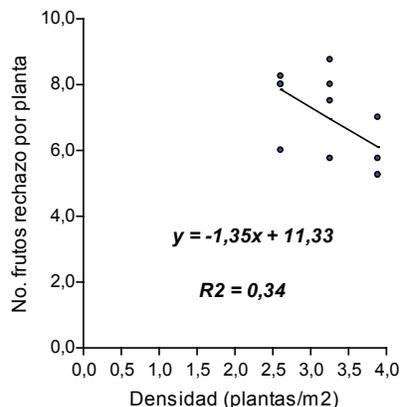


Figura 7. Regresión lineal del número de frutos de calidad de rechazo por planta versus la densidad de siembra (plantas/m^2) para los tratamientos de poda española.

Con respecto a la correlación entre la densidad de siembra y el número total de frutos por metro cuadrado [1], en todos los casos el resultado fue no significativo (cuadro 6).

Generalmente, el número total de frutos por metro cuadrado en chile dulce es mayor conforme aumenta la densidad de siembra [15] [4] [16] [6] [17] [1]; sin embargo, otros autores no encontraron diferencias entre diversas densidades de siembra para esta variable [18] [1], lo cual es similar a los resultados obtenidos en el presente ensayo.

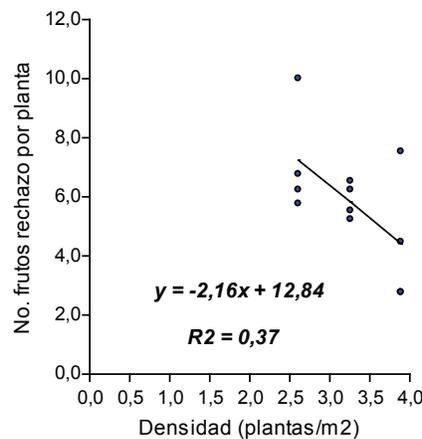


Figura 8. Regresión lineal del número de frutos de calidad de rechazo por planta versus la densidad de siembra (plantas/m²) para los tratamientos de poda holandesa.

Cuadro 6. Coeficientes de correlación de Pearson entre densidad de siembra y número total de frutos por metro cuadrado.

Tratamiento	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coeficiente de determinación de la regresión lineal (R ²)
Total	0,28	ns	
Poda española	0,55	ns	
Poda holandesa	0,47	ns	

Nota. ns = no significativo; * = significativa (p≤0,05); ** = altamente significativa (p≤0,01).

La correlación entre la densidad de siembra y el número de frutos de primera calidad por metro cuadrado [1], fue positiva y altamente significativa, tanto para el total de tratamientos (r = 0,58; R² = 0,34) (cuadro 7, figura 9), como para la poda española (r = 0,72; R² = 0,52) (figura 10), pero fue no significativa para los tratamientos con poda holandesa.

Cuadro 7. Coeficientes de correlación de Pearson entre densidad de siembra y número de frutos de primera calidad por metro cuadrado.

Tratamiento	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coeficiente de determinación de la regresión lineal (R ²)
Total	0,58	**	0,34
Poda española	0,72	**	0,52
Poda holandesa	0,50	ns	

Nota. ns = no significativo; * = significativa (p≤0,05); ** = altamente significativa (p≤0,01).

Generalmente, en chile dulce se producen más frutos comerciales por metro cuadrado conforme aumenta la densidad de siembra [6] [19] [3] [1]; los resultados encontrados en la presente investigación con respecto a los frutos de primera calidad, para el total de tratamientos, y para la poda española, están acorde con esos datos de la literatura.

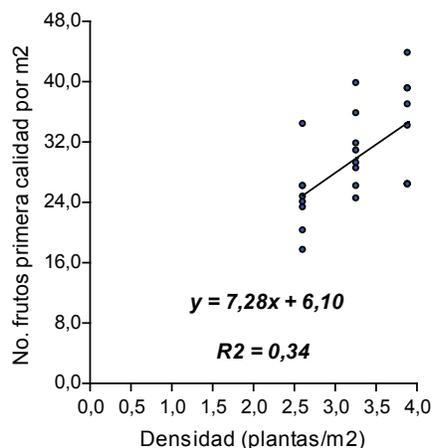


Figura 9. Regresión lineal del número de frutos de primera calidad por m² versus la densidad de siembra (plantas/m²) para el total de tratamientos.

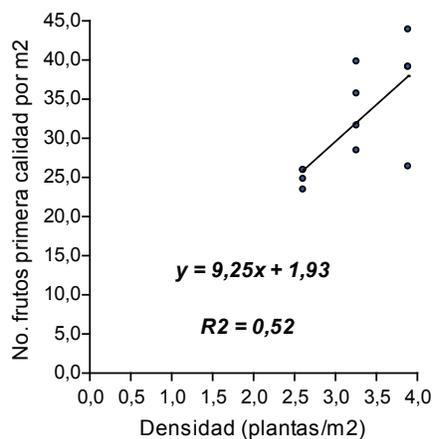


Figura 10. Regresión lineal del número de frutos de primera calidad por m² versus la densidad de siembra (plantas/m²) para los tratamientos de poda española.

La correlación hallada entre la densidad de siembra y el peso del fruto [1] fue positiva y altamente significativa, únicamente para los tratamientos con poda española ($r = 0,76$; $R^2 = 0,57$) (cuadro 8, figura 11), mientras que para la poda holandesa y para el total de tratamientos no fue significativa.

Cuadro 8. Coeficientes de correlación de Pearson entre densidad de siembra y peso del fruto.

Tratamiento	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coeficiente de determinación de la regresión lineal (R ²)
Total	0,31	ns	
Poda española	0,76	**	0,57
Poda holandesa	0,28	ns	

Nota. ns = no significativo; * = significativa (p≤0,05); ** = altamente significativa (p≤0,01).

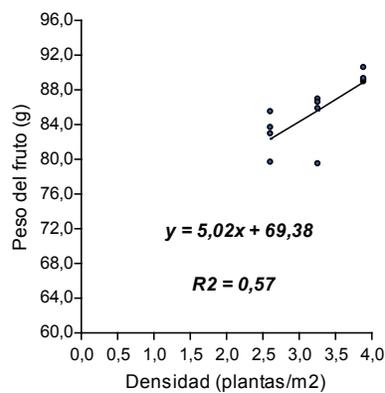


Figura 11. Regresión lineal del peso del fruto (g) versus la densidad de siembra (plantas/m²) para los tratamientos de poda española.

En algunas investigaciones, el peso del fruto ha mostrado valores mayores conforme disminuye la densidad de siembra del chile dulce [17] [7] [20] [1], aunque en otras ocasiones no se presentaron diferencias entre distintas densidades de siembra [16] [21] [18], tal y como sucedió en el presente ensayo con la poda holandesa. De manera contraria, en la presente investigación, en el caso de los tratamientos con poda española, el peso del fruto fue mayor conforme aumentó la densidad de siembra.

La correlación entre la densidad de siembra y el peso del fruto de primera calidad [1], fue positiva y significativa solamente para los tratamientos de poda española (r = 0,62; R² = 0,39) (cuadro 9, figura 12); pero fue no significativa para el total de tratamientos, y para la poda holandesa.

Cuadro 9. Coeficientes de correlación de Pearson entre densidad de siembra y peso del fruto de primera calidad.

Tratamiento	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coeficiente de determinación de la regresión lineal (R ²)
Total	0,31	ns	
Poda española	0,62	*	0,39
Poda holandesa	0,13	ns	

Nota. ns = no significativo; * = significativa (p≤0,05); ** = altamente significativa (p<0,01).

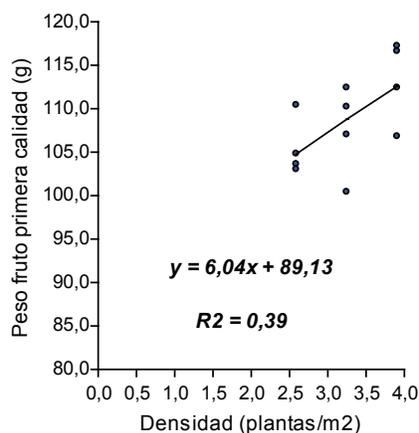


Figura 12. Regresión lineal del peso del fruto de primera calidad (g) versus la densidad de siembra (plantas/m²) para los tratamientos de poda española.

Con respecto a la correlación entre la densidad de siembra y el rendimiento total, el valor obtenido fue positivo y significativo para el total de tratamientos ($r = 0,42$; $R^2 = 0,17$) (cuadro 10, figura 13), y fue positivo y altamente significativo para los tratamientos con poda española ($r = 0,70$; $R^2 = 0,50$) (figura 14), pero fue no significativo para la poda holandesa.

Cuadro 10. Coeficientes de correlación de Pearson entre densidad de siembra y rendimiento total.

Tratamiento	Coefficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coefficiente de determinación de la regresión lineal (R ²)
Total	0,42	*	0,17
Poda española	0,70	**	0,50
Poda holandesa	0,50	ns	

Nota. ns = no significativo; * = significativa ($p \leq 0,05$); ** = altamente significativa ($p \leq 0,01$).

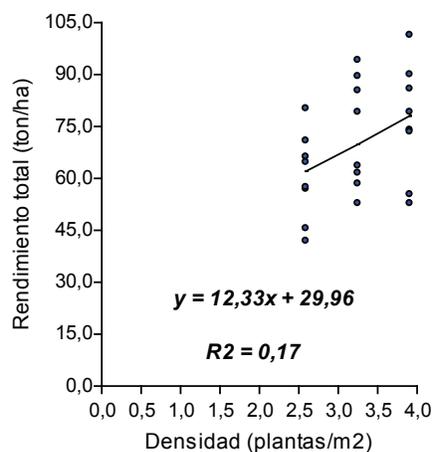


Figura 13. Regresión lineal del rendimiento total (ton/ha) versus la densidad de siembra (plantas/m²) para el total de tratamientos.

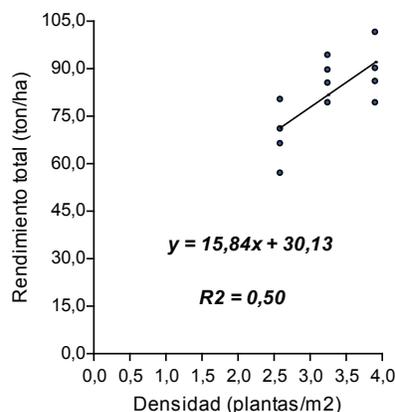


Figura 14. Regresión lineal del rendimiento total (ton/ha) versus la densidad de siembra (plantas/m²) para los tratamientos de poda española.

