

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Camila Alves de Cremo

Daphynny Pamplona

Gabriel Motomu Teshima

Luiza Alves Batista

Natália Sandrini de Azevedo

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2022 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2022 Os autores

Copyright da edição © 2022 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-Não-Derivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná



Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista



Ciências exatas y de la tierra: observación, formulación y predicción

Diagramação: Camila Alves de Cremo
Correção: Yaidy Paola Martinez
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores
Organizador: Francisco Odécio Sales

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C569 Ciências exatas y de la tierra: observación, formulación y predicción / Organizador Francisco Odécio Sales. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2022.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-5983-908-7

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.087220703>

1. Ciências exatas. I. Sales, Francisco Odécio (Organizador). II. Título.

CDD 507

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná – Brasil
Telefone: +55 (42) 3323-5493
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br



Atena
Editora
Ano 2022

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.



DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.



APRESENTAÇÃO

A obra “Ciencias exactas y de la tierra: Observación, formulación y predicción” aborda uma série de publicações da Atena Editora apresenta, em seus 6 capítulos, discussões de diversas abordagens acerca do ensino, pesquisa e inovação. As Ciências Exatas e da Terra englobam, atualmente, alguns dos campos mais promissores em termos de pesquisas atuais. Estas ciências estudam as diversas relações existentes da Física; Biodiversidade; Ciências Biológicas; Ciência da Computação; Engenharias; Geociências; Matemática/ Probabilidade e Estatística e Química. O conhecimento das mais diversas áreas possibilita o desenvolvimento das habilidades capazes de induzir mudanças de atitudes, resultando na construção de uma nova visão das relações do ser humano com o seu meio, e, portanto, gerando uma crescente demanda por profissionais atuantes nessas áreas. A ideia moderna das Ciências Exatas e da Terra refere-se a um processo de avanço tecnológico, formulada no sentido positivo e natural, temporalmente progressivo e acumulativo, segue certas regras, etapas específicas e contínuas, de suposto caráter universal. Como se tem visto, a ideia não é só o termo descritivo de um processo e sim um artefato mensurador e normalizador de pesquisas. Neste sentido, essa obra é dedicada aos trabalhos relacionados a pesquisa e inovação. A importância dos estudos dessa vertente, é notada no cerne da produção do conhecimento, tendo em vista o volume de artigos publicados. Nota-se também uma preocupação dos profissionais de áreas afins em contribuir para o desenvolvimento e disseminação do conhecimento. Os organizadores da Atena Editora, agradecem especialmente os autores dos diversos capítulos apresentados, parabenizam a dedicação e esforço de cada um, os quais viabilizaram a construção dessa obra no viés da temática apresentada. Por fim, desejamos que esta obra, fruto do esforço de muitos, seja seminal para todos que vierem a utilizá-la.

Francisco Odécio Sales

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1..... 1

APLICACIÓN DE LA BIOMASA DEL HONGO *Aspergillus niger* PARA LA REMOCIÓN DE MERCURIO EN SOLUCIÓN

Ismael Acosta Rodríguez
Nancy Pacheco Castillo
Adriana Rodríguez Pérez
Juan Fernando Cárdenas González
Víctor Manuel Martínez Juárez
Francisco Navarro Castillo
Erika Enríquez Domínguez
Juana Tovar Oviedo

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0872207031>

CAPÍTULO 2..... 14

CALIDAD DEL AGUA EN LA REGIÓN CENTRO DE LA MESETA P´URHÉPECHA

Silvano. Velázquez Roque
Miguel Ángel. Madrigal Cardiel.
Ulises. Zurita Luna
Juan. Damián Hernández

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0872207032>

CAPÍTULO 3..... 25

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN MOLINO COMPACTO PARA POLIETILENO TEREFTALATO

Miguel Ángel Madrigal Cardiel
Silvano Velázquez Roque
Jesús Maldonado Paleo
Ulises Zurita Luna
Juan Damián Hernández

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0872207033>

CAPÍTULO 4..... 38

MEDICIÓN DE PROPIEDADES MECANO-ELÁSTICAS (DENSIDAD Y GROSOR) EN PLACAS DELGADAS CON USO DE EFECTO FOTOACÚSTICO

Nestor Antonio Flores Martínez
Valentín Guzmán Ramos
Romeo de Jesús Selvas Aguilar
José Valentín Guzmán
Arturo Alberto Castillo Guzmán

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0872207034>

CAPÍTULO 5..... 52

MODELACIÓN DE PATRONES DE VEGETACIÓN CON ECUACIONES NO LINEALES UTILIZANDO LOS MODELOS HARDENBERG Y LEFEVER

Rebeca Franco

Marco A. Morales
José I. Rodríguez-Mora
Ricardo Agustín-Serrano

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0872207035>

CAPÍTULO 6..... 65

UTILIZAÇÃO DOS EXTRATOS BOTÂNICOS DE FOLHAS DE LARANJA (*Citrus sinensis* L), SOBRE AS FORMIGAS CORTADEIRAS (*Atta sexdens sexdens*) EM CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS

Antônio Geilson Matias Monteiro
Adriana Dantas Gonzaga de Freitas

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.0872207036>

SOBRE O ORGANIZADOR..... 73

ÍNDICE REMISSIVO..... 74

CAPÍTULO 1

APLICACIÓN DE LA BIOMASA DEL HONGO *Aspergillus niger* PARA LA REMOCIÓN DE MERCURIO EN SOLUCIÓN

Data de aceite: 01/03/2022

Ismael Acosta Rodríguez

Laboratorio de Micología Experimental.
Facultad de Ciencias Químicas. Universidad
Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí,
S.L.P. México
ORCID: 0000-0001-8620-2727

Nancy Pacheco Castillo

Laboratorio de Micología Experimental.
Facultad de Ciencias Químicas. Universidad
Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí,
S.L.P. México

Adriana Rodríguez Pérez

Universidad Autónoma de San Luis Potosí,
Unidad Académica Multidisciplinaria Zona
Media. Río Verde, San Luis Potosí, México

Juan Fernando Cárdenas González

Universidad Autónoma de San Luis Potosí,
Unidad Académica Multidisciplinaria Zona
Media. Río Verde, San Luis Potosí, México
ORCID: 0000-0002-3502-5959

Víctor Manuel Martínez Juárez

Área Académica de Medicina Veterinaria y
Zootecnia. Instituto de Ciencias Agropecuarias.
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
Tulancingo de Bravo, Hidalgo, México
ORCID: 0000-0002-7426-6835

Francisco Navarro Castillo

Laboratorio de Micología Experimental.
Facultad de Ciencias Químicas. Universidad
Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí,
S.L.P. México
<https://scholargoogle.com.mx> Francisco Navarro
Castillo

Erika Enríquez Domínguez

Laboratorio de Micología Experimental.
Facultad de Ciencias Químicas. Universidad
Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí,
S.L.P. México
ORCID: 0000-0001-6133-1768

Juana Tovar Oviedo

Laboratorio de Microbiología. Facultad de
Ciencias Químicas. Universidad Autónoma de
San Luis Potosí, San Luis Potosí, S.L.P. México
<https://www.semanticscholar.org> Juana Tovar
Oviedo

RESUMEN: En este trabajo, se analizó la capacidad de remoción de mercurio (II) en solución acuosa por la biomasa del hongo *Aspergillus niger* por el método de Espectrofotometría de Absorción Atómica. El hongo crece hasta en 2000 ppm del metal (20.3% de crecimiento con respecto al control). Se evaluó la bioadsorción a diferentes valores de pH (3.5, 4.5 y 5.5) y a diferentes tiempos. También se estudió el efecto de la temperatura en el intervalo de 28°C hasta 45°C y la remoción a diferentes concentraciones iniciales de mercurio (II) de 100 a 500 mg/L. La mayor bioadsorción (83.2% con 100 mg/L del metal y 1 g de biomasa) fue a las 24 h, a pH de 5.5. Con respecto a la temperatura, la más alta remoción fue a los 28°C, con un 83.2% de remoción a las 24 h, y a mayores concentraciones de biomasa, la remoción fue más eficiente (100%, 12 h y 5 g de biomasa). La biomasa natural mostró una excelente capacidad de remoción del metal *in situ*, 69% de remoción a partir de aguas contaminadas, a los 7 días de

incubación y 5 g de la biomasa (100 mL de agua), por lo que se puede utilizar para eliminarlo de aguas residuales industriales.

PALABRAS CLAVE: Remoción, biomasa, *Aspergillus niger*, mercurio.

APPLICATION OF THE BIOMASS OF THE FUNGUS *Aspergillus niger* FOR THE REMOVAL OF MERCURY IN SOLUTION

ABSTRACT: In this work, the removal capacity of mercury (II) in aqueous solution by the biomass of the *Aspergillus niger* fungus was analyzed by the Atomic Absorption Spectrophotometry method. The fungus grows up to 2000 ppm of the metal (20.3% growth with respect to the control). Bioadsorption was evaluated at different pH values (3.5, 4.5 and 5.5) and at different times. The effect of temperature in the range of 28°C to 45°C and removal at different initial concentrations of mercury (II) of 100 to 500 mg/L were also studied. The highest bioadsorption (83.2% with 100 mg/L of the metal and 1 g of biomass) was at 24 h, at a pH of 5.5. Regarding temperature, the highest removal was at 28°C, with 83.2% removal at 24 h, and at higher biomass concentrations, removal was more efficient (100%, 12 h and 5 g of biomass). The natural biomass showed an excellent in situ metal removal capacity, 69% removal from contaminated water, at 7 days of incubation and 5 g of biomass (100 mL of water), so it can be used for remove it from industrial wastewater.

KEYWORDS: Removal, biomass, *Aspergillus niger*, mercury.

INTRODUCCIÓN

El mercurio y los compuestos de mercurio están presentes en numerosos tipos de productos de consumo e industriales, por ejemplo: Extracción de oro y plata de las minas, auxiliar en la producción de químicos de cloro-álcali, en manómetros, termómetros, interruptores eléctricos y electrónicos, lámparas fluorescentes, amalgamas dentales, aleado con otros metales, en la fabricación de pilas, como biocidas en la industria del papel, en pinturas o en semillas, antisépticos en productos farmacéuticos, para análisis químicos, y como catalizadores, para hacer más eficaz la fabricación de otras sustancias químicas, en pigmentos y tintes, detergentes y explosivos (Rocha-Román y cols., 2018). En el medio ambiente acuático, el mercurio elemental probablemente quedará unido al sedimento y luego será transportado por las corrientes marinas o fluviales. Una parte del mercurio permanece disuelta en el agua. En los sistemas acuáticos, los microorganismos ahí presentes de manera natural pueden transformarlo en metilmercurio, un compuesto organometálico que es más tóxico a dosis bajas que el mercurio en estado puro. El metilmercurio pasa a formar parte de la cadena alimenticia acuática, se bioacumula y se biomagnifica, de esta manera puede ser transportado posteriormente por las especies migratorias (Bell y cols., 2014). La exposición ocupacional al mercurio sigue siendo un problema actual para los trabajadores de muchas industrias como la minería del mercurio, producción de cloro-álcali, fabricación de termómetros, lámparas fluorescentes, baterías y otros productos que contienen mercurio, extracción y refinación de oro, plata, cobre y níquel

quienes sufren la mayor exposición son los millones de trabajadores de la extracción de oro artesanal y aquellos que extraen el metal en pequeña escala. Estos mineros usan mercurio elemental para separar el oro de los desechos de roca, generalmente en condiciones poco o nada controladas. Como resultado de ello, los mineros, sus familias y sus comunidades están muy expuestos al metal, con sus muy graves consecuencias para su salud (Bell y cols., 2014).

LA PRODUCCIÓN DE MERCURIO EN MÉXICO

Los minerales de mercurio se encuentran localizados principalmente en las siguientes entidades federativas (en particular en el noroeste y centroeste del territorio): Aguascalientes, Chihuahua, Coahuila, Durango, Guanajuato, Hidalgo, México, Morelos, Nuevo León, Querétaro, San Luis Potosí, Sinaloa, Sonora, Tamaulipas, Tlaxcala y Zacatecas, ubicándose los principales yacimientos en los estados de: San Luis Potosí, Zacatecas, Querétaro, Guanajuato y Guerrero (Figura 1, cuadros negros) (Consejo de Recursos Minerales 2002).

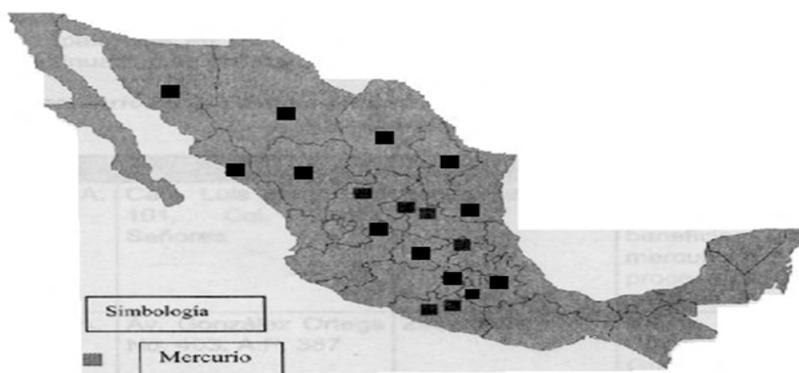


Figura 1.- Modificada de: Principales yacimientos de mercurio en la República Mexicana. (Consejo de Recursos Minerales 2002).

Se tienen registros de la producción de mercurio en México desde 1891, y en los últimos años se ha mostrado la misma tendencia descendente que la producción mundial. Entre 1920-1929 su producción fue mínima y alcanzó su máximo de 1,118 toneladas en 1942; en 1991 se produjeron 340 toneladas de mercurio, mientras que en 1994 sólo 11 toneladas. A partir de 1995 no se tienen registros de su extracción minera (Consejo de Recursos Minerales 2002). Sin embargo, la producción secundaria de mercurio continúa, en particular, al recuperarlo como subproducto de la extracción de plata y oro a partir de jales (desechos) mineros en el estado de Zacatecas, donde se producen alrededor de 20 toneladas anuales. Entre las plantas productoras de minerales metálicos registradas en

la Cámara Minera de México, se han descrito cuatro, que se dedican a la producción de mercurio a partir del beneficio de minerales y de jales de mercurio, las cuales se encuentran ubicadas en los estados de San Luis Potosí, Durango y Zacatecas. Asimismo, se tiene conocimiento que hasta hace algunos años operaban dos plantas más en el estado de Zacatecas, que benefician jales por el proceso de lixiviación, utilizando hiposulfito de sodio, para obtener oro y plata como producto y mercurio como subproducto, y debido a la reducción de los usos comerciales del metal tanto a nivel internacional como en México, y por la saturación del mercado nacional, se ha reducido su producción hasta haber dejado de producirlo desde 1995 a la fecha (INE 2001).