Generalmente, el rendimiento total por área en chile dulce es mayor conforme aumenta la densidad de siembra [5] [22] [15] [23] [4] [16] [24] [6] [25] [7] [19] [20] [1], tal y como sucedió también en el presente ensayo para el total de tratamientos, y para la poda española. Sin embargo, en otros ensayos no se han determinado diferencias significativas para esta variable entre distintas densidades de siembra [26] [21] [18] [1], tal y como ocurrió en la presente investigación con la poda holandesa.

La correlación entre la densidad de siembra y el rendimiento de primera calidad fue positiva, y significativa o altamente significativa, tanto para el total de tratamientos ($r = 0,65$; $R^2 = 0,42$) (cuadro 11, figura 15), como para la poda española ($r = 0,74$; $R^2 = 0,55$) (figura 16) y la poda holandesa ($r = 0,58$; $R^2 = 0,34$) (figura 17). Es decir, en todos los casos, conforme se incrementó la densidad de siembra, aumentó también el rendimiento de primera calidad.

Cuadro 11. Coeficientes de correlación de Pearson entre densidad de siembra y rendimiento de primera calidad.

Tratamiento	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coeficiente de determinación de la regresión lineal (R ²)
Total	0,65	**	0,42
Poda española	0,74	**	0,55
Poda holandesa	0,58	*	0,34

Nota. ns = no significativo; * = significativa ($p \leq 0,05$); ** = altamente significativa ($p \leq 0,01$).

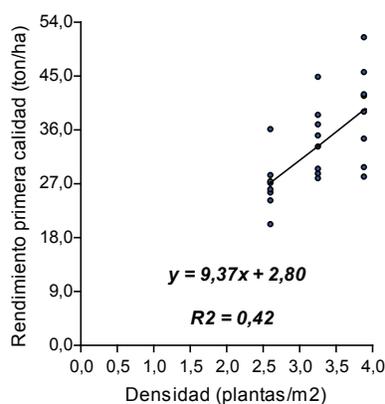


Figura 15. Regresión lineal del rendimiento de primera calidad (ton/ha) versus la densidad de siembra (plantas/m²) para el total de tratamientos.

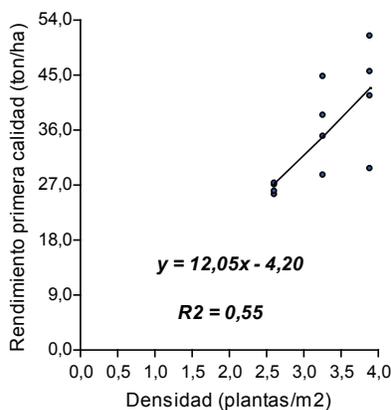


Figura 16. Regresión lineal del rendimiento de primera calidad (ton/ha) versus la densidad de siembra (plantas/m²) para los tratamientos de poda española.

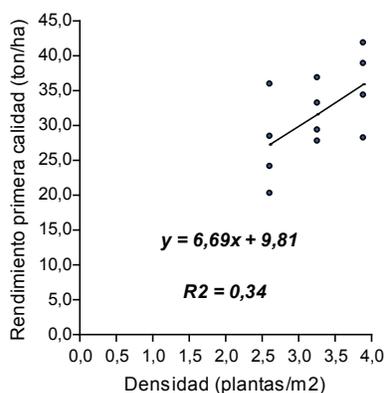


Figura 17. Regresión lineal del rendimiento de primera calidad (ton/ha) versus la densidad de siembra (plantas/m²) para los tratamientos de poda holandesa.

Unos investigadores obtuvieron una alta correlación y un alto coeficiente de determinación, entre la densidad de siembra y el rendimiento de frutos extra grandes (kg/m²), con poda española ($R^2 = 0,92$), y con poda holandesa ($R^2 = 0,96$); la respuesta fue un aumento en el rendimiento de frutos extra grandes conforme aumentó la densidad de siembra [6]. Un resultado similar se obtuvo en la presente investigación, con el rendimiento de primera calidad, en todos los casos evaluados.

En cuanto a la correlación entre la densidad de siembra y el rendimiento comercial, los valores obtenidos fueron positivos y significativos, tanto para el total de tratamientos ($r = 0,43$; $R^2 = 0,18$) (cuadro 12, figura 18), como para la poda española ($r = 0,68$; $R^2 = 0,46$) (figura 19), y para la poda holandesa ($r = 0,62$; $R^2 = 0,39$) (figura 20); es decir, en todos los casos, el rendimiento comercial aumentó conforme se incrementó la densidad de siembra [1]. Este resultado está en concordancia con lo informado por otros investigadores para chile dulce [23] [6] [17] [19].

Cuadro 12. Coeficientes de correlación de Pearson entre densidad de siembra y rendimiento comercial.

Tratamiento	Coeficiente de correlación (r)	Probabilidad (p)	Coeficiente de determinación de la regresión lineal (R ²)
Total	0,43	*	0,18
Poda española	0,68	*	0,46
Poda holandesa	0,62	*	0,39

Nota. ns = no significativo; * = significativa ($p \leq 0,05$); ** = altamente significativa ($p \leq 0,01$).

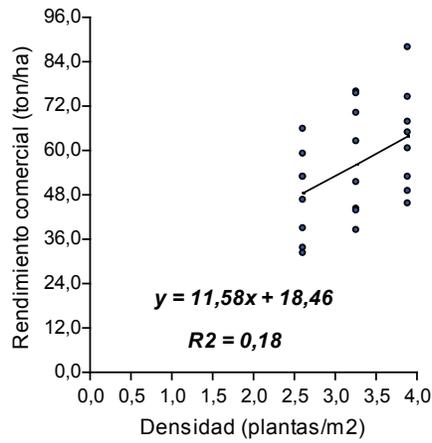


Figura 18. Regresión lineal del rendimiento comercial (ton/ha) versus la densidad de siembra (plantas/m²) para el total de tratamientos.

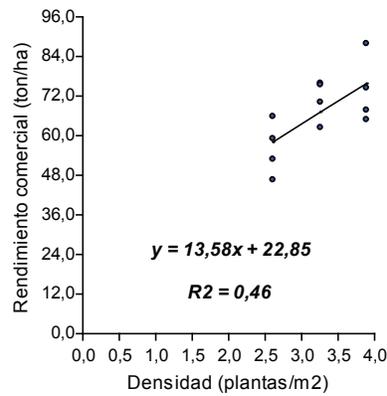


Figura 19. Regresión lineal del rendimiento comercial (ton/ha) versus la densidad de siembra (plantas/m²) para los tratamientos de poda española.

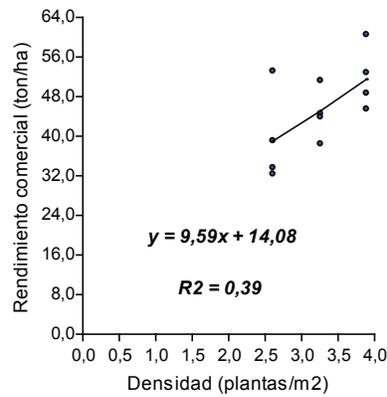


Figura 20. Regresión lineal del rendimiento comercial (ton/ha) versus la densidad de siembra (plantas/m²) para los tratamientos de poda holandesa.

Conclusiones y recomendaciones

Independientemente del tipo de poda, se obtuvo una correlación significativa entre la densidad de siembra y: número de frutos de calidad de rechazo por planta, número de frutos de primera calidad por m², rendimiento total, rendimiento de primera calidad, y rendimiento comercial.

Además, únicamente para los tratamientos con poda española, se halló una correlación significativa entre la densidad de siembra y: número de frutos de segunda calidad por planta, peso del fruto, y peso del fruto de primera calidad.

Se concluye que el uso de una mayor densidad de siembra es lo más beneficioso para los productores, desde el punto de vista económico.

Se recomienda ensayar densidades de siembra superiores a las incluidas en esta investigación (2,60 – 3,90 plantas/m²), para definir una densidad óptima.

Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento recibido por parte de la Universidad de Florida, así como de la Universidad de Costa Rica, para la realización de este trabajo. Asimismo, agradecen la colaboración de Jendry Portilla, Cristina Arguedas, Jorge Díaz, Julio Vega y Carlos González en el trabajo de campo, y de Mario Monge en la revisión de la traducción del resumen al idioma inglés.

Referencias

- [1] J. E. Monge-Pérez y M. Loría-Coto, «Producción de chile dulce (*Capsicum annuum*) en invernadero: efecto de densidad de siembra y poda,» *Revista Posgrado y Sociedad*, vol. 16, n° 2, pp. 19-38, 2018.
- [2] F. Marín, «Programa general de la agricultura protegida y sus aplicaciones en Costa Rica,» Programa Nacional Sectorial de Producción Agrícola Bajo Ambientes Protegidos, Ministerio de Agricultura y Ganadería, San José, Costa Rica, 2009.
- [3] E. Elizondo-Cabalca y J. E. Monge-Pérez, «Caracterización morfológica de 15 genotipos de pimiento (*Capsicum annuum*) cultivados bajo invernadero en Costa Rica,» *InterSedes*, vol. 18, n° 37, pp. 1-27, 2017.
- [4] E. Jovicich, D. J. Cantliffe y G. J. Hochmuth, «Plant density and shoot pruning on yield and quality of a summer greenhouse sweet pepper crop in Northcentral Florida,» de *Proceedings 28th National Agricultural Plastics Congress, 19-22 May*, Tallahassee, Florida, EE.UU., 1999.
- [5] D. Maniutiu, R. Sima, A. S. Apahidean, M. Apahidean y D. Ficior, «The influence of plant density and shoot pruning on yield of bell pepper cultivated in plastic tunnel,» *Bulletin UASVM Horticulture*, vol. 67, n° 1, pp. 259-263, 2010.
- [6] E. Jovicich, D. J. Cantliffe y P. J. Stoffella, «Fruit yield and quality of greenhouse-grown bell pepper as influenced by density, container, and trellis system,» *Hort Technology*, vol. 14, n° 4, pp. 507-513, 2004.
- [7] M. H. Aminifard, H. Aroiee, A. Ameri y H. Fatemi, «Effect of plant density and nitrogen fertilizer on growth, yield and fruit quality of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.),» *African Journal of Agricultural Research*, vol. 7, n° 6, pp. 859-866, 2012.
- [8] S. Cancaya, A. Balkaya y O. Karaagac, «Canonical correlation analysis for the determination of relationships between plant characters and yield components in red pepper [*Capsicum annuum* L. var. *conoides* (Mill.) Irish] genotypes,» *Spanish Journal of Agricultural Research*, vol. 8, n° 1, pp. 67-73, 2010.
- [9] E. Madosa, S. Ciulca, G. Velicevici, C. Avadanei, L. Sasu, A. Cioroga y I. Friskan, «Study of correlations between component characters of production capacity of sweet pepper (*Capsicum annuum* L. var. *grossum*),» *Bulletin UASVM, Horticulture*, vol. 65, n° 1, pp. 90-94, 2008.
- [10] V. K. Sharma, C. S. Semwal y S. P. Uniyal, «Genetic variability and character association analysis in bell pepper (*Capsicum annuum* L.),» *Journal of Horticulture and Forestry*, vol. 2, n° 3, pp. 58-65, 2010.
- [11] L. Sasu, E. Madosa, G. Velicevici, S. Ciulca, C. Avadanei y G. Gorinoiu, «Studies regarding correlations between the main morphological traits in a collection of bell pepper (*Capsicum annuum* var. *grossum*) local landraces,» *Journal of Horticulture, Forestry and Biotechnology*, vol. 17, n° 2, pp. 285-289, 2013.