Por lo anterior, la situación que se vive en México con respecto a la contaminación y/o producción de mercurio, es contradictoria, pues a pesar de las disposiciones normativas formuladas, que limitan las emisiones de mercurio a la atmósfera y al agua y controlan la eliminación de residuos que contienen mercurio, el elemento no ha sido regulado como producto comerciable y se ha hecho poco por fomentar entre la población una adecuada conciencia en cuanto a la exposición al mercurio y la reducción de sus riesgos, y de acuerdo con el Artículo 7° de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, los residuos peligrosos son de competencia de la federación, mientras que la NOM-052-SEMARNAT-2005 establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos, incluyendo aquellos que contienen mercurio, incluyendo diversos residuos con mercurio, clasificados como residuos peligrosos, y se establece como criterio de toxicidad la concentración de diversas sustancias en el extracto PECT (cuyo proceso se establece en la NOM-053-SEMARNAT-1993), siendo de 0.2 mg/L para el caso de mercurio.

ANTECEDENTES

La bioadsorción es un proceso fisicoquímico que incluye los fenómenos de adsorción y absorción de moléculas e iones. Este método tiene como objetivo principal la remoción de metales pesados en aguas residuales provenientes del sector industrial, usando como sorbentes diferentes materiales de origen biológico (vivos o muertos), tales como: algas, hongos, bacterias, cáscaras de frutas, productos agrícolas y algunos tipos de biopolímeros. Estos materiales son de bajo costo y se encuentran en gran abundancia en la naturaleza, además, su transformación a biosorbente no es un proceso costoso (Acosta Rodríguez y cols., 2012; Tejada Tovar y cols., 2015). El proceso de bioadsorción involucra una fase sólida (biomasa) y una fase líquida (agua) que contiene disueltos la sustancia de interés que será adsorbida (en este caso, los iones de los metales pesados).

Investigaciones recientes sobre la adsorción de iones de metales pesados en aguas residuales, realizadas a nivel mundial, revelan la capacidad de adsorción de diferentes biomasas naturales como *Aspergillus versicolor* (Das et al., 2007); carbones

activados (Colpas et al., 2016); *Omphalina* sp. (Purwaningsih et al., 2016); *Escherichia coli*, *Pseudomonas putida*, *Serratia marcescens* y *Xanthomonas* sp. (Ashraf y Essa, 2012); *Phanerochaete chrysosporium* (Bashardoost et al., 2010); *Rhizopus oligosporus* (Ozsoy 2010); sílica biogénica modificada con L- cisteína (Chaves et al., 2011); diferentes hongos contaminantes ambientales (Martínez Juárez et al., 2012); y el hongo *Mucor hiemalis* (Hoque y Fritscher, 2016). Por lo anterior, es de gran interés analizar otros microorganismos capaces de eliminar el mercurio (II) de aguas y suelos contaminados con dicho metal, como la biomasa del hongo contaminante ambiental *Aspergillus niger*, microorganismo que podría remover el mercurio por interacción con los componentes estructurales de la pared celular, como los grupos carboxilos y amino. Además, una ventaja del uso de este hongo como biomasa, es que se puede propagar de manera muy fácil y económica.

MATERIAL Y MÉTODOS

Bioadsorbente utilizado y obtención de la biomasa fúngica

Se trabajó con una cepa de *A. niger* que crece en 2000 mg/L de mercurio (II), aislada del aire contaminado de una zona adyacente a la Facultad de Ciencias Químicas de la UASLP, San Luis Potosí, S.L.P., México, en el mes de junio de 2015; y se identificó en función de sus características morfológicas, tanto macroscópicas como microscópicas (López Martínez et al., 2004). La cepa fúngica se mantuvo de manera rutinaria en agar de dextrosa y papa. Para la obtención de la biomasa, se sembraron 1×10^6 esporas/mL del hongo en matraces Erlenmeyer de 1 L, que contenían 600 mL de caldo tioglicolato, incubándose durante 5 días a 28 °C y 100 rpm. Después, la biomasa se obtuvo por filtración y se lavó con 200 mL de agua tridesionizada. El producto se molió en una licuadora y se almacenó en frascos ámbar hasta su uso. Soluciones de Mercurio (II).

Se trabajó con 100 mL de una solución de 100 mg/L de mercurio (II) obtenida por dilución de una solución patrón de 1 g/L preparada en agua tridesionizada a partir de cloruro de mercurio. Se ajustó el pH de la dilución a analizar con H_2SO_4 1 M o NaOH 1 M, antes de adicionarlo a la biomasa.

Prueba de Resistencia al Mercurio

Se inocularon 1×10^6 esporas/mL en 12 matraces Erlenmeyer de 250 mL, conteniendo 100 mL de medio mínimo de Lee modificado (LMM), conteniendo 1.0 % de agar, 0.25 % de KH_2PO_4 , 0.20 % de MgSO_4 , 0.50 % de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, 0.50 % de NaCl y 0.25 % de glucosa como fuente de carbono, y complementado con concentraciones crecientes de mercurio (II), como cloruro de mercurio (0-2000 mg/L), incubando a 28°C a 100 rpm durante 7 días. Después, se cosechó el sobrenadante en un tubo graduado, previamente pesado, y se centrifugó a 3000 rpm/10 min, desechando el sobrenadante. El paquete celular se secó a 80°C, durante 12 h, y se pesó el tubo, determinando por diferencia el peso seco de la

muestra, comparando el crecimiento con un control crecido en las mismas condiciones sin la adición de mercurio (II). Todos los experimentos se realizaron mínimo 3 veces por duplicado.

Estudios de remoción de mercurio (II)

La concentración de mercurio (II) en solución, se determinó por Espectrofotometría de Absorción Atómica por generación de hidruros (SSA, 1994).

RESULTADOS

En la Figura 2 se muestra que, a medida que se aumenta la concentración del metal (200-2000 mg/L) en la solución, el crecimiento de *A. niger* en el medio de Lee, disminuye en relación con el control, pues con 2 g/L de mercurio (II), el crecimiento fue de aproximadamente un 20.3 % de crecimiento con respecto al control (85,4 mg de peso en seco sin metal).

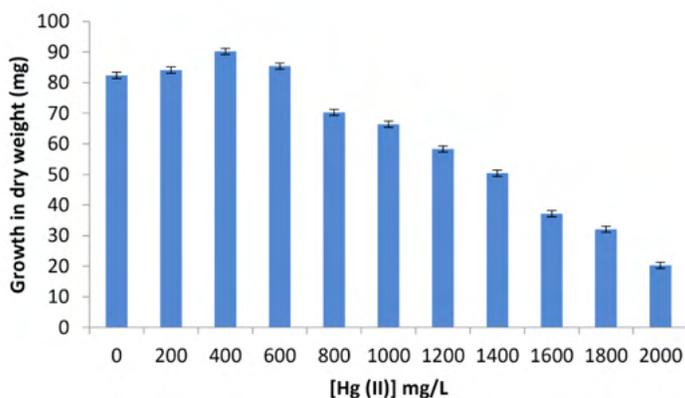


Figura No. 2. Crecimiento en peso seco de *A. niger* con diferentes concentraciones de mercurio (II), 1×10^9 esporas/mL, 28°C, 7 días de incubación y 100 rpm.

Con respecto al efecto del pH y tiempo de incubación sobre la remoción de 100 mg/L de mercurio (II) por la biomasa del hongo *A. niger*, se observó que la mayor bioadsorción ocurre a las 24 horas y a un pH de 5.5, con una remoción del 83.2 % (Figura 3).

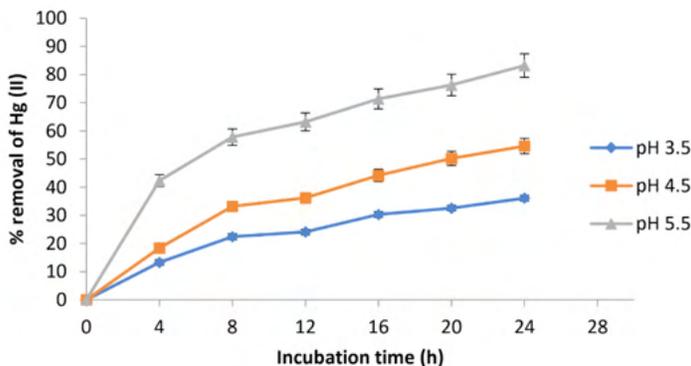


Figura No. 3. Efecto del tiempo de incubación y pH sobre la eliminación de mercurio (II) por la biomasa de *A. niger* 100 mg / L Hg (II), 100 rpm, 28°C, 1 g de biomasa.

Con relación al efecto de la temperatura de incubación, la temperatura óptima para la remoción de mercurio (II) fue de 28 °C, con un porcentaje de remoción de 85 %. Dichos resultados se ilustran en la Figura 4.

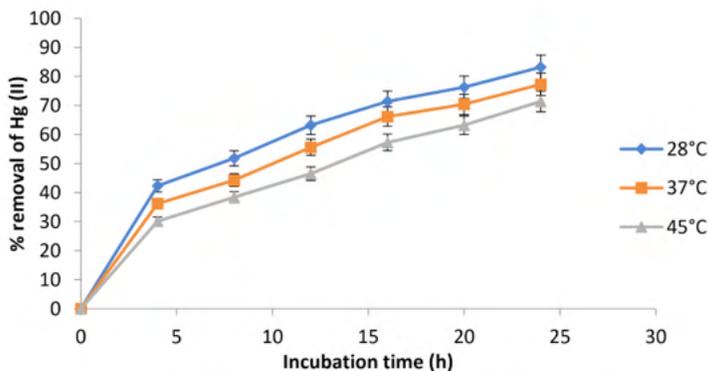


Figura No. 4. Efecto de la temperatura de incubación sobre la remoción de mercurio (II) por la biomasa de *A. niger* 100 mg / L de Hg (II), 100 rpm, 28°C. 1 g de biomasa.

Además, la concentración inicial del metal influye en su remoción, pues el porcentaje de remoción es menor a medida que se aumenta la concentración del contaminante, debido a que, al haber mayor cantidad del metal disponible, hay menor interacción de las moléculas del contaminante con los sitios de adsorción de la biomasa (Figura 5).

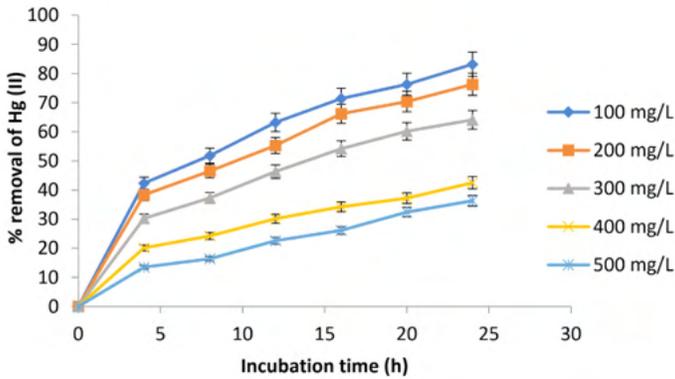


Figura No. 5. Efecto de la concentración inicial de metal sobre la remoción de mercurio (II) por la biomasa de *A. niger*. 100 rpm, 28 ° C. 1 g de biomasa.

Por otro lado, al aumentar la concentración de la biomasa, aumenta la eficiencia de remoción, pues con 5 g de biomasa, el tiempo de remoción es menor para el metal analizado (Figura 6).

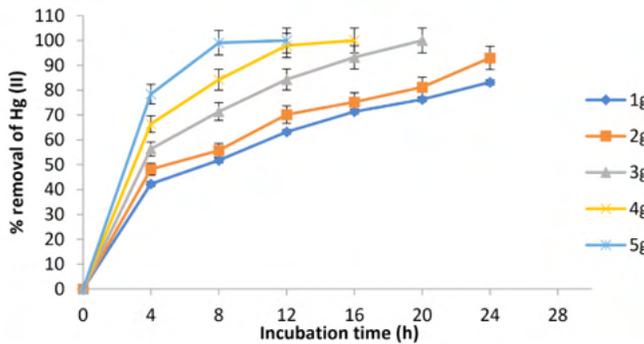


Figura No. 6. Efecto de la concentración de biomasa sobre la remoción de 100 mg/L de mercurio (II) por la biomasa de *A. niger*. 100 rpm, 28°C.

Finalmente, se evaluó la remoción del metal durante un periodo de incubación de 7 días en aguas contaminadas naturalmente (concentración inicial 183 mg/L), obteniendo una remoción del 69 % al final del experimento (Figura 7). Las muestras fueron obtenidas del Tanque Tenorio, localizado al este de la ciudad de San Luis Potosí, México. Originalmente, era una depresión natural y desde finales de los años setenta del siglo XX, se empezó a utilizar de manera continua para descargas industriales y en menor grado, para aguas residuales domésticas (López Álvarez, 2012). Esas aguas se han utilizado para irrigación de cultivos en zonas aledañas, impactando en gran medida la salud y los acuíferos subterráneos de la zona (COTAS, 2005). Se identificó que esas fuentes de contaminación

contienen metales pesados como: Hg, Ba, Sr, Cd, Pb, Ag, Rb, Co, Cu, Fe and As, y algunos de ellos exceden los límites permisibles para el consumo humano (NOM-127- SSA1-1994).

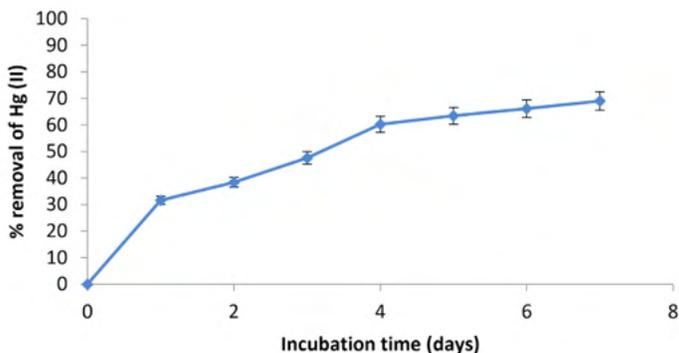


Figura No. 7. Eliminación de mercurio (II) en desechos industriales incubados con 5 g de biomasa. 28°C, 100 rpm, pH 8.2, 100 mL de agua contaminada, (183 mg/L).

DISCUSIÓN

La cepa fúngica creció un 20.3% con 2 g /L de mercurio (II), con respecto al control sin metal. Diferentes microorganismos que son resistentes a este metal han sido aislados de diferentes sitios contaminados, Giovanella y cols., (2017), reportaron que las bacterias: *Pseudomonas putida*, *Pseudomonas* sp., *Alcaligenes faecalis* y *Brevundimonas* sp., que se aislaron de residuos y efluentes contaminados con diferentes metales, crecieron con 10 μ M de mercurio. Mahbub y cols., (2016), aislaron *Sphingobium*, una cepa bacteriana altamente resistente al mercurio de suelo contaminado, con valores estimados de CE50 de 4.5 mg/L y 44.15 mg/L y valores de MIC de 5.1 mg/L y 48.48 mg/L; Koushalshahi y cols., (2012), aislaron la bacteria *Streptomyces* sp., a partir de sedimentos marinos en diferentes regiones del Mar Caspio, que crece a 20 y 40 mg/L de mercurio. Sin embargo, el mecanismo de tolerancia en esta cepa de hongo de *A. niger* no se conoce.

Uno de los problemas ambientales más importantes que se relacionan con la contaminación de agua y suelo en el país, es el vertido directo de metales pesados altamente contaminantes, lo cual constituye un peligro para el equilibrio y el funcionamiento natural de los ecosistemas acuáticos. Uno de estos metales es el mercurio, utilizado en procesos de extracción y purificación de oro artesanal. La bioadsorción, a través del uso de microorganismos y residuos agroindustriales, ha demostrado ser una alternativa para el tratamiento de matrices acuáticas contaminadas por metales, es una tecnología limpia, eficiente y económica para los procesos de remediación ambiental. Los principales factores asociados al proceso de adsorción de mercurio (II) por la biomasa del hongo *A. niger*, establecieron que este biomaterial tiene un alto potencial en la remoción de este metal,

logrando una remoción máxima del 83.2% (100 mg/L y 1 g de biomasa) a las 24 h, pH de 5.5 y 28°C. La evidencia experimental muestra un fuerte efecto de las condiciones experimentales. Los valores máximos de la capacidad de bioadsorción mostraron que este biosorbente, es muy efectivo en la recuperación y/o eliminación de iones de mercurio de sistemas acuáticos.

Finalmente, se observó que, a los 7 días de incubación con la biomasa fúngica, la concentración del metal de las muestras de aguas residuales disminuye un 69%. En la literatura se ha reportado la capacidad del quitosano impregnado con bromuro de etilhexadecildimetilamonio para la eliminación de cadmio y mercurio, preparando dos efluentes sintéticos diferentes que contenían Cd (II) en la primera, y Hg (II) en la segunda (composición similar a la de los efluentes reales) y se determinó la eficiencia de adsorción para estos iones metálicos. Los resultados muestran una eliminación de 86.4% y 73.8% para Cd (II) y Hg (II), respectivamente (Shekhawat y cols., 2017). La utilización de nanopartículas de selenio biogénicas y goetita elimina un 81.2% del mercurio, a partir de agua subterránea contaminada (Wang y cols., 2018). La remoción del 99% del metal de soluciones acuosas, después de 10-48 h posteriores a la exposición inicial a mercurio (II), del agua subterránea de Munich, con una nueva cepa *Mucor hiemalis* EH8 que acumula mercurio (Hoque y Fritscher, 2016). Finalmente, en la Tabla No.1, se muestra la capacidad de remoción de mercurio (II) por diferentes biomásas.

Adsorbente	pH	Capacidad de adsorción mg/g	Referencia
<i>Aspergillus niger</i>	5.2	3.2	Karunasagar, y cols., 2003
<i>Aspergillus versicolor</i>	5.0-6.0	75.6	Das y cols., 2007
Different fungal biomasses	5.5	78.3-95.3	Martínez-Juárez y cols., 2012
Eucaliptus leaves	5.0-6.0	129.87	Alimhammadi y cols., 2017
Impregnated chitosan	3.0	43.3	Shekawat y cols., 2017
<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	6.0	72.46	Bashardoost y cols., 2010
<i>Pleurotus sapidus</i>	6.0	207.89	Yalcinkaya y cols., 2002
<i>Rhizopus oligosporus</i>	6.0	33.33	Ozsoy, 2010
Silica gel modified	3.0-7.0	0.20	Chaves y cols., 2011
<i>Aspergillus niger</i>	5.5	83.2	Este trabajo

Tabla No 1. Comparación de la capacidad de adsorción de Hg (II) con diferentes bioadsorbentes.

Como se observa en la tabla anterior, la cepa utilizada en este trabajo tiene buena eficiencia de remoción, y es de la misma especie utilizada por Karunasagar, y cols., (2003), y es mucho más eficiente en la remoción del metal, lo cual puede deberse a que ellos utilizaron un bioadsorbente preparado a partir de la biomasa del hongo tratada con hidróxido de potasio al 5% y caliente, y el metal utilizado fue inorgánico (HG²⁺) y metil mercurio (HgCl³).

Además, algunos hongos que tienen la capacidad de remover mercurio en solución, también pueden eliminar otros metales como el cromo (VI) y el arsénico (III y V) (Acosta-Rodríguez y cols., 2017; Santos y cols., 2017), y estos resultados confirman la capacidad de esta biomasa para ser utilizada en la biorremediación de metales pesados de nichos contaminados, como la laguna del Tanque Tenorio descrita anteriormente.

Por otro lado, el pH y la temperatura son parámetros críticos en la remoción de metales pesados, en este trabajo se encontró que el pH y la temperatura óptimos para la remoción de mercurio (II) fueron 5.5 y 28°C, con un porcentaje de remoción de 85%, y con respecto a su remoción en presencia de otros metales pesados, éstos sí pueden influir en la remoción del mercurio, aunque no de manera significativa, sobre todo el del pH, pues otros metales pesados se remueven a otros pH's, como la temperatura es parecida a la media ambiental, ésta no influiría de manera significativa en la remoción.

Finalmente, una limitante para su aplicación en lugares contaminados, sería el tiempo de contacto de la biomasa con el metal, porque se requieren 24 horas de contacto para tener una buena eliminación del mismo, y en suelos puede influir el viento, la lluvia y la presencia de basura y animales, y en aguas, la mayoría de éstas son aguas corrientes lo cual impediría un tiempo de contacto prolongado con la biomasa, y por lo tanto la eficiencia de remoción puede disminuir, aunque nosotros pensamos que se puede aumentar la cantidad de biomasa para tratar de optimizar el proceso, o inicialmente trabajar en aguas estancadas.

CONCLUSIONES

1. La remoción de Hg (II) por la biomasa de *A. niger* fue de 83.2%, a pH 5.5, 28°C, 24 h, 100 rpm y 100 mg/L.
2. La biomasa del hongo *A. niger* demostró una excelente capacidad de remoción del metal *in situ*, con un 68% de remoción en aguas industriales contaminadas, a los 7 días de incubación, 5 g de biomasa y con 100 mL de agua, a un pH de 8.2
3. Las condiciones óptimas para la bioadsorción del metal con la biomasa de *A. niger* fueron: T = 28°C y pH de 5.5, 100 rpm, 24 h de incubación, 100 mg/L del metal y 5 g de biomasa, mientras que en el agua contaminada fueron T= 28°C, pH 8.2, 100 rpm, 7 días de incubación, 183 mg/L del metal y 5 g de biomasa.
4. El proyecto es viable para aplicarse en sitios contaminados, ya que se comprobó con agua contaminada naturalmente, obteniendo una buena adsorción del metal, utilizando las condiciones descritas en este trabajo, y de preferencia en aguas estancadas.

REFERENCIAS

- Acosta-Rodríguez, I., Cárdenas-González, J.F., Moctezuma-Zárate, M.G., Rodríguez Pérez, A. y Martínez-Juárez, V.M. 2017. Hexavalent Chromium (VI) Removal by *Aspergillus niger*. In: "Metal-microbe interactions and bioremediation: Principles and Applications for Toxic Metals". Editor: Surajis Das. CRS Press Book. Taylor Francis. Chapter 42, pp. 673-688. ISBN: 9781498762434 (ebook).
- Amanullah, M., Ali, A., Ping, W., Quan, W., Shen Feng, S., Lahori, A.H., Ronghua, L., Awasthi, M.K., Zengqiang, Z. y Öztürk, M. 2016. Soil Amendments for Heavy Metal Immobilization Using Different Crops. Soil Science: Agricultural and Environmental. K.R. Hakeem et al. (eds.). Springer International Publishing Switzerland. pp. 371-399. ISBN 978-3- 319-34451-5 (eBook).
- Ashraf M. y Essa, M. 2012. The effect of a continuous mercury stress on mercury reducing community of some characterized bacterial strains. African Journal of Microbiology Research. Vol. 6, No. 18, pp. 4006-4012.
- Bashardoost, R., Vahabzadeh, F., Shokrollahzadeh, S. y Ali Reza, M. 2010. Sorption Performance of Live and HeatInactivated Loofa-Immobilized *Phanerochaete chrysosporium* in Mercury Removal from Aqueous Solution. Iran Journal of Chemistry and Chemical Engineering. Vol. 29, No. 4, pp. 79-89. Bell, L., DiGangi, J. and Weinberg, J. 2014. Introducción a la contaminación por mercurio y al convenio de Minamata sobre mercurio para las ONG. Red Internacional de Eliminación de los Contaminantes Orgánicos Persistentes (IPEN). Un futuro sin tóxicos. 1ª. Ed. Chaves, M.R.M, Valsaraj, K. T., DeLaune, R.D., Gambrell, R.P. y Buchler, P.M. 2011. Mercury uptake by biogenic silica modified with L-cysteine. Environmental Technology. Vol. 32, No. 14, pp. 1615- 1625.
- Colpas, F., Tarón A. A. y Fon, W. 2016. Adsorción de Mercurio Utilizando Carbones Activados Modificados con Peróxido de Hidrogeno y Calentamiento. Información Tecnológica. Vol. 27, No. 5: 69-76. Comité Técnico del Agua Subterránea (COTAS), 2005. Estudio técnico respecto a las condiciones geohidrológicas y sociales del acuífero 2411 "San Luis Potosí" en el Estado de San Luis Potosí: San Luis Potosí, Comité Técnico de Agua Subterránea del Acuífero del Valle de San Luis Potosí, reporte, 74 p.
- Das, S., Das, A.R. y Guha, A. 2007. A Study on the Adsorption Mechanism of Mercury of *Aspergillus versicolor* Biomass. Environmental Science and Technology. Vol. 41, pp. 8281–8287.
- Giovanella, P., Cabral, L., Pereira Costa, A., de Oliveira Camargo, F.A., Gianello, C. y Menezes Bento, F. 2017. Metal resistance mechanisms in Gram-negative bacteria and their potential to remove Hg in the presence of other metals. Ecotoxicology and Environmental Safety. Vol. 140, pp. 162 – 169.
- Hoque, E. y Fritscher, J. 2016. A new mercury accumulating *Mucor hiemalis* strain EH8 from cold sulfidic spring water biofilms. Microbiology Open. pp. 1-19. Karunasagar, D., Arunachalam, J., Rashmi, K., Naveena Lavanya Latha, J. and Maruthi Mohan, P.2003. World Journal of Microbiology & Biotechnology. Vol. 19, pp. 291–295. Koushalshahi, M.B., Issazadeh, K., Tehranifard, A., Khoshkholgh Pahlaviani, M.R. y Massiha, A. 2012. Isolation of Hg and Cu resistant *Streptomyces* from marine sediments in different regions of the Caspian Sea. African Journal of Microbiology Research. 6(18): 4048-4052.
- López Álvarez, B. 2012. Cambios de uso de suelo y su impacto en el sistema acuífero del valle de San Luis Potosí, aplicando modelación numérica", Tesis Doctoral En Ciencias Ambientales, Instituto Potosino de Ciencia y Tecnología, San Luis Potosí, S.L.P., México.
- López Martínez, R., Méndez Tovar, L.J., Hernández Hernández, F. y Castañón Olivares, R. (2004). Micología Médica. Procedimientos para el Diagnóstico de Laboratorio. Ed. Trillas. México. 2ª. Ed.

Mahbub, K.R., Kannan Krishnan, K., Megharaja, M. y Naidua, R. 2016. Bioremediation potential of a highly mercury resistant bacteria strain *Sphingobium* SA2 isolated from contaminated soil. *Chemosphere* 144: 330–337.

Martínez Juárez, V. M., Cárdenas-González, J.F., Torre-Bouscoulet, M.E. y Acosta Rodríguez, I. 2012. Biosorption of mercury (II) from aqueous solutions onto fungal biomass. *Bioinorganic Chemical and Applications*. Vol. 2012. Article-ID 156190, 5 pages.

NOM-117-SSA1-1994, Bienes y servicios. Método de prueba para la determinación de cadmio, arsénico, plomo, estaño, cobre, Fierro, zinc y mercurio en alimentos, agua potable y agua purificada por espectrometría de absorción atómica. -NOM-127-SSA1-1994, Modificación a la Norma Oficial Mexicana, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. “Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización”.

NORMA Oficial Mexicana NOM-147- SEMARNAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.

NOM-052-SEMARNAT 2005. Establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos. 23 de junio de 2006.

NOM-053-SEMARNAT-1993. Establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.

Ozsoy, H.D. 2010. Biosorptive removal of Hg (II) ions by *Rhizopus oligosporus* produced from corn-processing wastewater. *African Journal of Biotechnology*. Vol. 9, No. 51, pp. 8783-8790.

Purwaningsih, D., Artika, M. y Suharyanto, T.P. 2016. Biosorption Copper (Cu) and Mercury (Hg) by *Omphalina* sp. using Batch, Rotary, Biotray, and Pack Bed Flow Methods. *Current Biochemistry*. Vol. 3, No. 1, pp. 1-12.