- [12] A. Ben-Chaim y I. Paran, «Genetic analysis of quantitative traits in pepper (*Capsicum annuum*),» *Journal of the American Society for Horticultural Science*, vol. 125, n.º 1, pp. 66-70, 2000.
- [13] J. D. Gamayo, «El cultivo protegido de pimiento,» de *Pimientos*, España, Ediciones de Horticultura, 1996, pp. 33-40.
- [14] H. Casilimas, O. Monsalve, C. R. Bojacá, R. Gil, E. Villagrán, L. A. Arias y L. S. Fuentes, Manual de producción de pimentón bajo invernadero, Bogotá, Colombia: Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 2012.
- [15] S. Cebula, «Optimization of plant and shoot spacing in greenhouse production of sweet pepper,» *Acta Horticulturae*, vol. 412, pp. 321-329, 1995.
- [16] H. Y. Dasgan y K. Abak, «Effects of plant density and number of shoots on yield and fruit characteristics of peppers grown in glasshouses,» *Turkish Journal of Agriculture & Forestry*, vol. 27, pp. 29-35, 2003.
- [17] N. Cruz-Huerta, F. Sánchez, J. Ortiz y M. C. Mendoza, «Altas densidades con despunte temprano en rendimiento y período de cosecha en chile pimiento,» *Agricultura Técnica en México*, vol. 35, n.º 1, pp. 70-77, 2009.
- [18] R. C. Reséndiz-Melgar, E. C. Moreno-Pérez, F. Sánchez-Del Castillo, J. E. Rodríguez-Pérez y A. Peña-Lomelí, «Variedades de pimiento morrón manejadas con despunte temprano en dos densidades de población,» *Revista Chapingo Serie Horticultura*, vol. 16, n.º 3, pp. 223-229, 2010.
- [19] M. M. Maboko, C. P. Du Plooy y S. Chiloane, «Effect of plant population, stem and flower pruning on hydroponically grown sweet pepper in a shadenet structure,» *African Journal of Agricultural Research*, vol. 7, n.º 11, pp. 1742-1748, 2012.
- [20] S. Seifi, S. H. Nemati, M. Shoor y B. Abedi, «The effect of plant density and shoot pruning on growth and yield of two greenhouse bell pepper cultivars,» *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture*, vol. 3, n.º 11, pp. 77-83, 2012.
- [21] R. L. Grijalva-Contreras, R. Macías-Duarte y F. Robles-Contreras, «Productividad y calidad de variedades y densidades de chile bell pepper bajo condiciones de invernadero en el Noroeste de Sonora,» *Biotecnía*, vol. 10, n.º 3, pp. 3-10, 2008.
- [22] M. H. Aminifard, H. Aroiee, S. Karimpour y H. Nemati, «Growth and yield characteristics of paprika pepper (*Capsicum annuum* L.) in response to plant density,» *Asian Journal of Plant Sciences*, vol. 9, n.º 5, pp. 276-280, 2010.
- [23] P. Lorenzo y N. Castilla, «Bell pepper yield response to plant density and radiation in unheated plastic greenhouse,» *Acta Horticulturae*, vol. 412, pp. 330-334, 1995.
- [24] R. Rotondo, M. C. Mondino, J. A. Ferratto, R. Grasso y A. Longo, «Efecto de la poda de conducción, raleo de frutos y densidad de plantación sobre la productividad del cultivo de pimiento (*Capsicum annuum* L.), bajo invernadero,» *Horticultura Argentina*, vol. 22, n.º 53, pp. 5-9, 2003.
- [25] L. Zúñiga-Estrada, J. d. J. Martínez-Hernández, G. A. Baca-Castillo, A. Martínez-Garza, J. L. Tirado-Torres y J. Kohashi-Shibata, «Producción de chile pimiento en dos sistemas de riego bajo condiciones hidropónicas,» *Agrociencia*, vol. 38, n.º 2, pp. 207-218, 2004.
- [26] F. E. Vicente-Conesa y M. J. Sáez-García, «Comparación de poda a dos guías, a tres guías, aclareo de tallos y cultivo libre en cultivo integrado de pimiento en invernadero,» de *31 Seminario de Técnicos y Especialistas en Horticultura, Almagro, Ciudad Real, 2001*, Almagro, Ciudad Real, España, 2004.

Establecimiento de un protocolo para la inducción de embriogénesis somática indirecta en *Allium Sativum* (Ajo Criollo Costarricense)

Establishment of a protocol for the induction of indirect somatic embryogenesis in *Allium sativum* (Costa Rican Creole Gralic)

William Watson-Guido¹, Vilma Jimenez-Bonilla², Jaime Brenes-Madriz³

Fecha de recepción: 4 de febrero de 2020

Fecha de aprobación: 3 de junio de 2020

Watson-Guido, W; Jimenez-Bonilla, V; Brenes-Madriz, J. Establecimiento de un protocolo para la inducción de embriogénesis somática indirecta en *Allium Sativum* (ajo criollo costarricense). *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-2. Abril-Junio 2021. Pág 178-186.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i2.4984>

1 Ingeniero en Biotecnología. Costa Rica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: willwatqui@gmail.com.

 <https://orcid.org/0000-0002-2704-5159>

2 Lic. en Biología. Centro de Investigaciones en Biotecnología, Escuela de Biología. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica..Correo electrónico: vjjimenez@tec.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0002-5050-0201>

3 Ing. Agrónomo. Centro de Investigaciones en Biotecnología. Escuela de Biología. Instituto tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: jabrenes@tec.ac.cr.

 <https://orcid.org/0000-0003-2325-8808>



Palabras clave

Ajo; embriogénesis indirecta; callogénesis; embrión somático.

Resumen

El ajo (*Allium sativum*), presenta propiedades medicinales y culinarias, así como propiedades repelentes aprovechables en la agricultura orgánica, que lo hace un cultivo con alta demanda en nuestro país y en el resto del mundo. En Costa Rica se encuentra un material nativo, muy apreciado por el consumidor nacional por sus cualidades organolépticas, como sabor y olor. La falta de semilla de calidad y falta de material adaptado a condiciones tropicales, así como la competencia por precio con el ajo importado de China y Guatemala (ya que se importa a precios muy bajos por kilo), hace que se dificulte colocarlo en los mercados nacionales. Por lo anterior se planteó esta investigación con el objetivo de obtener embriones somáticos vía indirecta y regenerar plántulas libres de virus y otros patógenos, para ser utilizadas como método de propagación vegetativa. Los explantes utilizados para la inducción de callogénesis fueron meristemos radicales. El callo se indujo en medio de cultivo M&S (1962), con sacarosa al 3% y pH 5,7, suplementado con 1,0 mg/L, ácido naftalenacético (ANA), 2,0 mg/L bencil-amino purina (BAP) y 0,5 mg/L ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D). La proliferación de los callos de obtuvo al subcultivarlos en el medio M&S (1962), con sacarosa al 3% y pH 5,7 suplementado 1 mg/L BAP y 0,25 mg/L de 2,4-D, al mes se observó la formación de embriones globulares la maduración embrionaria se obtuvo con la adición de 0,5 mg/L de AG₃ y para la germinación con 0,5 mg/L de BAP.

Keywords

Garlic; indirect embryogenesis; callogenesis; somatic embryo.

Abstract

The garlic (*Allium sativum*), has medicinal and culinary properties, as well as repellent properties that can be used in organic agriculture, which makes it a crop with high demand in our country and in the rest of the world. In Costa Rica there is a native material, much appreciated by the national consumer for its organoleptic qualities, such as taste and smell. The lack of quality seed and lack of material adapted to tropical conditions, as well as the price competition with garlic imported from China and Guatemala (since it is imported at very low prices per kilo), makes it difficult to place it in the markets Nationals Therefore, this research was proposed with the aim of obtaining somatic embryos indirectly and regenerating seedlings free of viruses and other pathogens, to be used as a method of vegetative propagation. The explants used for the induction of callogenesis were radical meristems. The callus was induced in M&S culture medium (1962), with 3% sucrose and pH 5,7, supplemented with 1,0 mg/L, naphthalenacetic acid (ANA), 2,0 mg/L benzyl-amino purine (BAP) and 0,5 mg/L 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D). The proliferation of the calluses was obtained by subculturing them in the M&S medium (1962), with 3% sucrose and pH 5,7 supplemented 1 mg/L BAP and 0,25 mg/L of 2,4-D, per month The formation of globular embryos was observed. Embryonic maturation was obtained with the addition of 0,5 mg/L of AG₃ and for germination with 0,5 mg/L of BAP.

Introducción

El ajo, *Allium sativum*, es una monocotiledónea de la familia *Alliaceae* y del orden Asparagales [1]. Presenta una cabeza compuesta de 10 a 30 dientes o bulbillos, los cuales son utilizados como material de siembra, ya que la semilla botánica no es viable. Por esta razón se le considera como una especie apomíctica obligada; término que se refiere a su capacidad para producir embriones sin existir fecundación previa [2].

En Costa Rica, al ajo cultivado se le llama ajo criollo y se clasifica entre los ajos violetas o asiáticos caracterizado por su corto ciclo de reproducción y corta dormancia y con bajos requerimientos de frío[3], además poseen un sabor y olor fuerte, lo que lo convierte en un cultivo apetecido para los consumidores y una opción para los agricultores. No obstante la presencia de problemas fitosanitarios, aunado a problemas en cuanto al número y tamaño de dientes, variabilidad del diámetro del bulbo y la escases de semilla de calidad [4,1] hacen que la producción sea baja.