Santos, E.E., Cárdenas, J.F., Torre, M.E., Martínez, V.M., Rodríguez, A. y Acosta, I. 2017. Bioadsorción de arsénico (III) en solución acuosa por la biomasa modificada de *Aspergillus niger*. *Avances en Ciencias e Ingeniería*. Vol. 8, No. 2, pp. 1-10. Shekhawata, A., Kahua, S., Saravanab, D. y Ravin Jugadea, R. 2017. Removal of Cd(II) and Hg(II) from effluents by ionic solid impregnated chitosan. *International Journal of Biological Macromolecules*. 104: pp. 1556–1568.

Srivastava, S. y Dwivedi, A. 2015. Biological Wastes the Tool for Biosorption of Arsenic. *Journal of Bioremediation and Biodegradation*. Vol. 7, No. 1, pp. 323- 326. Tejada Tovar, C., Villabona Ortíz, A. y Garcés Jaraba, L. 2015. Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *Tecno Lógicas*, Vol. 18, No. 34, pp. 109-123.

Wang, X., Zhang, D., Qian, H., Liang, Y., Pan, X., & Gadd, G.M. 2018. Interactions between biogenic selenium nanoparticles and goethite colloids and consequence for remediation of elemental mercury contaminated groundwater. *Science of the Total Environment*. 613–614: 672–678.

CALIDAD DEL AGUA EN LA REGIÓN CENTRO DE LA MESETA P'URHÉPECHA

Data de aceite: 01/03/2022

Silvano. Velázquez Roque

Maestro en Ciencias en Ingeniería Física
Tecnológico Nacional de México, Instituto
Tecnológico Superior P'urhépecha, División de
Ingeniería Industrial
Cherán Michoacán. México

Miguel Ángel. Madrigal Cardiel.

Dr. En Ciencias de la Educación, Cherán,
Michoacán, México.
Tecnológico Nacional de México, Instituto
Tecnológico Superior P'urhépecha, División de
Ingeniería Industrial
Cherán Michoacán. México

Ulises. Zurita Luna

Maestro en Ciencias en Ingeniería Química
Tecnológico Nacional de México, Instituto
Tecnológico Superior P'urhépecha, División en
Energías Renovables
Cherán Michoacán. México

Juan. Damián Hernández

Ingeniero Industrial. Tecnológico Nacional
de México, Instituto Tecnológico Superior
P'urhépecha, División de Ingeniería Industrial
Cherán Michoacán. México

ABSTRACT: In the present research work, a study was carried out on the quality of water for human consumption, in the central region of the P'urhépecha plateau of the state of Michoacán, Mexico, monitoring the variables of hardness, TDS, temperature, pH and concentration. of As

and Pb in different sampling sites and in different seasons of the year, which were compared with parameters established by the Official Mexican Standard NOM-127-SSA1-1994, NOM-250-SSA1-2014, Environmental Protection Agency of the United States of America (USEPA) and those established by the World Health Organization (WHO). The results obtained show a pH that is 7 ± 0.5 , the temperature oscillates between 18 and 22 ° C, the hardness between 60 and 200 ppm, unlike a site that shows 600 ppm. SDT between 40 and 220 ppm and a sample site of 400 ppm. On the other hand, the Pb concentration range was found between 0.15 and 0.5 ppm, while As concentrations ranged between 0.01 and 0.1 ppm, depending on the study site.

KEYWORDS: Water quality, hardness, TDS, lead, arsenic.

WATER QUALITY IN THE CENTRAL REGION OF THE MESETA P'URHÉPECHA

RESUMEN: En el presente trabajo de investigación se realizó un estudio sobre la calidad del agua para consumo humano, en la región centro de la meseta P'urhépecha del estado de Michoacán, México, monitoreando las variables de dureza, SDT, temperatura, pH y la concentración de As y Pb en diferentes sitios de muestreo y en diferentes estaciones del año, los cuales fueron comparados con parámetros establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, NOM-250-SSA1-2014, Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (USEPA) y los establecidos

por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Los resultados obtenidos muestran un pH que se encuentra en 7 ± 0.5 , la temperatura oscila entre los 18 y 22 °C, la dureza entre los 60 y 200 ppm a diferencia de un sitio que muestra 600 ppm. SDT entre 40 y 220 ppm y un sitio de muestreo de 400 ppm. Por otra parte, el rango de concentración de Pb se encontró entre 0.15 y 0.5 ppm, mientras que las concentraciones de As oscilan entre 0.01 y 0.1 ppm, dependiendo del sitio de estudio.

PALABRAS CLAVE: Calidad del agua, dureza, SDT, plomo, arsénico.

INTRODUCCIÓN

Hablar de la calidad del agua para el consumo humano hoy en día es un tema de crucial importancia, debido que el vital líquido es un medio donde se llevan a cabo múltiples reacciones bioquímicas. Para el caso de las reacciones metabólicas en el ser humano, ésta permite el transporte de sustancias en forma iónica dentro de las células y entre ellas, lo que permite ser un medio indispensable para la vida humana (Voet, Voet & Pratt, 2008). Para el caso de la agricultura su utilidad y aplicación resulta ser básica y en esta misma vertiente para la industria sus aplicaciones se diversifican en múltiples usos, dependiendo del giro de las mismas. Sin embargo, dada su utilidad de este compuesto vital se ha observado que cada vez se ve una mayor contaminación, debido a la combinación de diferentes especies químicas, por ejemplo: nitratos, cloruros, iones pesados, elementos pesados entre varios otros, por ello es importante monitorear aspectos como la potabilidad, la presencia de materia orgánica dañina, la alcalinidad, cantidad excesiva de sólidos disueltos, dureza, conductividad entre otras variables, (Pérez-López, E., 2016).

La calidad del agua por otro lado, implica parámetros permisibles que no dañen la salud en el cuerpo humano. Particularmente el agua para beber, es mayormente consumida si ésta pasa por un proceso de purificación. Una clasificación del agua para consumo humano es la siguiente: agua potable cruda y agua de mesa, donde la primera es agua clorada y con excedentes de sales, por otro lado, el agua de mesa, ha recibido un proceso de purificación a través de filtros de sedimentos, ósmosis inversa o cualquier otro proceso (Vidales-Olivos, 2000), el principal objetivo de dichos procesos es disminuir la cantidad de sólidos disueltos, dureza y algunos otros parámetros establecidos por normas nacionales NOM-250-SSA1-2014 e internacionales. Sin embargo, existen regiones de la república mexicana donde la población hace uso del vital líquido para beber directamente de manantiales y pozos profundos sin someterla a ningún proceso de purificación ni cloración.

Por otro lado, el agua que proviene de manantiales y pozos profundos puede contener algunos elementos pesados, como Arsénico, Plomo, Mercurio, Cadmio y varios otros elementos en forma de iones y sus diferentes compuestos, esto depende del subsuelo, minerales de contacto e incluso por contaminación de actividades por el ser humano, lo que implica un riesgo para la salud humana (Efsa, 2015; Huang et. al, 2014).

En la región centro de la meseta P'urhépecha, ubicado en el estado de Michoacán,

México-, se encuentran localizados los municipios de Nahuatzen, Cherán y Paracho, donde la población local extrae el agua de manera cotidiana de pozos profundos y manantiales consumiendo sin previa potabilización y/o purificación, por ello se vuelve importante la evaluación de la calidad del agua en fuentes de abastecimiento de los municipios de interés y de estudio de la región centro de la meseta P´urhépecha.

En esta investigación el objetivo principal es evaluar y determinar la calidad del agua en manantiales y pozos profundos ubicados en la región centro de la meseta P´urhépecha a través del análisis fisicoquímico y la determinación de metales pesados. Las variables para este estudio fueron: dureza, cantidad de sólidos disueltos, pH, temperatura, concentración de As (arsénico) y la concentración de Pb (plomo).

MÉTODOS

Para llevar a cabo esta investigación y el cumplimiento de los objetivos se establecieron los siguientes pasos:

a) Toma de muestras de agua de manantiales y pozo profundo.

Se identificaron doce sitios de muestreo; tres en el municipio de Nahuatzen, seis en el municipio de Cherán y tres en el municipio de Paracho, Se tomaron dos muestras por sitio en viales de 50 ml en las diferentes estaciones del año.

b) Análisis fisicoquímico; dureza, cantidad de sólidos disueltos, pH y temperatura.

Por cada muestra tomada en in situ se midió la dureza, sólidos disueltos, pH y temperatura con equipos portátiles (electrodo de dureza, de TSD, pH-chimetro y termómetro laser).

c) Análisis fisicoquímico por emisión atómica por plasma para determinar metales pesados.

Las muestras tomadas fueron analizadas en un espectrómetro de emisión por plasmas modelo 4100 MP-AES marca Agillen.

d) Análisis estadístico de las zonas muestreadas.

Una vez analizadas las muestras en sus diferentes variables por cada estación del año, se promedió el resultado y posteriormente se obtuvieron graficas en donde se aprecia de forma comparativa cada resultado de los manantiales y pozos profundos estudiados.

RESULTADOS

A continuación, se muestra una serie de gráficos en la que se puede apreciar el monitoreo y evolución de la cantidad del agua medida en ppm de las siguientes variables: dureza, cantidad de sólidos disueltos, pH, temperatura, concentración de As y la concentración de Pb. Cabe resaltar que estos resultados dan información relevante de la

calidad del agua de los diferentes sitios que fueron muestreados.

pH

En la figura 1, se puede apreciar el pH promedio del agua de cada uno de los sitios donde fue muestreada in situ. La mayoría de los pozos y manantiales se encuentra a un pH de 7 más, menos 0.5 unidades de diferencia entre algunos sitios. Este resultado se encuentra acorde con la norma permisible mexicana NOM-127-SSA1-1994 y la **NOM-250-SSA1-2014**, el cual establecen que el agua potable debe estar en un rango de pH entre 6.5-8.5. Cabe mencionar que la toma de muestras se realizó en diferentes temporadas del año y la variación que se encontró fue mínima (entre 0.4 y 0.5).

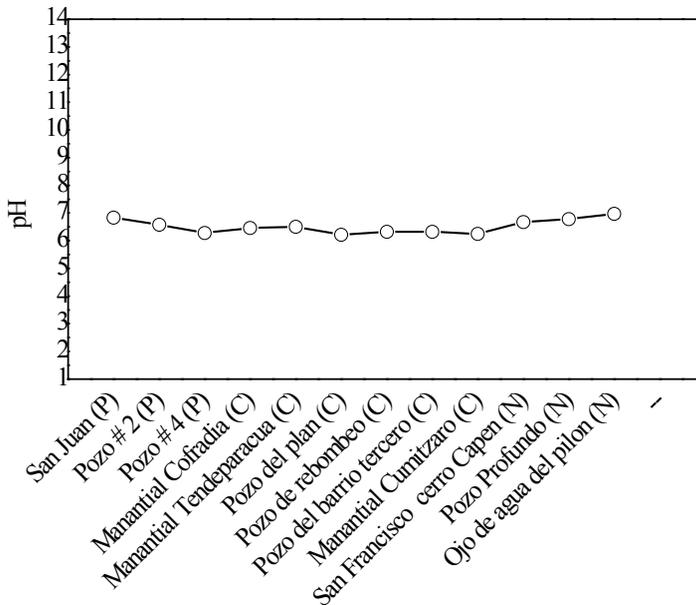


Figura 1. pH promedio del agua de zonas muestreadas.

Temperatura

Se encontró que la temperatura promedio varía según el sitio de muestreo. De acuerdo a la gráfica de la figura 2, los sitios de San Juan (P), Pozo # 2 y Pozo # 4 pertenecientes a la localidad de Paracho diferenciado por la letra (P), el cual, mostraron un rango de temperatura entre los 19 y 22 °C, por otra parte, para los sitios de muestreo de la localidad de Cherán (diferenciado con la letra C): Manantial Cofradía (C), Manantial Tendeparacua (C), Pozo Plan (C), Pozo del Rebombeo (C), y Manantial Cumitzaro (C), la temperatura promedio es muy similar a la localidad de Paracho, es decir; que esta, entre los 18 y 21 °C, a diferencia del Pozo del Barrio Tercero (C) donde el promedio se encontró

entre los 25 °C, este mismo resultado fue similar al que se obtuvo con los sitios de la comunidad de Nahuatzen (diferenciados con la letra N), de los tres puntos de muestreo; San Francisco Cerro Capen (N), Pozo Profundo (N) y Ojo de agua del Plan.

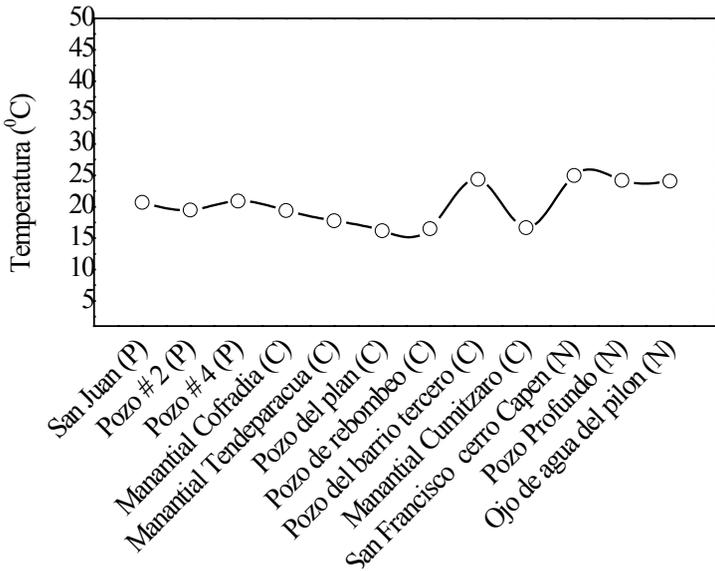


Figura 2. Temperatura promedio del agua de zonas muestreadas.

Dureza

Cuando se habla de dureza se hace mención a la cantidad de carbonato de calcio (CaCO_3) disuelto en el agua en mayor concentración y en menor el carbonato de magnesio (MgCO_3). En este sentido el agua puede tener diferentes connotaciones, agua dura, agua parcialmente dura o blanda.

La Organización Mundial de la Salud (OMS), define la clasificación como agua blanda la que presenta concentraciones inferiores a 60 mg/L de Carbono de Calcio (CaCO_3), entre 61 y 120 mg/L, moderadamente dura, entre 121 y 180 mg/L dura y aquella con valores superiores a 180 mg/L muy duras (Instituto Nacional de Epidemiológica y Microbiológica, 1992).

En este estudio en particular se tomó, en cuenta esta variable, puesto que es un parámetro fisicoquímico de importancia para la calidad del agua de consumo humano (potable). Para lo cual se encontraron los siguientes resultados. En los pozos de la localidad de Cheran la dureza, figura 3, muestra que se encuentran entre 80 y 100 ppm (o mg/L), para algunos sitios, mientras que para otro oscila entre los 100 y 150 ppm (manantial Tendeaparacua), a diferencia del sitio conocido como Manantial Cumitzaro donde la concentración promedio de los carbonatos esta entre los 600 ppm.

Para las zonas de muestreo de Nahuatzen muestran un rango promedio entre los 60 y 100 ppm, La mayoría de los sitios de muestreo muestran que los resultados se encuentran dentro de la norma permisible establecidos por la NOM-250-SSA1-2014, el cual establece que la dureza debe estar a 500 ppm como límite máximo permisible. En contraste al sitio de muestreo del Manantial Cumitzaro del municipio de Cherán, donde arrojo valores por arriba de la norma, 600 ppm aproximadamente, esto indica un foco de atención para los habitantes que hacen uso de tal recurso hídrico. Por otro lado, en el municipio de Paracho en rango de los sitios de muestreados escila entre los 150 y 200 ppm.

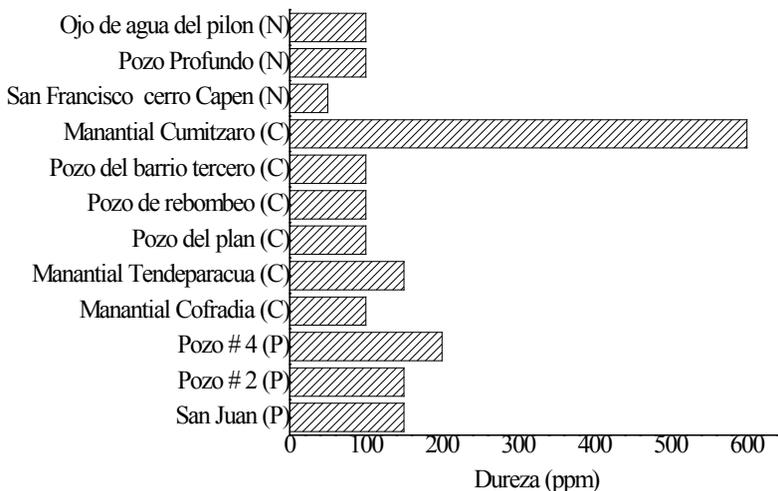


Figura 3. Dureza promedio del agua de zonas muestreadas.

Por otro lado, la aceptación de la dureza varía dependiendo de la aceptación del público, incluso cuando se habla de agua embotellada para beber, esta depende de las especificaciones de calidad al cual están sometidas. Normalmente el rango de sabor del ión calcio esta entre los 100 a 300 ppm y el de magnesio es probablemente menor al de calcio. Según GEMS (1992) si la cantidad de magnesio es superior a 125 ppm en el agua de beber esta puede tener efectos laxantes. En este contexto si el exceso de carbonato de calcio en agua de beber está presente, esta puede generar cálculos renales en el organismo humano (Mora y Chamizo, 2007). Así mismo Melitón y Rosado (2008) concluyen que el consumo de agua con niveles por arriba de 120 ppm de carbonato de calcio son factores importantes en la producción de cálculos renales en las vías urinarias. Por otro lado, investigaciones realizadas mencionan que las aguas blandas y duras han sido relacionadas con problemas cardiacos (OMS, 1983) y cálculos renales (Evans y Taal, 2011; Mora y Alfaro, 1999). En acuerdo con los autores antes mencionados se muestran evidencia de la importancia que la dureza en agua potable es una variable que debe ser monitoreada de manera constante

y más aún si el agua es de meza.

Sólidos Disueltos Totales (SDT)

Los sólidos son partículas de compuestos que se encuentran diluidas en agua natural, se caracterizan por permanecer en estado sólido después de la evaporación del líquido. Básicamente existen de dos tipos sólidos suspendidos totales (SST) y los sólidos disueltos totales (SDT), correspondientes a residuos no filtrables y filtrables, respectivamente.

En la figura 4, se puede apreciar los resultados obtenidos de los sitios de muestreo, donde se muestra la cantidad promedio de SDT, para los sitios de la comunidad de Nahuatzen se observa que están en un rango de entre 60 y 90 ppm, mientras que para los de la comunidad de Cheran el rango se encuentra entre los 50 y 70 ppm a diferencia del sitio Manantial de Cumitzaro donde se muestra una cantidad promedio de 400 ppm. Por otro lado, en la localidad de Paracho, el rango de SDT está entre los 140 y 200 ppm. Cabe mencionar que estos resultados muestran evidencia que se encuentran dentro de la cantidad máxima permisible.

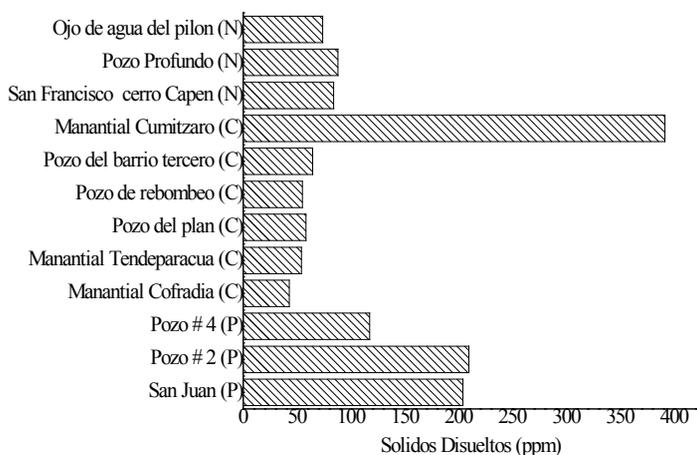


Figura 4. Promedio de sólidos disueltos en agua de las zonas muestreadas.

En contraste, la NOM-127-SSA1-1994 establece una máximo permisible de SDT de 1000 ppm (mg/L), mientras que la agencia de protección ambiental de los Estados Unidos de América (USEPA), sugiere un máximo de 500 ppm en agua potable, esto debido a que si la cantidad de SDT está arriba de lo sugerido, el agua puede presentar apariencia turbia y con sabor distinto, incluso las personas no acostumbradas al agua con alto contenido de SDT pueden experimentar irritación gastrointestinal al beber agua con esta característica (Sigler y Bauder, 2017).

Pb (Plomo)

En la siguiente figura 5, se puede apreciar los resultados obtenidos de la concentración de Pb encontradas en los diferentes manantiales y pozos profundos de las localidades antes mencionadas.

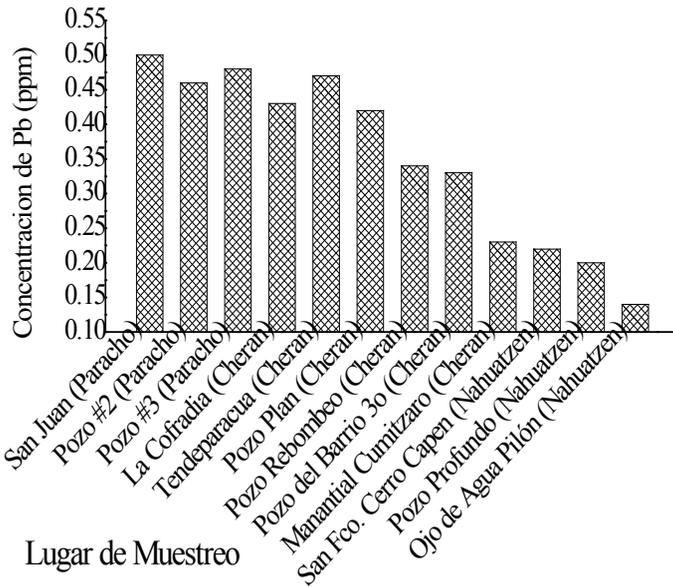


Figura 5. Concentración promedio en ppm (mg/L) de Pb en sitios de muestreo.

Los pozos profundos y manantiales de la localidad de Paracho muestran concentraciones promedio de 0.46 y 0.5 ppm (mg/L), en los de Chéran se encuentran en un rango de 0.25 y 0.48 ppm, para los de la localidad de Nahuatzen entre 0.15 y 0.24 ppm.

La concentración de Pb ingerida en el organismo humano puede ocasionar severos daños a la salud, por esta razón la OMS y múltiples normas internacionales y naciones establecen una cantidad máxima permisible. La norma mexicana NOM-250-SSA1-2014, establece 0.01 mg/L (ppm) como máximo permisible contenida en agua de consumo humano. Si se observan los resultados de la gráfica anterior, estos muestran estar decenas de ppm por arriba de la norma establecida, el cual muestra que debe ser un tema de puntual atención por autoridades y organismos.

As (Arsénico)

El arsénico fue otro de los elementos al que se prestó puntual atención para su estudio y determinación en las manantiales y pozos profundos, en la figura 6, se puede observar la concentración encontrada en cada uno de los sitios muestreados. En los sitios de muestreo de la localidad de Paracho se encontró un rango promedio de 0.018 y

0.02 ppm. Para los de la comunidad e Cherán oscila entre 0.06 y 0.1 ppm y en los de la localidad de Nahuatzen están en 0.1 ppm. Todos los sitios de muestreo revelan resultados por arriba de la norma permisible NOM-127-SSA1-1994, NOM-250-SSA1-2014 y la OMS el cual establecen una cantidad máxima de 0.01 mg/L ó 0.01 ppm. Si bien, no se han reportado resultados sobre el tema del arsénico y plomo en estos sitios y sus alrededores, cabe mencionar que la existencia de dichos metales y otros metaloides de interés pueden explicarse por varios factores presentes. La principal puede ser la presencia geológica, por ser una zona volcánica, por otro lado, investigaciones previas han reportado que el arsénico está presente en la atmosfera debido a fuentes naturales como reacciones ambientales, actividad biológica, emisiones volcánicas e incluso provenientes por un amplio rango de actividades antropogénicas (Campos *et al.*, 2007; Alam *et al.*, 2014) incluyendo la agricultura. Incluso el arsénico puede estar presente en el aire, el agua y el suelo a través de tormentas de polvo y agua de escorrentía, por lo que la contaminación de arsénico está muy extendida debido a su fácil dispersión (Gillispie *et al.*, 2015).

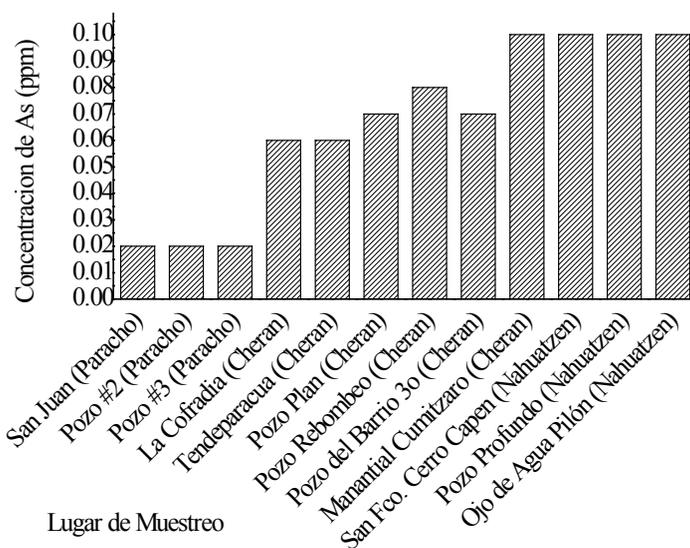


Figura 6. Concentración promedio en ppm (mg/L) de As en sitios de muestreo.

CONCLUSIONES

La calidad del agua para consumo humano es de vital importancia debido a su alta demanda y como medio de reacciones bioquímicas en el metabolismo celular. Por lo anterior se debe tener presente las normas vigentes nacionales e internacionales, para tomar en cuenta los parámetros permisibles en la calidad de agua de mesa que ayuden a mejorar la calidad de vida.

En base a los resultados obtenidos en esta investigación se puede concluir que:

-Se observó que las variables de dureza, SDT, pH y Temperatura se encuentran dentro de la norma establecida, NOM-127-SSA1-1994, NOM-250-SSA1-2014, la OMS e incluso por los establecido por la agencia de protección ambiental de los Estados Unidos de América. A diferencia de un sitio de muestreo en la comunidad de Cheran, el punto denominado manantial de Cumitzaro, la cantidad de dureza esta al rededor los 600 ppm y SDT está sobre los 400 ppm.

-Por el contrario, para el caso del Pb y As, éstas se encuentran por arriba de la norma NOM-127-SSA1-1994, NOM-250-SSA1-2014.

REFERENCIAS

Alam, M. S., Y. Wu, and T. Cheng. 2014. Silicate minerals as a source of arsenic contamination in groundwater. *Water, Air, Soil Pollut.* 225: 2201-2215.

Campos, V., C. Valenzuela, M. Alcorta, G. Escalante, and M. Mondaca. 2007. Isolation of Arsenic resistance bacteria from volcanic rocks of Quebrada Camarones, Parina Region, Chile. *Gayana* 71: 150-155.

European Food Safety Authority (efsa).2015. Recuperado de: <http://www.efsa.europa.eu/en/topics/topic/metals>.

Evans, P. D., & Taal, M. W. (2011). Epidemiology and causes of chronic kidney disease. *Medicine*, 39, 7. doi: 10.1016/j.mpmed.2011.04.007.

Instituto Nacional de Higiene Epidemiológica y Microbiología. (1992). *Agua y Salud*. La Habana, Cuba. Editorial Ciencias Médicas. Pág. 50.

Huang, Z. et al., (2014). *Heavy metals in vegetables and the health risk to population in Zhejiang, China*. *Food Control*, 36(1), pp.248–252. Available at: DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.08.036>.

GEMS.(1992). *Guía Operativa GEMS/Agua*. Canadá. Tercera Edición. Capítulo 3,. Pág. 6-12

Gillispie, E. C., T. D. Sowers, O. W. Duckworth, and M. L. Polizzotto. 2015. Soil pollution due to irrigation with arsenic contaminated groundwater: Current state of science. *Curr. Pollut. Rep.* 1: 1-12.

Melitón, W. & Rosado, F. (2008) "Impacto en la salud por consumo de agua dura en pobladores de la parte baja del río Chili, Arequipa, Perú". (Tesis de investigación). Universidad Nacional del Altiplano. Puno, Perú.