Su cultivo se limita a zonas con un rango altitudinal de 900 a 2000 msnm., siendo las principales regiones de siembra la zona norte de la provincia de Cartago (Llano Grande, Tierra Blanca, Cot y Pacayas), además de Santa Ana de San José y San Luis de Santo Domingo de Heredia, esta producción no supe ni el 10% del consumo nacional [1,2].

Para superar los problemas de calidad y cantidad de semilla, se han utilizado técnicas de cultivo *in vitro*. Estas técnicas han adquirido un potencial enorme para la propagación masiva de plantas, mediante vía organogénica y embriogénica; la diferencia entre ellas es que la primera da origen a órganos unipolares y la embriogénesis genera estructuras bipolares similares a los embriones, con eje radicular y apical, los cuales no poseen ninguna conexión vascular con el explante que le dio origen. Según los reguladores de crecimiento utilizados en el medio de cultivo se pueden generar embriogénesis somática directa e indirecta. La embriogénesis indirecta se divide en varias etapas, iniciando en la formación de callo, regeneración de callo embriogénico, desarrollo de los embriones somáticos, proliferación de estos embriones, maduración, germinación y conversión de los embriones a plantas completas [5]. Con la aplicación de esta técnica es posible obtener un incremento en el número de plantas, la sanidad del material y facilitar el transporte de material vegetal entre países.

En el ajo, al considerarse una especie apomíctica, la embriogénesis somática indirecta se vuelve una técnica importante, para producir material de ajo, de forma masiva y genéticamente igual a la planta madre.

Materiales y métodos

Establecimiento *in vitro* del explante

Los dientes de ajo fueron suministrados por agricultores de la zona de Llano Grande de Cartago y se tomó como explante segmentos de la base del diente de aproximadamente 5,0 mm de longitud, a los cuales se les eliminaron las raíces. Se desinfectaron utilizando la metodología establecida por [2]. Los dientes se desprendieron de la túnica y se lavaron con agua y jabón y luego se sumergieron en una solución con 5 g/L de Agry-micin® y 5 g/L Zetaran® y 3 gotas de Tween 20® por un período de 45 minutos en agitación constante a 400 rpm. Posteriormente se realizaron tres lavados con agua destilada estéril y luego una desinfección con Hipoclorito de Sodio al 3,5% i.a., por 15 minutos en cámara de flujo laminar, agitándolos periódicamente, finalmente se realizaron tres enjuagues con agua destilada estéril.

Medios de cultivo

Para la elaboración de los medios de cultivos se tomó como base el propuesto por Murashige y Skoog (1962) [6] con las sales y vitaminas completas, al cual se le adicionaron distintos reguladores de crecimiento según la etapa del proceso de embriogénesis somática indirecta. Detallados a continuación.

Inducción de callo

Se evaluó el efecto de tres reguladores de crecimiento los cuales fueron BAP (0,5 mg/L y 2,0 mg/L), ANA (0,1 mg/L) y 2,4-D (0,5 mg/L y 2 mg/L), así como Myo-inositol (0 y 100 mg/L), que se adicionaron el medio de cultivo Murashige y Skoog (1962) [6] completo. La unidad experimental consistió en un explante por envase de cultivo, con 30 repeticiones y cada tratamiento se repitió tres veces (Cuadro 1). Los explantes fueron colocados en el cuarto de crecimiento en condiciones de oscuridad a una temperatura de 21°C, realizando subcultivos cada quince días. Se evaluó el peso fresco de 30 callos al mes de cultivo para establecer el mejor medio de cultivo para la inducción de callogénesis, además se seleccionaron, con ayuda de un estereoscopio, los callos con apariencia embriogénica.

Cuadro 1. Composición de los medios de cultivo de tres tratamientos evaluados para la inducción de callogénesis a partir de la base de dientes de ajo (*Allium sativum*).

Tratamientos	Composición
T1	M&S (1962) suplementado con 3% de sacarosa, 2,0 mg/L de BAP, 1mg/L ANA, 0,5mg/L de 2,4-D, y 100 mg/L de Myo-inositol
T2	M&S (1962) suplementado con 3% de sacarosa, 2,0 mg/L de BAP y 0,5 mg/L de 2,4-D
T3	M&S (1962) suplementado con 3% de sacarosa, 0,5mg/L BAP y 2,0 mg/L de 2,4-D.

Proliferación del callo embriogénico

Los medios para la proliferación de tejidos embriogénicos, maduración de embriones y germinación, fueron los descritos por Nasim y colaboradores [7].

La proliferación de los callos desarrollados en los respectivos tratamientos (Cuadro 1), se subcultivaron al medio de proliferación de callos embriogénicos que consistió en un M&S (1962) enriquecido con 1,0 mg/L de BAP y 0,25 mg/L de 2,4-D por seis semanas a 21°C en un régimen lumínico de 16 hora luz. Se tomaron 100 mg de callo embriogénico como unidad experimental, para un total de 30 repeticiones por tratamiento.

Maduración de embriones

Luego de las seis semanas en el medio de proliferación, los callos se subcultivaron a un medio de maduración embriogénica el cual consistió en un medio M&S (1962) suplementado con 0,5 mg/L de AG₃ por un periodo de ocho semanas a 21°C en un régimen lumínico de 16 hora luz.

Germinación de embriones

Transcurrido el periodo de maduración, los callos se subcultivaron en un medio M&S (1962) enriquecido con 0,5 mg/L de BAP por cuatro semanas para la germinación de los embriones obtenidos en las etapas anteriores. Las condiciones de cultivo fueron de 21°C en un régimen lumínico de 16 horas luz.

Análisis estadístico

Se utilizó el programa InfoStat®, para realizar las pruebas de normalidad con Shapiro-Wilks y un análisis de varianza que se ajuste a la normalidad de los datos obtenidos.

Resultados

Inducción de callo

La figura 1 muestra la formación de callos a partir de los meristemos radicales de la base del diente de ajo.

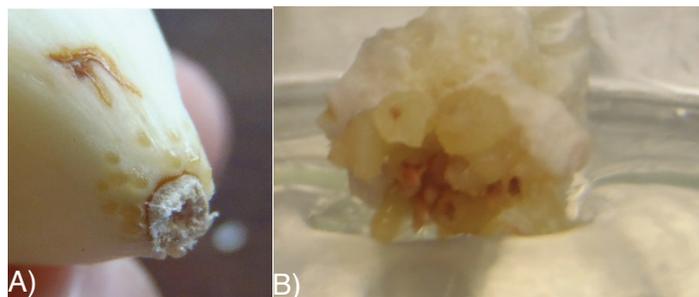


Figura 1. A) Meristemos radicales de ajo. B) Callos desarrollados a partir de los meristemos radicales.

La figura 2 muestra el peso fresco de los callos formados en los diferentes tratamientos evaluados, obteniéndose un valor de $p > 0,001$ para la prueba de normalidad Shapiro-Wilks (modificada), por lo que se infiere que los datos no poseen una distribución normal. Por este motivo se procedió a realizar la prueba de varianza no paramétrica de Kruskal-Wallis que reflejó un valor de $p = 0,0431$ por lo que se infirió con certeza estadística que las diferencias entre los pesos obtenidos en cada tratamiento son estadísticamente significativas. Determinándose que el tratamiento 1 presentó la mayor media para el peso fresco de los callos.

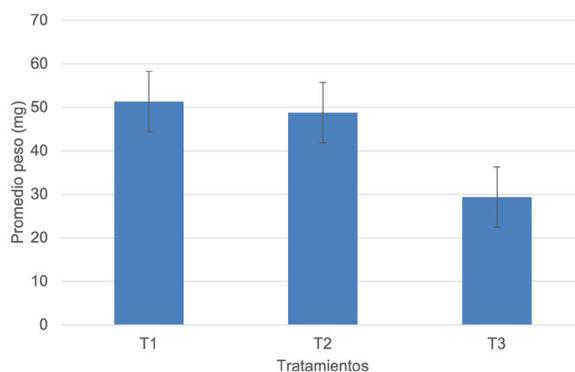


Figura 2. Pesos de los callos de *Allium sativum*, obtenidos en los tres tratamientos de inducción utilizados.

Proliferación del callo embriogénico

La figura 3 muestra que la proliferación de callos embriogénico es de 80% para los callos provenientes de los tratamientos T1 y T3 y 36,67% para los callos inducidos en el tratamiento T2.

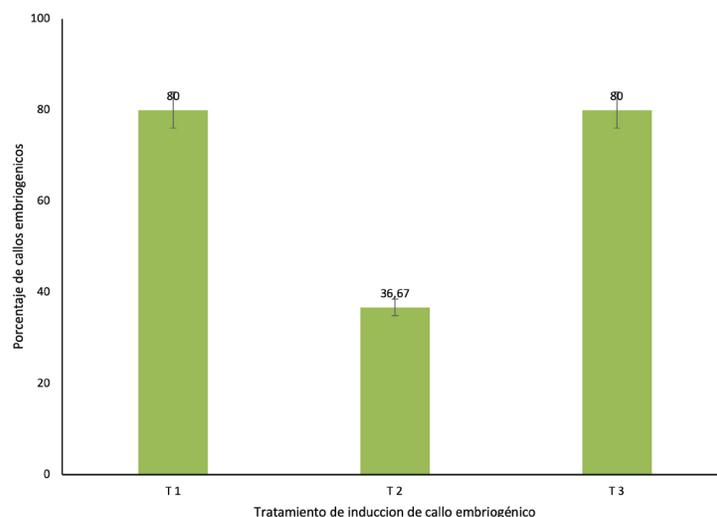


Figura 3. Porcentajes de proliferación de callos embriogénicos de *Allium sativum*, a partir de callos desarrollados en los tres tratamientos de inducción (cuadro 1) e inoculados en el medio proliferación.

A las seis semanas de subcultivo de los callos en el medio de proliferación se observó que en todos ellos se formaron numerosas estructuras de color blanco de formas alargadas y redondas correspondientes a tejido proembrionario y embriones inmaduros indistintamente del tratamiento de callogénesis que procedieran (figura 4).