Mora Alvarado Darner y Chamizo García Horacio. (2007). *Estudio exploratorio-ecológico sobre las concentraciones de sales de calcio en el agua para consumo humano y la litiasis renal en Costa Rica*. *Rev. costarric. salud pública* vol.16 n.31 San José Dec. ISSN 1409-1429

Mora Alvarado Darner y Alfaro Herrera Nuria. (1999) Caracterización y distribución por cantones de la dureza del agua en las fuentes utilizadas para consumo humano en Costa Rica. *Rev. costarric. salud pública* vol.8, n.15, pp.01-15. ISSN 1409-1429.

Norma Oficial Mexicana NOM-250-SSA1-2014. (2014). *Proyecto de norma oficial mexicana proy nom-250-ssa1-2014, agua para uso y consumo humano. límites máximos permisibles de la calidad del agua y requisitos sanitarios que deben cumplir los sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados, su control y vigilancia. procedimiento sanitario de muestreo*. DOF. Recuperado de; <http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/5448/SALUD/SALUD.html>

Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. (1994). *Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*. DOF. Recuperado de; https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/110534/NOM_127_SSA1_1994.pdf

OMS. (1983). “*Calidad del Agua, Oligoelementos y Enfermedades Cardiovasculares*. Ginebra, Crónicas de la OMS. No. 27. Pág. 572.

Pérez-López, E. (2016). *Control de calidad en aguas para consumo humano en la región occidental de Costa Rica*. Tecnología en Marcha. Vol. 29, N° 3. Pág 3-14. DOI: <http://dx.doi.org/tm.v29i3.2884>

Sigler, P. W. A., & Bauder, J. (2017). *Alcalinidad, pH, y Sólidos Disueltos Totales*. 1.

Vidales Olivo, Amelia (2000). *Diagnóstico de la Calidad de Agua de Mesa: Una Acción Positiva*. Conciencia Tecnológica, (14),41-46. ISSN: 1405-5597. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94401409>

Voet, D., Voet, J. & Pratt, C. (2008). *Fundamentos de bioquímica, la vida a nivel molecular*. 2 ed. España: Editorial Panamericana.

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN MOLINO COMPACTO PARA POLIETILENO TEREFALATO

Data de aceite: 01/03/2022

Miguel Ángel Madrigal Cardiel

Dr. En Ciencias de la Educación
Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico Superior P'urhépecha,
División de Ingeniería Industrial
Cherán, Michoacán

Silvano Velázquez Roque

Maestro en Ciencias en la Ingeniería Física
Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico Superior P'urhépecha,
División de Ingeniería Industrial
Cherán, Michoacán

Jesús Maldonado Paleo

Maestro en Ingeniería Eléctrica
Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico Superior P'urhépecha,
División de Ingeniería Biomédica
Cherán, Michoacán

Ulises Zurita Luna

Maestro en Ciencias en Ingeniería química
Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico Superior P'urhépecha,
División en Energías Renovables
Cherán Michoacán

Juan Damián Hernández

Ingeniero Industrial.
Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico Superior P'urhépecha,
División de Ingeniería Industrial
Cherán, Michoacán

RESUMEN: En este trabajo, se presenta el diseño de un molino compacto para triturar envases de polietileno tereftalato (PET), con el objetivo de que en una siguiente etapa se pueda implementar de manera física y hacer frente a la problemática que se tiene por la generación y uso excesivo de este tipo de envases, que si bien es cierto ofrece una gran ventaja para el envasado de bebidas, cuando no se les da un buen tratamiento se convierten en residuos que constituyen focos importantes de contaminación. Dentro del Instituto Tecnológico Superior P'urhépecha (ITSP), se observa la presencia de estos residuos en un promedio de 5Kg diarios, a pesar de la implementación de la normativa NOM-ISO14000, por tal motivo se pensó en una solución para dar un tratamiento integral a estos residuos, siendo la primera etapa el diseño del molino, debido a que en la actualidad solo existen molinos o trituradoras de gran escala cuya adquisición es costosa. Por otro lado, en el mercado existen gran variedad de paquetes computacionales para el dibujo de piezas mecánicas, como por ejemplo el Autocad, sin embargo se optó por el uso del software SolidWorks, porque además de que permitió el dibujo de las piezas mecánicas de una manera relativamente sencilla, también brindó la opción de realizar un ensamble entre ellas, así como realización de cálculos de elemento finito, observando de esta manera las condiciones de operación del molino, permitiendo así contar con una validación del diseño, lo cual servirá para su implementación física. Los materiales utilizados en el diseño, son de uso convencional y de fácil adquisición y por su tamaño puede resultar económicamente accesible para su

implementación dentro del ITSP o bien en alguna otra institución educativa pública o privada.

PALABRAS CLAVE: Solidworks, Molino, Pet, Diseño, Simulación.

ABSTRACT: In this work, the design of a compact mill to crush polyethylene terephthalate (PET) containers is presented, with the objective that in a next stage it can be implemented physically and face the problems that exist due to the generation and excessive use of this type of packaging, which, although it is true, offers a great advantage for the packaging of beverages, when they are not properly treated, they become waste that constitutes major sources of contamination. Within of Instituto Tecnológico Superior P'urhépecha (ITSP), the presence of these residues is observed in an average of 5Kg per day, despite the implementation of the NOM-ISO14000 regulation, for this reason a solution was thought to give a treatment integral to these residues, the first stage being the design of the mill, since at present there are only large-scale mills or crushers whose acquisition is expensive. On the other hand, in the market there are a great variety of computer packages for the drawing of mechanical parts, such as Autocad, however, the use of SolidWorks software was chosen, because in addition to allowing the drawing of mechanical parts relatively simple way, it also offered the option of making an assembly between them, as well as carrying out finite element calculations, thus observing the operating conditions of the mill, thus allowing a design validation, which will serve for its implementation physical. The materials used in the design are of conventional use and easy to acquire, and due to their size, they can be economically accessible for implementation within the ITSP or in some other public or private educational institution.

KEYWORDS: SolidWorks, Mill, Pet, Design, Simulation.

INTRODUCCIÓN

La presente investigación se refiere al diseño de un molino compacto para triturar envases de polietileno tereftalato (PET). Entendiendo el diseño en ingeniería como “el proceso de aplicación de varias técnicas y principios científicos, con la finalidad de definir un dispositivo, un proceso o un sistema, con el detalle suficiente que permita su realización”[1]. La simulación en el software SolidWorks permite “someter fácilmente sus diseños a las mismas condiciones a las que se expondrán en el mundo real, permitiendo mejorar la calidad de sus productos, optimizar las geometrías y materiales, y además reducir costos tanto en tiempo como en el ahorro de prototipo para pruebas reales”[2]. El tereftalato de polietileno (PET) es un tipo de plástico muy usado en envases de bebidas y textiles [3]. Estos envases de PET son los que se presentan en la mayoría de las bebidas azucaradas que tienen una gran demanda en el mercado. El problema del plástico PET es que su producción es muy alta, y su reciclaje o reutilización se considera demasiado baja.

En la actualidad sólo existen molinos industriales de gran capacidad y en consecuencia son de gran tamaño y costosos. Se pretende que el molino sea de bajo costo, comparado con los molinos comerciales, además de que los materiales utilizados serán accesibles y fácil de conseguir en el mercado, así como las partes de la máquina tienen una

forma geométrica sencilla y fácil de construir.

El objetivo principal de este trabajo es la simulación del diseño mecánico de un molino de bajo costo para triturar envases o botellas de PET, provenientes del Instituto Tecnológico Superior P'urhépecha (ITSP). Debido a que, en la institución, se genera gran cantidad de botes de plástico que provienen de productos alimenticios (agua, jugos, refrescos, etc.) una vez que se han utilizado, los depositan en los botes de separación para su posterior venta o en su defecto tirarlos hacia a la basura. Al igual que en el instituto existen otras instituciones con el mismo problema anteriormente mencionado, el desperdicio del PET. Para lograr el objetivo se recurren a las siguientes etapas del diseño; caracterización de las propiedades mecánicas del PET; propuestas de diseños; realizar el diseño más óptimo y crear la simulación en el software SolidWorks. Como el proyecto es ambicioso quedaría pendiente la fabricación de la máquina y la evaluación de ésta en otro momento.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología que se empleó para esta investigación fue el proceso de diseño de Robert L. Norton [1]. Este proceso consta de diez pasos que se muestran en la tabla 1. En este trabajo solo se desarrolló hasta el proceso 8. El proceso 9 y 10 se realizará en otra etapa de la investigación, que no está contemplada en el presente trabajo.

Tabla 1	El proceso de diseño
1	Identificación de la necesidad
2	Investigación preliminar
3	Planteamiento de la meta
4	Especificaciones de funcionamiento
5	Síntesis
6	Análisis
7	Selección de la solución
8	Diseño detallado
9	Prototipos y pruebas
10	Producción

Tabla 1. El proceso de diseño [1].

El paso inicial, identificación de la necesidad, normalmente consiste en un planteamiento del problema vago y escueto. Para este caso fue el no aprovechamiento de los envases de PET, provenientes de la institución.

En el paso dos, investigación preliminar, se definió y se entendió por completo el

problema a resolver, así como también se investigó de los molinos actuales en el mercado, y se llegó a la conclusión de que solo existen de gran tamaño y en consecuencia son costosos.

En el paso tres, planteamiento de la meta, se definió que la máquina debía de ser de medidas compactas, que los materiales se pudieran conseguir fácilmente en el mercado y como consecuencia se obtiene un molino cuyas características no se encuentran en los molinos del mercado actual.

En el paso cuatro, especificaciones del funcionamiento, se define lo que el sistema debe hacer. Para esta investigación fue que la máquina entregue como producto final escamas de PET, para su posterior utilización.

En el paso cinco, síntesis, es dónde se encontraron los enfoques de diseño alternativos que fueron posibles. Es donde se generó el mayor número de soluciones creativas. También se denomina el paso de ideación e invención —aquí se generó el mayor número viable de soluciones creativas.

En el paso seis, análisis, se aplicaron técnicas de análisis por medio del elemento finito en el software SolidWorks, principalmente la Teoría de Von Mises-Hencky o de energía de distorsión, que es una magnitud física proporcional a la energía de distorsión. En ingeniería estructural se usa en el contexto de las teorías de fallo como indicador de un buen diseño para materiales dúctiles.

La tensión de Von Mises puede calcularse a partir de las tensiones principales del tensor tensión en un punto de un sólido deformable, mediante la expresión:

$$U = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)] \quad (1)$$

Donde:

U , es la densidad de energía de deformación.

E , es el módulo de Young o elasticidad.

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, son los esfuerzos principales.

ν es la razón de Poisson.

El esfuerzo efectivo de Von Mises σ' se define como el esfuerzo de tensión uniaxial que crearía la misma energía de distorsión que la combinación real de los esfuerzos aplicados [1].

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_1\sigma_3} \quad (2)$$

La ecuación (2) también, se puede escribir como.

$$S_y = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_1\sigma_3} \quad (3)$$

Donde:

S_y , es el esfuerzo de fluencia del material.

Para el esfuerzo bidimensional, $\sigma_2=0$ y la ecuación (3) se reduce a

$$S_y = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_3 + \sigma_3^2} \quad (4)$$

La ecuación bidimensional de la energía de distorsión (4) describe una elipse, la cual, al graficarse sobre los ejes σ_1 , σ_3 , queda como la de la figura 1. El interior de esta elipse define la región segura contra la fluencia bajo carga estática, para los esfuerzos biaxiales combinados [1]. Bajo esta teoría es que se analizaron las cuchillas o cortadores del molino, para no sufrir ruptura.

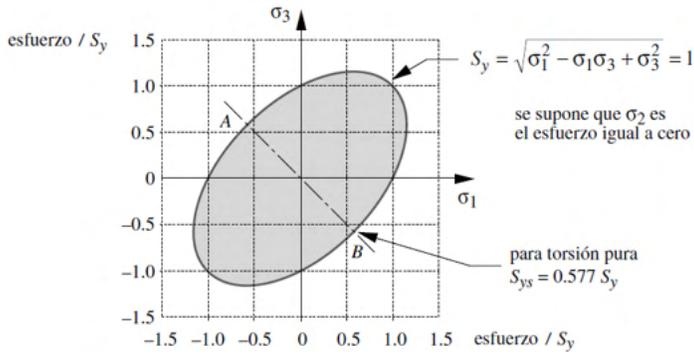


Figura 1. Elipse normalizada de la energía de distorsión bidimensional, para la resistencia a la fluencia del material [1].

En el paso siete, selección de la solución, cuando el análisis técnico indica que se tienen algunos diseños potencialmente factibles, se debe seleccionar el mejor disponible para un diseño detallado, creación de prototipo y pruebas. El proceso de selección casi siempre implica un análisis comparativo de las soluciones de diseño disponibles [4]. Se realizó la comparación de diferentes diseños de cuchillas y se seleccionaron las más óptimas en cuanto a diseño y su resistencia a la falla.

En el paso ocho, diseño detallado. Este paso en general incluye la creación de un conjunto completo de dibujos de ensamble detallados, o archivos de diseño asistido por computadora (CAD), por cada pieza utilizada en el diseño. Cada dibujo detallado debe especificar todas las dimensiones y las especificaciones de material necesarias para fabricar la pieza. Con estos dibujos (o archivos CAD) se necesita construir un modelo (o modelos) de prototipos para experimentos físicos [4]. Aquí se definieron las especificaciones técnicas del molino compacto, por ejemplo, la potencia del motor eléctrico, la transmisión de potencia por medio de poleas, diseño de poleas, tipo de bandas, el diseño de las cuchillas en el interior del molino, el tipo de material de nuestras cuchillas, y el tipo de base para sentar el molino.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Partes de la máquina del molino

A continuación, se muestran las principales partes de la máquina del molino para triturar PET. La figura 2a, representa la vista frontal del juego de cuchillas, estas forman una figura tipo rehilete, el diámetro exterior es de 123 mm. El cuadro en el interior es de lado de 25 mm. El ángulo de la cuchilla forma 45° , debido a que, a ese valor, es cuando tenemos el cortante máximo. El espesor de las cuchillas es de 6.4 mm. Existe un separador entre cada cuchilla que tiene un diámetro de 50 mm y en su interior tiene también un cuadrado, que mide cada lado de 25 mm. En la figura 2b, se muestra la vista superior donde van montadas las cuchillas y los separadores, en total tenemos 32 cuchillas y 33 separadores, como consecuencia tiene una longitud de 363.20 mm. Por último, la figura 2c, representa la vista isométrica del juego de cuchillas principales.