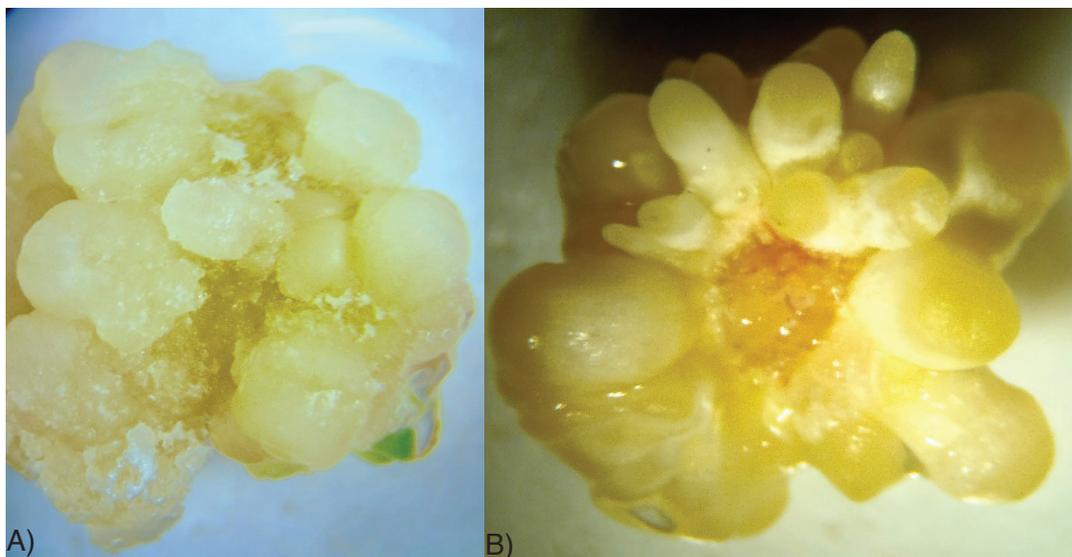


Figura 4 A) Estructuras de tejido proembrionarios. B) Embriones inmaduros desarrollados a partir de estructura mostradas en la imagen A.

Maduración de embriones

A las seis semanas de subcultivar los callos que presentaban embriones inmaduros en el medio de maduración, se observó la elongación de los mismos, así como una coloración verde característica de la maduración. Además se observó, en menor medida, el desarrollo de estructuras no embrionarias identificadas como brotes y raíces (figura 4).

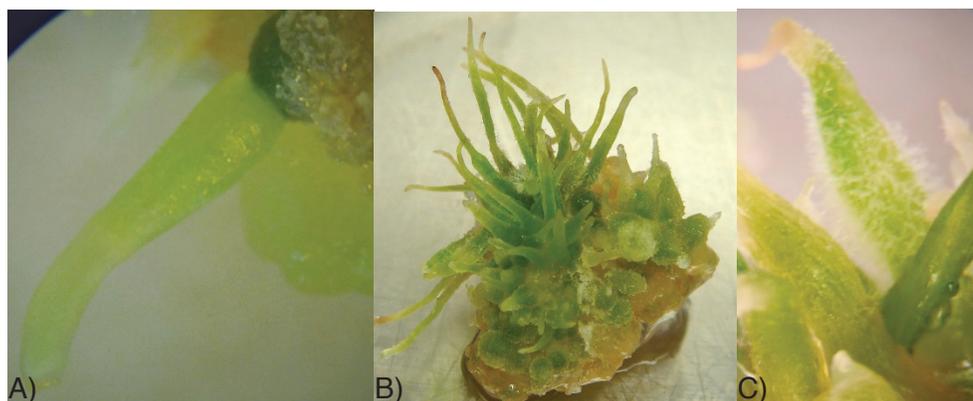


Figura 5. A) Embriones somáticos maduros, B) brotes y C) raíces *Allium sativum* desarrollados a partir de callos obtenidos de meristemos radicales.

Germinación de embriones

Al subcultivar los embriones maduros en el medio de germinación se obtuvo a las cuatro semanas, el desarrollo de plántulas (figura 5 y 6).



Figura 6. Plántulas de *Allium sativum* obtenidas a partir de embriones maduros cultivados en un medio de germinación.

Discusión

La unión de las auxinas a receptores en la pared celular desencadena una cascada de eventos que propician la secreción de protones acidificando el medio aumentando la presión de turgencia y activando proteínas que rompen los enlaces cruzados entre las moléculas de celulosa, permitiendo la elongación celular y los arreglos morfogénicos [8,5]. Llorente menciona que al utilizar combinación de auxinas se favorece la expansión y elongación celular, además de aumentar la plasticidad necesaria para procesos embriogénicos. De acuerdo con esto la diferencia entre los pesos frescos de los callos obtenidos en los distintos tratamientos, se debe a la combinación de las auxinas utilizadas.

Otro factor que influyó en el peso fresco de los callos obtenidos en el medio de cultivo 1, fue el Myo-inositol extra adicionado al medio de cultivo, debido a que actúa como segundo mensajero bajo la forma de trifosfato de inositol, durante el proceso de elongación y expansión celular inducido por las altas concentraciones de auxinas, requeridas para la dediferenciación celular y la formación de callo [8].

La respuesta embriogénica diferencial observada en los callos de cada tratamiento, es determinada por la relación de las proporciones de las fitohormonas utilizadas durante todo el proceso, ya que estas mediarán en la respuesta morfogénica. Una concentración muy baja de auxinas no logra desencadenar la inducción del proceso embriogénico ya que el 2,4-D extracelular es necesario para la formación de callos embriogénicos [9].

Este estímulo de altas concentraciones de auxinas resulta en una mayor cantidad de células competentes, es decir células con la capacidad de diferenciarse en embriones al recibir inductores de diferenciación. Estas células pueden reconocerse morfológicamente y diferenciarse del resto de las células del callo, porque son pequeñas, redondeadas, con citoplasma denso, vacuolas pequeñas y el núcleo está situado en una posición central [10, 11].

La maduración embrionaria es el proceso durante el cual se culmina la histodiferenciación de los tejidos embrionarios. En esta etapa ocurren distintos procesos fisiológicos y morfológicos como la expansión celular y acumulación de sustancias de reserva. En muchos trabajos no se informa la existencia de esta fase, solo se mencionan la formación y germinación de embriones [12].

La presencia de embriones somáticos, así como de brotes y raíces en el mismo callo en la etapa de maduración, se debe por el consumo diferencial de auxinas y citoquininas por el explante. Las auxinas necesarias para la embriogénesis somática son consumidas de manera rápida y eficiente, en contraste a las citoquininas que son consumidas de manera más lenta. Si el callo se mantiene en el mismo medio una vez que las auxinas se agoten, el tejido pierde su potencial embriogénico y se da el inicio a la formación de embrioides en las células competentes, el resto de las células son influenciadas por el efecto de las citoquininas, que aún están presentes en el medio, por lo que se desarrollan en brotes y raíces [13]. En el caso específico de los callos obtenidos en este ensayo, al desarrollarse a partir de meristemos radicales, presentan una predisposición fisiológica y genética a desarrollar un proceso rizogénico al agotarse las reservas de auxinas exógena [14].

La germinación de los embriones consiste en el desarrollo de los meristemos radicales y foliares que culmina en la formación de una plántula completa. Esto fue posible por el BAP adicionado en el medio, ya que este regulador del crecimiento perteneciente a las citoquininas, favorece el crecimiento celular en las regiones polares del embrión, estimulando el desarrollo foliar y radical [15]. Este efecto ya ha sido observado en otros trabajos como los de Carhuaricra y colaboradores en la variedad de ajo Morado Barranquino donde fueron utilizadas distintas concentraciones de BAP para la regeneración *in vitro* de meristemos apicales de ajo [16] y en el trabajo de Carbajal-Cruz se utilizó en la germinación *in vitro* de plantas como metodología para la obtención de plantas libres de virus [17] "publisher": "Universidad Autónoma de Nuevo León", "number-of-pages": "89", "genre": "masters", "source": "eprints.uanl.mx", "abstract": "El virus del enanismo amarillo de la cebolla (OYDV).

Conclusiones

Se logró inducir y regenerar embriones somáticos a partir de meristemos radicales de ajo criollo costarricense.

Se determinó que el medio con 2,0 mg/L de BAP, 1mg/L ANA, 0,5 mg/L de 2,4-D, y 100 mg/L de Myo-inositol fue el mejor para la inducción de callos embriogénicos, ya que de este se obtuvieron los callos con un mayor peso fresco y la respuesta embriogénica más alta, al utilizar bases de diente de ajo como explante.

Recomendaciones

Los autores recomiendan realizar ensayos con medio líquido en la etapa de proliferación, maduración y germinación para disminuir los costos de producción y aumentar los rendimientos.

Así mismo se recomiendan disminuir el tiempo de subcultivo de los callos en el medio de proliferación de tejido embriogénico para evitar el proceso organogénico en los mismos.

Referencias

- [1] K. Barboza-Rojas, A. Hernández-Soto, y C. Zúñiga-Vega, «Semejanzas entre el ajo (*Allium sativum*) costarricense y el ajo asiático según secuencias de ADN ribosomal», 1, vol. 25, n.º 2, p. ág. 32-40, ago. 2012.
- [2] A. Guillén, C. Zúñiga, J. Brenes, L. Hilje, R. Chacón, y W. Rivera, *Cultivo del ajo en Costa Rica*. Costa Rica: EUNED, 2013.
- [3] L. Pérez Moreno, E. Palemón Alberto, S. Ayvar-Serna, y E. Cevallos Ruiz, «Adaptación de cultivares de ajo morado y blanco ("*Allium sativum*" L.) en Acatlán, Guerrero, México», *Acta Universitaria, ISSN 0188-6266, Vol. 15, N.º 1, 2005, pags. 55-65*, vol. 15, pp. 55-65, ene. 2005.
- [4] M. Reveles-Hernández, R. Velásquez-Valle, y Á. G. Bravo-Lozano, «Tecnología para el cultivar ajo en Zacatecas», p. 294, 2009.
- [5] J. I. Cubero, *Introducción a la mejora genética vegetal*, 3a ed. España: Mundi-Prensa Libros, 2013.
- [6] T. Murashige y F. Skoog, «A Revised Medium for Rapid Growth and Bio Assays with Tobacco Tissue Cultures», *Physiol Plant*, vol. 15, n.º 3, pp. 473-497, jul. 1962.
- [7] S. A. Nasim, A. Mujib, R. Kapoor, S. Fatima, y J. Aslam, «Somatic embryogenesis in *Allium sativum* L. (cv. Yamuna Safed 3): Improving embryo maturation and germination with PGRs and carbohydrates», *Anales de Biología*, vol. 32, pp. 1-9, 2010.
- [8] V. Parra Vega, «Aspectos básicos y aplicados de la inducción de embriogénesis en microsporas de pimiento y colza», Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de València, España, 2015.
- [9] E. Hernandez, «Embriogénesis somática in vitro y aclimatación de plántulas obtenidas por organogénesis directa en *heliconia* spp», Tesis Doctoral, Institución de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas, México, 2013.
- [10] A. Fehér, «The initiation phase of somatic embryogenesis: what we know and what we don't», *Acta Biologica Szegediensis*, vol. 52, pp. 53-56, 2008.
- [11] X. Yang y X. Zhang, «Regulation of Somatic Embryogenesis in Higher Plants», *Critical Reviews in Plant Sciences*, vol. 29, n.º 1, pp. 36-57, ene. 2010.
- [12] S. de J. Martínez *et al.*, «Maduración y germinación de embriones somáticos de *Sorghum bicolor* (L.) Moench cultivar 'CIAP 132R-05'», *Biotecnología Vegetal*, vol. 17, n.º 1, mar. 2017.
- [13] A. Lara, R. Valverde, y L. Gómez, «HISTOLOGÍA DE EMBRIONES SOMÁTICOS Y BROTES ADVENTICIOS», *AGRONOMÍA COSTARRICENSE*, vol. 27, pp. 37-48, 2003.
- [14] A. Espinosa, J. Silva, S. Sariago, L. Cholo Masapanta, y H. Delgado, «Efecto del tipo de explante y la concentración de ácido 2,4-diclorofenoxiacético en la formación de callos en *Morus alba* L.», *Pastos y Forrajes*, vol. 35, n.º 4, pp. 407-416, dic. 2012.
- [15] F. Villanueva, M. Ávila, A. Mansilla, S. Abades, y J. Cáceres, «Efecto de auxinas y citoquininas en el cultivo de tejido de *Ahnfeltia plicata* (Hudson) Fries, 1836 (Ahnfeltiales, rhodophyta) de la región de magallanes», *Anales del Instituto de la Patagonia*, vol. 41, n.º 1, pp. 99-111, 2013.
- [16] K. Carhuaricra, J. Olivera, J. Gonzales, y J. Rodríguez, «Introducción y multiplicación in vitro del cultivo de ajo variedad Morado Barranquino», *Rev peru biol*, vol. 19, n.º 3, pp. 341-344, jun. 2013.
- [17] N. N. Carbajal-Cruz, «Termoterapia y cultivo in vitro de ajo (*Allium sativum* L.) para la eliminación del virus del enanismo amarillo de la cebolla.», masters, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2018.

Food loss and waste in food services from educational institutions in Costa Rica

Pérdida y desperdicio de alimentos en servicios de alimentación de instituciones educativas de Costa Rica

Julián Rojas-Vargas¹, Yanory Monge-Fernández²,
María Fernanda Jiménez-Morales³, Laura Brenes-Peralta⁴,
Manrique Arguedas-Camacho⁵, Cindy Hidalgo-Viquez⁶,
Marcela Peña-Vásquez⁷, Blanca Vásquez-Rodríguez⁸

Fecha de recepción: 29 de noviembre de 2019
Fecha de aprobación: 13 de marzo de 2020

Rojas-Vargas, J; Monge-Fernández, Y;
Jiménez-Morales, M.F; Brenes-Peralta, L;
Arguedas-Camacho, M; Hidalgo-Viquez, C;
Peña-Vásquez, M; Vásquez-Rodríguez, B. Food loss and
waste in food services from educational institutions in Costa
Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-2. Abril-Junio 2021. Pág
187-196.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i2.4854>

- 1 Biología Tropical, Máster en Gestión y Estudios Ambientales. Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. Correo electrónico: julian.rojas.vargas@una.cr
 <http://orcid.org/0000-0003-2592-2872>
- 2 Biología Tropical, Bachiller en Biología. Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. Correo electrónico: yanorymf@hotmail.com
 <https://orcid.org/0000-0002-7036-5879>
- 3 Ing. Agropecuaria Administradora, Máster en Ingeniería. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. Correo electrónico: maria.jimenez@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-9775-2545>
- 4 Ing. Agropecuaria Administradora, Máster en Gerencia y Gestión Ambiental. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago Costa Rica. Correo electrónico: labrenes@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-5169-9961>
- 5 Administrador de Negocios, Máster en Administración de Negocios. Universidad EARTH, Limón, Costa Rica. Correo electrónico: margueda@earth.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0001-8559-9099>
- 6 Nutricionista, Licenciada en Nutrición. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. Correo electrónico: cindy.hidalgoviquez@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-0269-5008>
- 7 Nutricionista, Máster en Enfermedades Crónicas no transmisibles. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. Correo electrónico: marcela.penavasquez@ucr.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-9236-7656>
- 8 Nutricionista, Licda. en Nutrición Humana. Instituto Nacional de Aprendizaje, San José, Costa Rica. Correo electrónico: bvasquezrodriguez@ina.ac.cr



Keywords

Food loss; food waste; organic waste; university canteen.

Abstract

One-third of the worldwide food production is lost or wasted, generating impacts in the food systems. However, data indicates that one in nine people suffer from undernourishment or shortage of food in the world. Furthermore, this problem generates adverse impacts in the environment and the economy. Costa Rica is not exempt from this phenomenon; therefore, in compliance with target 12.3 of the Sustainable Development Goals, the country initiated actions through the Costa Rican Food Loss and Waste Reduction Network and one of its members, the Costa Rican Network of Sustainable Educational Institutions (REDIES). This latter committed itself to quantify the food loss and waste (FLW) in the canteens from a pilot group of their members. The objective of this case study was to determine the FLW in the restaurants of five institutions to generate data experience that allows to create indicators and useful information in the search for strategies against food waste. The amount of FLW was measured using the standardized methodology explained in the Guide for this purpose, published by the Costa Rican Network. In general terms, most FLW in this case study comes from the amount of food leftovers. Consequently, it is concluded and recommended to focus on awareness campaigns, quality and portioning to address the issue, and to consider that each institution must place emphasis through its reduction plan with respect to the findings generated in each food service or canteen.

Palabras clave

Pérdida de alimento; desperdicio de alimento; residuo orgánico; restaurante.

Resumen

Un tercio de la producción global de alimentos es perdida o desperdiciada, generando impactos en los sistemas alimentarios. Sin embargo, los datos indican que, en el mundo, una de cada nueve personas sufre subalimentación o escasez de comida. Además, este problema genera impactos adversos en el ambiente y la economía. Costa Rica no escapa de este fenómeno, por lo que, en concordancia con la meta 12.3 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, se han iniciado acciones a través de la Red Costarricense para Disminución de Pérdida y Desperdicio de Alimentos (Red PDACR) junto a uno de sus miembros, la Red Costarricense de Instituciones Educativas Sostenibles (REDIES). Esta última se comprometió a cuantificar la pérdida y desperdicio de alimentos (PDA) provenientes de los restaurantes de un grupo piloto de cinco de sus miembros. El objetivo del estudio fue determinar las PDA generadas en los restaurantes de esas instituciones para generar experiencia que permitiera crear indicadores e información útil en la búsqueda de estrategias para evitar el desperdicio alimentario. Las PDA fueron cuantificadas empleando la metodología estandarizada que contiene la “Guía para medición de desperdicio de alimentos en cocinas institucionales o comerciales” publicada por la Red PDACR. En general, la mayoría de las PDA detectadas en este caso provienen de alimento dejado en los platos de los usuarios. Consecuentemente, se concluye y recomienda enfocar las intervenciones en campañas de concientización, calidad y porcionamiento, para atender este problema, y considerar a su vez, que cada institución deberá colocar énfasis en un plan de reducción según los hallazgos particulares para cada restaurante.

Introduction

It has been estimated that the loss and waste of one-third of the globally produced food, generate significant impacts on the food and nutritional security of people, the economy of the actors of the agri-food system, and the environment [1].

Regarding food security, data from the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) show severe problems of malnutrition. On one hand, the high population growth, the high cost to access some foods, and the increase in fast-food restaurants is leading to problems of obesity and poor diet. In contrast, by 2017, one in nine people suffered from undernourishment or shortage of food in the world (approximately 821 million people) [2]. For example, just in the United States of America, food loss represented a 1250 kcal/person/day discard. In addition to this, the economic impact of food loss and waste (FLW) has been estimated at more than 160 billion US dollars in that same country [3]. At the environmental level, it is estimated that the FLW places enormous pressure on natural resources since it amount to annually discarding 250 km³ of water and 4.4 billion tons of CO₂ into the atmosphere [4].

There are several concepts to define FLW, whether edible or non-edible portions of food are included. In particular, FAO defines food losses as those agricultural, livestock or fishery products intended for human consumption which are discarded at the field level, in the post-harvest, the storage or the transport to distribution centers. On the other hand, food waste is food that was discarded or used in an alternative way from human nutrition, occurred at the distribution and trade process, as well as in the preparation of food and in the final consumption [5]. There is a coincidence in most references such as FAO, the World Resources Institute and the US Department of Agriculture, about the fact that they are products that could be consumed and for various reasons were discarded along the food supply chains [3]; this being the definition adopted in the present study. The foregoing also generates multiple quantification methodologies, such as studies on the generation and composition of waste, self-reporting and diaries, questionnaires, and direct measurements (mass measurement). However, these last processes can be extremely expensive and if geographical coverage is intended, it is challenging to be able to collect statistically representative information. On the contrary, mechanisms such as self-report may contain important biases [6]. Additionally, studies have shown that the causes of FLW are complex and interconnected throughout the chain, where the context plays an important role in the provision of appropriate interventions.

Among the causes of food waste generation, product quality attributed to the intrinsic nature of produce, or related to the market in which it is sold are key triggers of FLW. Inefficiency or failures in the flow of the supply chain, technology, awareness and knowledge (or lack of it), and other behavioral aspects, among others [7] are considered among the causes as well. At the level of food services, food waste monitoring can be seen as an efficiency tool, since the waste generated can be influenced by menu planning, tastes and preferences, employee training, portion size and user acceptance [8].

Several studies have been generated at the consumption level of food supply chains, particularly in food services, in order to start generating data related to the quantity and causes of food waste. A case study in six school canteens in Verona, Italy, determined that there was a 15% waste of prepared and un-served food [9], while another study in a Portuguese university identified 30% average waste per plate [8]. On the other hand, a study in a Thai school canteen indicated that only 11% of the users returned empty plates, while the majority of users (68%) left between 1% and 40% of the served portion [10].

In 2015, a new Sustainable Development agenda was created, and its purpose was to create positive transformations in various issues worldwide, through the proposal of several objectives known as the Sustainable Development Goals (SDGs). The objectives and goals set for the year 2030 include in their goal 12.3 of Objective 12, the halving of these food wastes [4].