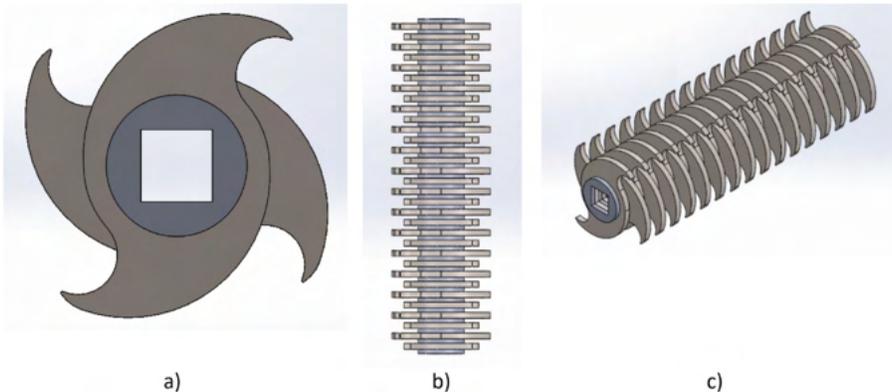


Figura 2. Juego de cuchillas principales.

La figura 3a, representa la vista frontal del juego de cuchillas base, tenemos una longitud de 148 mm y una altura de 50 mm. El espesor de las cuchillas es de 6.4 mm. Existe un separador entre cada cuchilla que tiene un espesor de 6.4 mm. En la figura 3b, se muestra la vista superior donde van montadas las cuchillas base y los separadores, en total tenemos 33 cuchillas y 32 separadores, como consecuencia tiene una longitud de 366.40 mm. Por último, la figura 3c, representa la vista isométrica del juego de cuchillas base.

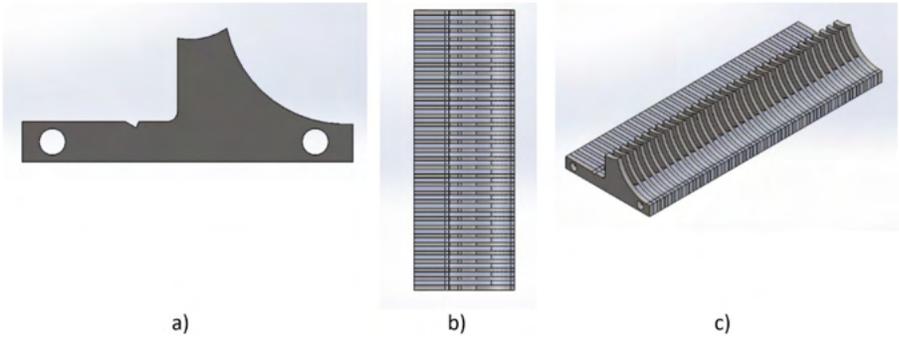


Figura 3. Juego de cuchillas base.

La figura 4a, representa la vista frontal de la caja cortadora, tenemos una dimensión de largo de 196 mm por 132 mm de alto. En la figura 4b, se muestra la vista superior de la caja junto con el eje de transmisión, este tiene una longitud de 789 mm. Por último, tenemos la figura 4c, que nos representa la vista isométrica de la caja cortadora y el eje de transmisión.

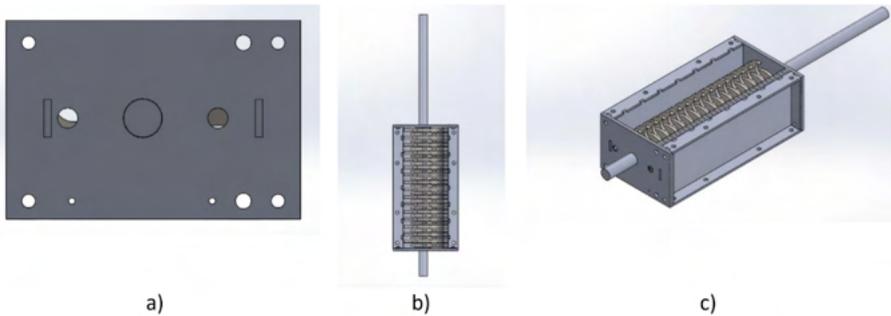


Figura 4. Armado de la caja cortadora.

En la figura 5, tenemos la base o mesa de soporte, dónde está montada la caja cortadora. La figura 5a, nos muestra la vista frontal, con dimensiones de largo 400 mm y de alto 1000 mm. En la figura 5b, se muestra la vista lateral de la mesa de soporte, con dimensiones de 850 mm por 1000 mm. Por último, tenemos la figura 5c, que nos representa la vista isométrica de la mesa de soporte.

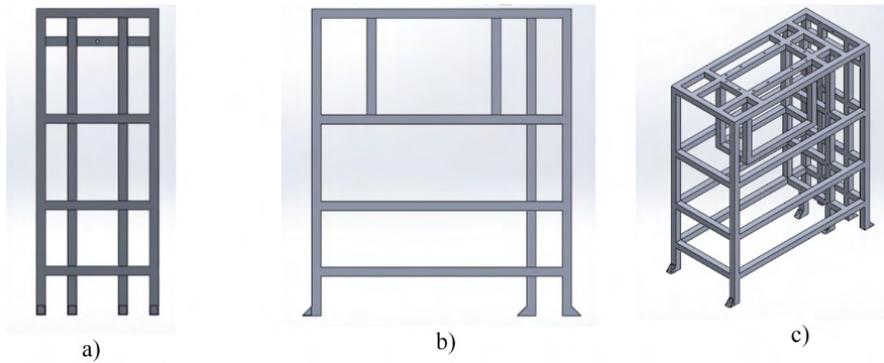


Figura 5. Mesa de soporte.

En la figura 6, tenemos las vistas principales representativas del molino compacto. La figura 6a, representa la vista posterior, donde se puede observar el conjunto de poleas, chumaceras, tolva de seguridad, mesa de soporte y las bandas de transmisión, para el funcionamiento de la máquina. En la figura 6b, se observa la vista superior y por último la figura 6c, muestra la vista isométrica del molino compacto para triturar PET.

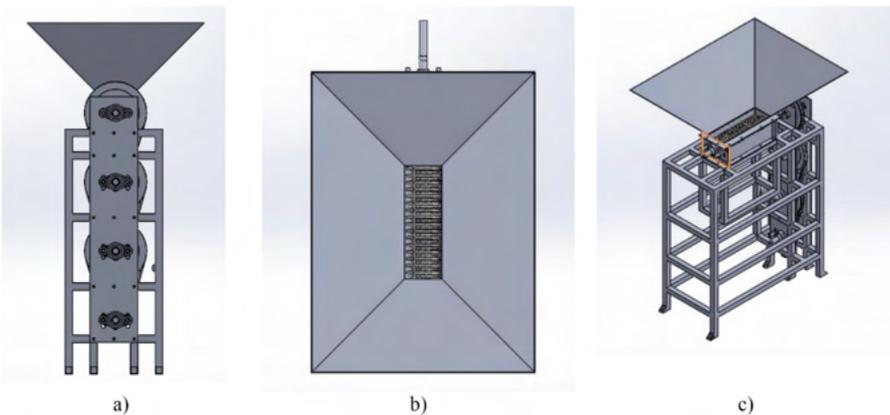


Figura 6. Molino compacto para triturar PET.

Material

El material que se utilizará para construir las cuchillas principales del molino triturador de PET, es el acero inoxidable 316L, debido a que se realizó un estudio de análisis electroquímico de diferentes aceros inoxidables 416, 304 y 316L, siendo éste el que tuvo mejor comportamiento.

A continuación se muestra la comparación del comportamiento anódico de los aceros inoxidables 416, 304 y 316L.

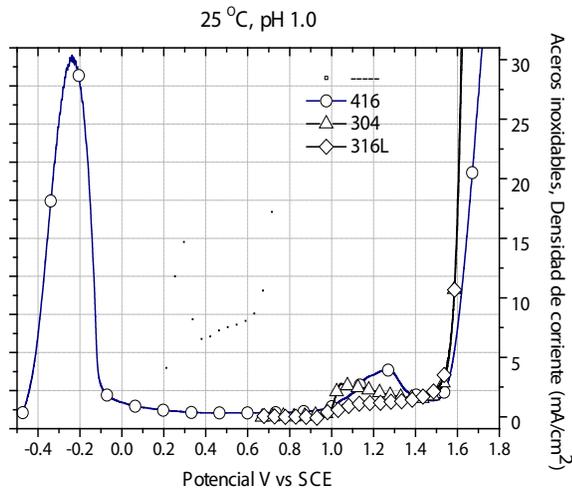


Figura 7. Potencial V vs SCE.

La figura 7, muestra las diferentes curvas del comportamiento anódico de tres aceros inoxidables, 416, 304 y 316L. Donde se observa el potencial aplicado en muestras de diferentes aceros sumergidos en una solución de H₂O-H₂SO₄, pH 1.0, Temperatura ambiente 20°C. También es posible observar la densidad de corriente y las zonas activo-pasivo-transpasivo de las tres curvas.

Generación del Código “G”

Se realizó el código G de la cuchilla principal por medio del software Aspire.

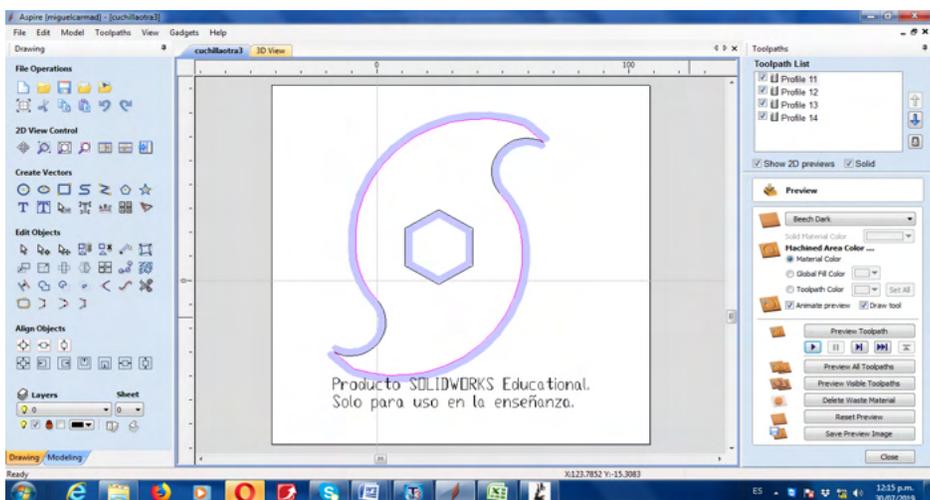


Figura 8. Generación del código G, en el software Aspire.

Este es el código G de la cuchilla principal.

NOG90	N270G0 Z0.2362
N10(End Mill (0.25 inch))	N280G0 X2.3259 Y0.5520
N20M6T1	N290G1 Z-0.0984 F30.0
N30M3 S12000	N300G3 X1.9775 Y1.4617 I0.9642 J0.5520
N40G0 X-0.3975 Y0.5520 Z0.2362	F100.0
N50G1 Z-0.0984 F30.0	N310G0 Z0.2362
N60G3 X-0.0490 Y-0.3578 I0.9642 J0.5520	N320G0 X2.3259 Y0.5520
F100.0	N330G1 Z-0.1969 F30.0
N70G0 Z0.2362	N340G3 X1.9775 Y1.4617 I0.9642 J0.5520
N80G0 X-0.3975 Y0.5520	F100.0
N90G1 Z-0.1969 F30.0	N350G0 Z0.2362
N100G3 X-0.0490 Y-0.3578 I0.9642 J0.5520	N360G0 X2.6514 Y2.3198
F100.0	N370G1 Z-0.0984 F30.0
N110G0 Z0.2362	N380G1 X2.3341 Y2.5972 F100.0
N120G0 X-0.7230 Y-1.2159	N390G0 Z0.2362
N130G1 Z-0.0984 F30.0	N400G0 X2.6514 Y2.3198
N140G1 X-0.4057 Y-1.4933 F100.0	N410G1 Z-0.1969 F30.0
N150G0 Z0.2362	N420G1 X2.3341 Y2.5972 F100.0
N160G0 X-0.7230 Y-1.2159	N430G0 Z0.2362
N170G1 Z-0.1969 F30.0	N440G0 X2.3137 Y2.6091
N180G1 X-0.4057 Y-1.4933 F100.0	N450G1 Z-0.0984 F30.0
N190G0 Z0.2362	N460G3 X-0.3974 Y0.5477 I1.6375 J0.6850
N200G0 X-0.3853 Y-1.5052	F100.0
N210G1 Z-0.0984 F30.0	N470G0 Z0.2362
N220G3 X2.3258 Y0.5562 I0.2910 J0.4189	N480G0 X2.3137 Y2.6091
F100.0	N490G1 Z-0.1969 F30.0
N230G0 Z0.2362	N500G3 X-0.3974 Y0.5477 I1.6375 J0.6850
N240G0 X-0.3853 Y-1.5052	F100.0
N250G1 Z-0.1969 F30.0	N510G0 Z0.2362
N260G3 X2.3258 Y0.5562 I0.2910 J0.4189	N520M30
F100.0	

Tabla 2. Código G de la cuchilla principal.

A continuación, se muestran los análisis que se realizaron por medio del elemento finito, mediante el software SolidWorks. En la figura 9. Se encuentra el análisis de Tensión de Von Mises. Se puede observar que las cuchillas no están en riesgo de fracturarse, debido a que el máximo esfuerzo que tienen es de $1.586E8$ (N/m²) y el límite elástico del material de la cuchilla, que es de acero inoxidable 316L es de $1.7E8$ (N/m²). Se puede decir que se tiene un factor de seguridad de 6.7%, usando las cuchillas en su condición.