Costa Rica, being no stranger to this problem, and as a subscriber to the SDGs, promotes the prevention and reduction of FLWs. The Costa Rican Food Loss and Waste Reduction Network was established in 2014 and became a member of the SAVE FOOD ® Global Initiative, in order to generate more awareness among Costa Ricans regarding food waste [11] [12]. Among its many actions, it published the *Guide of Food Loss and Waste Measurement in commercial and institutional kitchens* in 2017 [12], and the Costa Rican Network of Sustainable Education Institutions-REDIES, as a member of the initiative in the country, acquired the commitment to perform a FLW measurement in the food services belonging to some of its members. By locating only one similar formal study in the country, this research emerged with the main purpose of evidencing through a quantitative approach, data regarding FLW in food services of educational institutions. In addition, this pilot study aids in generating FLW quantification experience in the country. A measurement of the various foods prepared at breakfast and lunch times was carried out, in food services of five institutions.

Methodology

Location of the study

The present study was carried out in the food services or canteens of 5 campuses of educational institutions, coded as A, B, C, D and E (one of them partially reported by Rojas-Vargas; Monge-Fernández and Fernández-Hidalgo in 2020) [13]. These belong to tertiary and technical educational institutions, four of them distributed in the Great Metropolitan Area of Costa Rica, and one close to that area towards the Caribbean region. The studied canteens belonged to a mix of main institutional restaurants or satellite canteens, all with a relevant incursion of users according to the institutions. The measurement included the breakfast and lunch times, in three main areas of each canteen (supply and storage area, preparation and waste or leftovers collection area). The daily food production was also quantified to offer further indicators.

Collection and quantification of FLW

The Guide of Food Loss and Waste Measurement in commercial and institutional kitchens, published by the Costa Rican Network for Food Loss and Waste Reduction, was used [12] [13], taking measurements for at least three days at each site, placing in each restaurant four plastic containers to deposit in them the discarded product, as follows;

- FLWs in the Supply and Storage area, designated as “S”
- FLWs of the preparation area, indicated as “P”
- FLWs caused by leftovers in dishes, designated as “LF”
- Organic waste equivalent to non-edible portions of food, designated as “OW”.

All the discarded products from storage shelves, cold rooms, refrigerators, vegetable baskets, cellars and warehouses that could not be used for cooking because they were damaged or expired were placed in the container “S” (Supply and Storage area). It included fruits, vegetables, dairy products, sausages, and preliminary preparations from previous days or hours that were stored, among others. Organic materials coming from the preparation area were placed in container “P”, including all foods or portions that were discarded when cooking,

chopping, cutting, baking, frying or mixing that were burned, damaged, contaminated, dirty or did not meet optimal characteristics to be served and consumed by users. In addition, the waste that occurs when it comes to chopping foods such as meats or foods that cannot be served due to their aesthetics were placed here as well. One last container (OW) was placed to collect non-edible organic waste for that particular fraction [14], such as vegetable peels, eggshells, some seeds, bones, and related food residues that cannot be consumed by people in usual preparations. Finally, all the waste left by the users in their dishes was collected and placed in container "LF". These containers were placed before the start of the breakfast service and until the end of the lunch service, to then be weighed on an electronic scale with the respective tare of the container. Some were weighed until the end of the process; however, non-edible waste containers which usually met their capacity during the day, were weighed throughout the process.

Quantification of daily food production

Daily food production was accounted throughout the days of sampling in order to be able to subsequently generate an indicator of the FLW regarding the production of the food service, which may be useful as an indicator of efficiency. In this case, the mass of the initial products or foods withdrawn from the storage areas were considered. These data were noted in a template and a conversion factor was applied to raw products to have the value of the finished product [13]. This was done with all foods for both breakfast and lunch. By the end of the process, the weight of the final food that was not served or consumed but that could be stored for later consumption following safety standards was recorded, giving the amount of effective production of the day.

Analysis of the information

Based on the collected data as well as in the local guidelines [12] [13], the following formulas were applied to calculate daily food production (TDP) (formula 1), FLW with respect to daily production (% FLW DP) (formula 2) and proportion of FLW on each area, whether it was in the supply and storage area (% FLW S), preparation (% FLW P) and plate waste (% FLW LF) (formulas 3, 4 and 5, respectively).

$$\mathbf{TDP = Sum}(W_i - W_f) \quad (\text{formula 1})$$

$$\%FLW_{DP} = \frac{F}{DP} * 100 \quad (\text{formula 2})$$

Where W_i = Weight of the initial product (kg), W_f = Weight of the final product (kg). F = FLW/day (kg), DP = Daily production/day (kg)

$$\%FLW_S = \frac{C_S}{E} * 100 \quad (\text{formula 3})$$

$$\%FLW_P = \frac{C_P}{E} * 100 \quad (\text{formula 4})$$

$$\%FLW_{LF} = \frac{C_{LF}}{E} * 100 \quad (\text{formula 5})$$

Where C_S = Waste mass in the supply and storage area, C_P = Waste mass in the preparation area, C_{LF} = Waste mass produced by leftovers in dishes. E = Total sum of FLW per day (mass in kg of waste in the three areas).

For the statistical analysis of the data we used the Minitab program Version 18 to examine the average data of the food services of the five institutions. Initially, a data normality analysis was performed, using the Anderson-Darling test, since it tends to be more effective in detecting deviations in the distribution tails [15].

Based on the result of the normality test, and the amount of data (15 total observations in the case of FLW by area of FW generation, five for total daily food production, and five for the sum of total FLW according to the food service by site), the data was treated with non-parametric methods, as these are useful when the assumption of normality is not met and/or the sample size is small [15], as it is in this case. To check if there were significant differences between the groups, the Kruskal-Wallis test was selected, since it uses a logic similar to ANOVA, with the data replaced by categories [16].

Results and Discussion

As a first step, the average daily production data and of the FLW mass per site considered presented normal data (for an α of 0.05, $0.257 > 0.05$ for daily food production and $0.585 > 0.05$ for FLW). The Kruskal-Wallis test determined that there were no significant differences between them (p 0.406 in both cases). Figure 1 shows the food and FLW production data on average per day for each case.

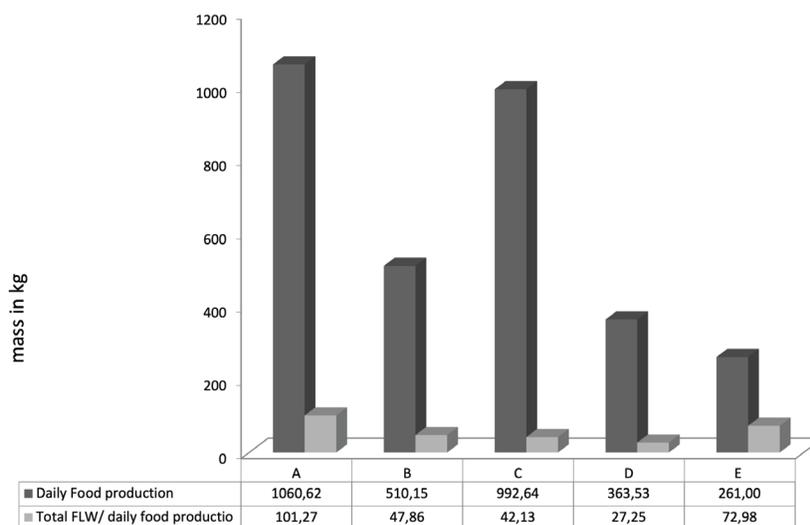


Figure 1. Food production and generation of food waste.

Food production per day and the total FLW generated in each of the institutions, show that institution A is the largest producer of food daily and also of greater mass of FLW, while the one with the lowest daily production turned out to be the second largest generator of FLW. Although it does not represent significant differences, it deserves review to detect best practices between one canteen and another to allow improvements.

The above can be seen more clearly in table 1, where a comparison of the percentage of FLWs regarding to daily production is seen.

Table 1. Percentage of FLW regarding to daily production and generation of total waste.

Daily food production and total FW evaluated						
	A	B	C	D	E	Simple Mean
FW%/Daily production	9,55	9,38	4,24	7,50	27,96	11,30
FW%/Total waste	54,61	53,01	46,64	72,53	61,93	57,44

It is observed that there are no significant differences between the percentage of FLW regarding the daily food production that occurs between the canteens. The relation of the FLW and the food production can constitute an indicator of the efficiency of their operation.

It will be valuable in the future to delve into the practices that occur in each site, looking to achieve indicators less than 5% of FLW; or seen in another way, those where more than 95% of food production is being used. On average, these food services have 11.30% of FLW compared to total daily production. Authors like Ravandi and Jovanovic [17] suggest that depending on the type of food service, FW varies from 36% to 50%, therefore the obtained results from these canteens appear to be lower and suggest higher efficiency; and it is similar to the 15% FW average presented by Falasconi, Vittuari, Politano, & Segrè, [9].

Further information obtained from table 1 is the proportion of FLW and total organic waste. Institutions commonly dedicate part of their budgets and efforts to properly handle their waste generation, and while general statistics in Costa Rica indicate that almost half of ordinary wastes are composed of biodegradable ones, this table shows that FLW is accountable for over half (57,44% average, with no significant differences among the sites) of that biodegradable waste. Studies like the one performed by Ahmed, Shanks, Lewis, & Leitch [18], indicate that prior to interventions in FLW reduction and awareness, this portion represented 61,54% of the total organic fraction of wastes. The opportunities to reduce general waste generation in educational institutions is relevant then, through proper FLW prevention and reduction interventions. These results are useful indicators in comprehensive waste management strategies based on prevention and reduction from the source of generation, aligned to current national legislation, such as Law 8839 [19]. Likewise, it is possible that the institutions come to consider strategies for the valorization of this type of waste; therefore, the accurate quantification could allow the proper design and sizing of these options. Additionally, if the environmental component is considered within the implications of the FLWs, reducing this percentage would imply an opportunity to minimize greenhouse gases that would result from their conventional degradation in a landfill.

Regarding the analysis of the FLW by area, an analysis of normality considering an α of 0.05, showed a p value = 0.027 so it could be concluded that the data were not normal (0.027 < 0.05). The Kruskal-Wallis test was applied for the average mass data per area for the study sites, resulting in a p value of 0.054, thus providing the conclusion that there were no significant differences between them. The same was done for the FLW per site, resulting in a p value of 0.569, demonstrating that there were no significant differences in this case either.

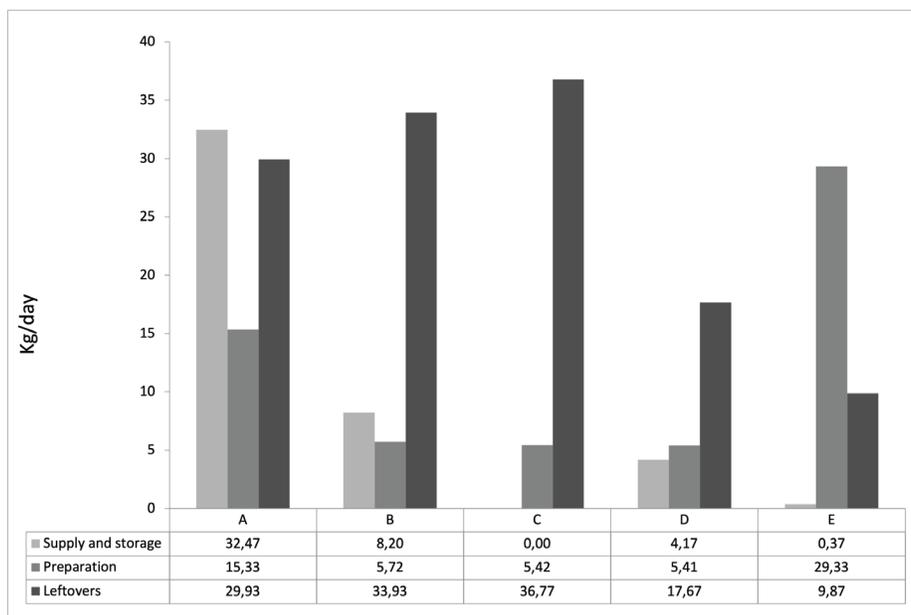


Figure 2. Average mass of FLW generated in each feeding area daily per site.

The result observed in Figure 2 is relevant because it would allow each site to know in which area of its food service it should focus to minimize FLW. It is observed that in three of the sites the largest mass was observed due to leftovers in dishes, while in one of them it was due to the supply and storage area, and another was due to preparation.

In this sense, implementing better controls in the storage of food, using fresh products, and continuously monitoring the expiration and purchase dates would be useful to avoid FLW in the in the supply and storage area; while controls in quality, food handling, control techniques and eventually technology would be appropriate to reduce FLW in preparation. Finally, a review of quality and variety of the menu, temperature, and portioning could affect the case of leftovers as Manomaivibool, Chart-asa, & Unro [10] and Ferreira, Martins & Rocha [8] stated in their studies. The truth is that these interventions begin to be possible when priority areas are quantified and identified for each site, which may be further accompanied with more thorough evaluations of causes.

Table 2 shows the average percentage values in the three areas of generation, storage, preparation and waste of dishes according to existing literature and the average obtained in this study (not considering the mass of non-edible parts in the total base of obtained waste).

Table 2. Average FLW in each area evaluated.

Area	Literature (%)	Average obtained (%)
Supply and Storage	21	19,27
Preparation	45	26,10
Leftovers	34	54,63

The area where the greatest amount of food waste is generated is in the plate residue (54.63%), which exceeds the value suggested by sources as WRAP [20]. It should be noted that the data presented must be analyzed carefully the particularities of each case must be observed, since the information obtained varies from one institution to another according to the volume, design

and influx of the service. Although the statistical tests show that there are no differences in the data generated by the institutions, it is necessary to consider that to have greater robustness of the test a larger sample size is required.

In general terms, the area where users must be prioritized and sensitized is the return of dishes, since more than half of the waste is generated in this area. However, the other areas should not be overlooked. Additionally, each institution must focus its reduction plan with respect to the findings generated in each investigation. This is because each institution has restaurants with a number of users and other variables that can behave differently. In one of the sites the priority would be to start evaluating what specific practices or conditions are happening in restaurant kitchens that cause a higher percentage of FW in the preparation area, review food handling practices, control cooking times among other procedures. Others would need to look closer into inventories, and storage practices. Finally, other sites should focus on awareness campaigns against FW and menu quality due to the number of leftovers in the dishes by the users of the restaurants of each institution, as portrayed in previous studies by Manomaivibool, Chart-asa, & Unroj [10] and Ellison, Savchenko, Nikolaus, & Duf, [21].

Conclusions and recommendations

This case study represents one of the first executed for Costa Rica where information from various food services is combined in an effort to generate experience in quantification of FLW in this portion of the food supply chains, as well as data that can help to build indicators in the country. Being a case study, there was a limitation of having a reduced data set, which makes it necessary to recommend expanding the sample and days of measurement, in addition to deepen studies that help determine causes of FLW.

Applying the Guide generated by the Costa Rican Network for Food Loss and Waste Reduction to measure the FLW in kitchens, allowed a comparative analysis of the FLW generated in these institutions. This not only supports the importance of having unified quantification methodologies to be able to offer comparisons and inferences, but also opens the possibility for these entities as part of the REDIES consortium, to exchange experiences and achieve best practices that allow the prevention and reduction of FLW.

The systematization of the measurement process, as well as the subsequent monitoring of these cases, will allow the establishment of bases to exemplify success stories that can be replicated in the future in the country and move towards the achievement of SDG target 12.3.

Acknowledgments

The authors wish to recognize the work of the volunteer students and collaborators of the different institutions of the study who cooperated in data collection processes and previous validation exercises such as the Small Hotels Network (RedNaPH), Nieto, FAO, and the Costa Rican Restaurants Chamber (CACORE). A special mention is given to the professionals and teams that intervened in the planning, execution and reporting processes of these measurement exercises such as students and professionals from the Agribusiness School from TEC, including Marianella Gamboa-Murillo and Andrey Ureña-Jiménez, Andrea Acuña Piedra from GASEL-TEC, Carlos M. Escobedo from EARTH Cafetería and the students from the School of Nutrition Module 3 and FLW internship of years 2018-2019 of UCR. We also thank the General Service Units, Environmental Management Offices and Food Service units for taking these first steps to improve each day their performance, professionalism and commitment to food security and nutrition of thousands of students.

References

- [1] FAO, Food Wastage Footprint: Full Cost-A ccounting. Final Report., Roma, Italia: FAO, 2014.
- [2] FAO, OPS, WFP y UNICEF, "Panorama de la seguridad alimentaria y nutricional en América Latina y el Caribe 2018," 2018. [Online]. Available: <http://www.fao.org/3/CA2127ES/CA2127ES.pdf>.
- [3] K. Kibler, D. Reinhart, C. Hawkins, A. Mohaghegh Motlag and J. Wright, "Food waste and the food-energy-water nexus: A review of food waste management alternatives," *Waste Management*, Volume 74, pp. 52-62 <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.014>, 2018.
- [4] FAO, "FAO and the SDSs. Indicators: Measuring up to the 2030 Agenda for Sustainable Development," 2017. [Online]. Available: <http://www.fao.org/3/a-i6919e.pdf>
- [5] FAO, "Pérdidas y Desperdicios de Alimentos en América Latina y el Caribe.," 2016. [Online]. Available: www.fao.org/publications .
- [6] S. Corrado, C. Caldeira, M. Eriksson, O. Jørgen Hanssen, H.-E. Hauser, F. van Holsteijn, G. Liu, K. Östergren, A. Parry and L. Secondi, "Food Waste accounting methodologies: Challenges, opportunities and further advancements," *Global Food Security* 20, pp. 93-100 <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.01.002>, 2019.
- [7] M. Canali, P. Amani, L. Aramyan, M. Gheoldus, G. Moates, K. Östergren, K. Silvennoinen, K. Waldron and M. Vittuari, "Food Waste Drivers in Europe, from Identification to Possible Interventions," *Sustainability* 9, 37, p. doi:10.3390/su9010037, 2017.
- [8] M. Ferreira, M. L. Martins and A. Rocha, "Food waste as an index of foodservice quality," *British Food Journal* Vol. 115 No. 11, pp. 1628-1637 DOI 10.1108/BFJ-03-2012-0051, 2013.
- [9] L. Falasconi, M. Vittuari, A. Politano and A. Segrè, "Food Waste in School Catering: An Italian Case Study," *Sustainability* 7, pp. 14745-14760; doi:10.3390/su71114745, 2015.
- [10] P. Manomaivibool, C. Chart-asa and P. Unroj, "Measuring the Impacts of a Save Food Campaign to Reduce Food Waste on Campus in Thailand," *Applied Environmental Research* 38 (2), pp. 13-22, 2016.
- [11] TEC, "RED COSTARRICENSE PARA LA DISMINUCIÓN DE PÉRDIDAS Y DESPERDICIOS DE ALIMENTOS," 2017. [Online]. Available: <https://www.tec.ac.cr/red-costarricense-disminucion-perdidas-desperdicios-alimentos>.
- [12] PDA CR, "Guía para la Medición del Desperdicio de Alimentos en cocinas Institucionales o Comerciales," 2017. [Online]. Available: https://www.tec.ac.cr/sites/default/files/media/doc/2_guia_medicion_cocinas_web.pdf.
- [13] Rojas-Vargas, J; Monge-Fernández, Y and Fernández-Hidalgo, K. "Desperdicios de alimentos (DA) en sodas concesionadas de una Universidad Pública en Heredia, Costa Rica". *Tecnología en Marcha* 33(1), p152-164. <https://doi.org/10.18845/tm.v33i1.50291>, 2020.
- [14] INCAP, "Tabla de composición de Alimentos de Centroamérica, 2da edición. ISBN 999922-880-2-7," 2012. [Online]. Available: <http://www.sennutricion.org/media/tablas/INCAP.pdf>.
- [15] Minitab, "Soporte de Minitab," 9 agosto 2019. [Online]. Available: <https://support.minitab.com>.
- [16] Y. Chan and R. P. Walmslqr, "Learning and Understanding the Kruskal-Wallis One-Way Analysis-of Variance-by-Ranks Test for Differences Among Three or More Independent Groups," *Physical Therapy*, p. 1755, 1997.
- [17] B. Ravandi and N. Jovanovic, "Impact of plate size on food waste : Agent-based simulation of food consumption.," *Resources, Conservation & Recycling*, 149, p. 550–565. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.05.03>, 2020.
- [18] S. Ahmed, C. Shanks, M. Lewis and A. Leitch, "Meeting the food waste challenge in higher education challenge," *International Journal of Sustainability in Higher Education* 19 (6), pp. 1075–1094. <https://doi.org/10.1108/IJSHE-08-2017-0127>, 2018.
- [19] Sistema Costarricense de información jurídica. Ley no 8839 para la Gestión Integral de Residuos. Online. Available at https://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=68300&nValor3=83024&strTipM=TC
- [20] WRAP, "Hospitality and Food Service Reducing Food Waste: Starting Off.," WRAP, United Kingdom, 2014.
- [21] B. Ellison, O. Savchenko, C. Nikolaus and B. Duf, "Every plate counts : Evaluation of a food waste reduction campaign in a university dining hall," *Resources, Conservation & Recycling*, 144(, p. 276–284. <https://doi.org/10.1016>, 2019.