Nombre del modelo:cuchillaotra3
Nombre de estudio:Análisis estático 1(-Predeterminado-)
Tipo de resultado:Análisis estático tensión nodal Tensiones1
Escala de deformación: 1

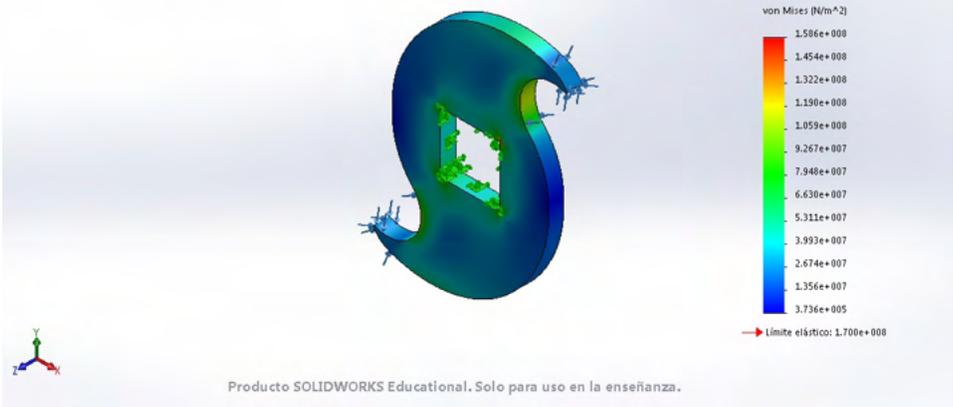


Figura 9. Análisis de Tensión de Von Mises.

En la figura 10. Se muestra el análisis de desplazamientos resultantes, se puede observar que el máximo desplazamiento resultante, se encuentra en la parte del filo de la cuchilla, que es de 0.0391547 mm, pero este desplazamiento no es significativo para nuestro diseño, debido a que no alcanza ni un milímetro, por lo tanto no afectaría con las tolerancias establecidas en el diseño.

Nombre del modelo:cuchillaotra3
Nombre de estudio:Análisis estático 1(-Predeterminado-)
Tipo de resultado:Desplazamiento estático Desplazamientos1
Escala de deformación: 312.438

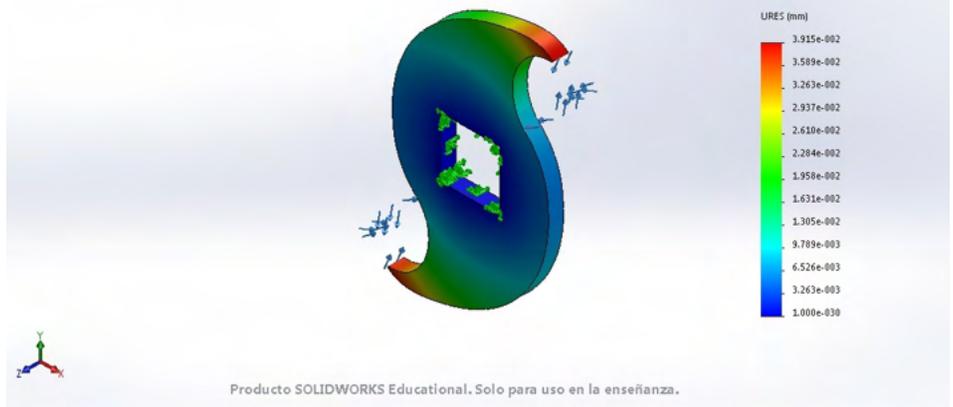


Figura 10. Análisis de desplazamientos resultantes.

CONCLUSIONES

El uso de materiales poliméricos en la sociedad actual a crecido en forma exponencial, debido a la producción y uso. Sin embargo la utilización de polímeros, ha llevado a la sociedad a generar un gran problema de contaminación, particularmente el Polietileno de Teraftalato (PET). Para ello se vio la necesidad de diseñar y modelar un molino compacto con el programa SolidWorks.

Se desarrollaron todos los elementos de máquina del molino a través del programa SolidWorks, desde el inicio hasta el ensamble de cada uno de ellos. Se puede observar que no hay interferencia en cuanto a las partes que componen la máquina, lo que significa que, en la construcción en físico, no debería tener ningún problema en su funcionamiento.

Se obtuvo una gráfica del comportamiento anódico de diferentes aceros inoxidable, para la fabricación de las cuchillas, se determinó que, el acero 316L es el mejor material, debido a su resistencia electroquímica.

Se generó el código “G” para la fabricación de las cuchillas, en el software Aspire. Una vez que se realicen en físico, las cuales se van a realizar en una fresadora de control numérico. Los código se adaptaron para trabajar en una fresadora ExperMill VMC-0600.

Se realizó el análisis del elemento finito de las cuchillas en el software SolidWork, los análisis que se realizaron fueron el de Tensión de Von Mises y de Desplazamientos resultantes, en ninguno de los dos análisis existieron problemas, debido a que no se superó el límite elástico del material y también el desplazamiento resultante fue menos de medio milímetro.

En la actualidad podemos realizar el diseño y la simulación de una máquina, antes de realizarla en físico, esto nos ahorra bastante tiempo y dinero. Se puede asegurar que una vez fabricada, funcionará adecuadamente debido a que ya se realizó la simulación con los modelos o teorías adecuadas.

REFERENCIAS

[1] Norton, R. L. (2011). *Diseño de Máquinas. Un enfoque integrado*. México: Pearson Educación.

[2] Rodríguez Vidal, C. (2015). *Diseño mecánico con SolidWorks 2015*: RA-MA Editorial.

[3] Wikipedia. (2021). *Tereftalato de polietileno*. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Tereftalato_de_polietileno

[4] Norton, R. L. (1999). *Diseño de Máquinas*. México: Pearson Educación.

[5] Cornish Álvarez, M. (1997). *El ABC de los plásticos*. México: Pearson Educación. Universidad Iberoamericana.

[6] Cadena, F., & Quiroz, F. (2000). *Manual de reciclaje de plásticos*. Quito Ecuador: Corporación Oikos.

[7] Hernández, R., & Fernández, C. (2006). *Metodología de la Investigación*. México: McGraw-Hill Interamericana.

[8] Shigley, J.E. (1990). *Diseño en Ingeniería Mecánica*. México: McGraw-Hill.

[9] Mott, R.L. *Diseño de Elementos de Máquinas*. México: Prentice Hall.

[10] Askeland, D.R., & Wright, W.J. (2000). *Ciencia E Ingeniería de Los Materiales*. México: CENGAGE Learning.

[11] Gómez, Sergio. (2020). *El Gran Libro de Solidworks® Simulation*. México: Alfaomega, Marcombo.

[12] Beer, F.P. (2009). *Mecánica de Materiales*. México: McGraw-Hill Educación.

MEDICIÓN DE PROPIEDADES MECANO-ELÁSTICAS (DENSIDAD Y GROSOR) EN PLACAS DELGADAS CON USO DE EFECTO FOTOACÚSTICO

Data de aceite: 01/03/2022

Data de submissão: 02/02/2022

Nestor Antonio Flores Martínez

Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas,
Universidad Autónoma de Nuevo León
Guadalupe, Nuevo León, México

Valentín Guzmán Ramos

Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas,
Universidad Autónoma de Nuevo León
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México

Romeo de Jesús Selvas Aguilar

Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas,
Universidad Autónoma de Nuevo León
Monterrey, Nuevo León, México

José Valentín Guzmán

Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas,
Universidad Autónoma de Nuevo León
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México

Arturo Alberto Castillo Guzmán

Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas,
Universidad Autónoma de Nuevo León
Monterrey, Nuevo León, México

RESUMEN: Se describe de forma breve la interacción entre ondas electromagnéticas, mecánicas y sonido debido a una perturbación de un cuerpo por transmisión de energía. Las funciones para diferentes condiciones del experimento se muestran en gráficas. Solo algunos datos aparecen en las tablas. Se obtuvieron cientos de datos durante el

experimento, debido a los tiempos para cada prueba, con un máximo de un minuto entre cada prueba de 30 segundos, para no agotar la elasticidad de la membrana del micrófono receptor. Con la inclusión de la ley de Hooke para una membrana delgada que vibra sin deformarse, se llegó a una modificación de la ecuación diferencial del modelo de cuerno acústico cuya solución y desarrollo están comentados en algunas secciones. La perspectiva de la utilidad de la fotoacústica unida a su porqué, su cómo y aplicación, se muestran en este trabajo a través de correlacionar la simulación, el experimento y el análisis matemático de un modelo en particular.

PALABRAS CLAVE: Efecto fotoacústico; hoja metálica; densidad; grosor; Ley de Hook; láser rojo.

ABSTRACT: This work shows math analysis of interaction for electromagnetic, mechanics and sound waves due to an energy transmission on a thin plate like body. Graphs correspond to some functions about different experimental conditions. Tables present some of hundreds of measured data. Those values come from multiple experiments of 30 seconds each, with a relaxing time of one minute. More than that use generate a loss of homogeneous elastic behave on microphone. Based on varying-cross sectional area rod differential equation, with known answer, emerges a new differential equation including a Hooke's law type element. According to use of thin metal plate sheet. This paper is a general perspective about photoacoustic effect use on industry, how to improve it and advantages. All through simulation of differential equation,

experimental data and math analysis for our particular model.

KEYWORDS: Photoacoustic effect; metal plate sheet; density; thickness; Hooke Law; red light laser.

1 | INTRODUCCIÓN

Las perturbaciones y ondas se encuentran en los fenómenos de la naturaleza. Se hace necesario conocer la forma en que estas interactúan. La fotoacústica está generando un mayor interés debido a su utilidad para el análisis de propiedades mecano-elásticas, mecánicas y visco-elásticas de materiales y en comunicaciones.

Se tiene como tendencia el uso de láseres de alta potencia ($> 1W$) y láseres concentrados, como se reporta en la literatura. En contraste con esto, se trabajó con un diodo láser de baja potencia (50 mW) para generar el fenómeno fotoacústico. Durante las pruebas se utilizó un sistema dual de micrófonos en donde uno genera una señal de 40 kHz como referencia y el otro, mide el efecto producido en el objeto por interacción del láser. Diodo láser de una longitud de onda de 650 nm. Situado por encima de los micrófonos, al centro y apuntando hacia la placa metálica con un ángulo no mayor a 15 grados.

Se aprovechó la simetría en cuanto al arreglo. Considerando que la luz genera una ligera presión sobre la placa [LANDAU Y LIFSHITZ, 1963, RANDALL, 2005, ELMORE, HEALD, 1985], una compresión que después se interrumpe. Este ciclo de presión-relajación descrito por ley de Hooke genera una onda sónica de baja intensidad que provoca una alteración en la referencia (fase y amplitud).

2 | ANÁLISIS MATEMÁTICO

Usando sistema dual de micrófonos (forma cilíndrica, modelo HC-SR04 [HARDWARELIBRE]) con el rayo sónico con la señal de referencia ultrasónica de 40 kHz. Para el análisis de la respuesta del efecto fotoacústico se utiliza un sistema coordinado cuyo origen está en el centro simétrico del HC-SR04. Ambos micrófonos tienen un diseño con inclinación de 15 grados orientados hacia el eje central. Equidistantes con el punto de origen.

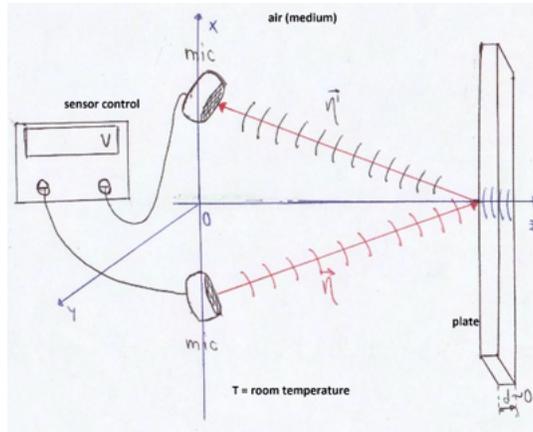


Figura 1. Bosquejo para determinar el diagrama de fuerzas y la dinámica de la onda.

Para la onda viajera de ultrasonido, se considera que las variaciones de densidad son suficientemente pequeñas en el modelo matemático, permanece constante. Se hace el análisis usando de referencia el eje principal. Para las perturbaciones en el medio, hay pequeños corrimientos de fase y cambios de intensidad. El HC-SR04 permanece en funcionamiento durante las pruebas, de manera que se desprecia el decaimiento de la señal acústica en el tiempo.

Las consideraciones pertinentes para el análisis del fenómeno son:

- No hay gradiente de presión en la zona de las pruebas.
- No hay variaciones de temperatura debido al fenómeno [WILEY, RANDALL, 2005, NAVARRO].
- El grosor de placa es despreciable con respecto a su extensión: se considera al cuerpo como una membrana vibrante.
- Se consideran las densidades del cuerpo como del medio, constantes.
- Se trabaja bajo el supuesto de un grosor promedio de la membrana.

Con el diagrama de fuerza se genera una ecuación a partir de la tercera ley de Newton, con la acción de la perturbación del aire, la respuesta de la placa delgada y la resistencia de micro gotas de agua en el medio. Se considera que el aire y vapor de agua funcionan como fuerzas generadoras de la perturbación:

$$F = YS \frac{\partial \eta}{\partial r} + \Delta r S \mu \omega \frac{\partial \eta}{\partial r} \quad (1)$$

Cuyos parámetros son: módulo de Young (Y), sección transversal (S), viscosidad dinámica del líquido (μ , agua para este caso), frecuencia angular de vibración respuesta (ω), la función que describe la perturbación (η).

Condición de equilibrio: Se considera que el aire reacciona a las compresiones por la membrana. Esta fuerza de reacción se relaciona con una pseudo aceleración, y un término que describe el efecto de ley de Hooke:

$$F_r = \rho_0 S r \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} - (-Y' dr \cos \omega t) \quad (2)$$

No se trata de una interacción cuerpo-a-cuerpo per se. En cambio, se analiza el cambio de las fuerzas en la zona de contacto, correspondiente a la sección transversal de la perturbación acústica. En un símil a la tercera Ley de Newton:

$$S \frac{\partial^2 \eta}{\partial r^2} (Y + \Delta r \mu \omega) = \frac{\partial F}{\partial r} = \frac{\partial F_r}{\partial r} = \rho_0 S \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} + Y' d \cos \omega t \quad (3)$$

Dicha ecuación corresponde a los cambios tangenciales de la perturbación. Con algebra, despeje y renombrando constantes, se llega a la ecuación diferencial:

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial r^2} = \frac{1}{(1 + \alpha)c^2} \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} + \frac{\beta D}{(1 + \alpha)} \cos \omega t \quad (4)$$

Donde las constantes y parámetros de utilidad son:

- $c = \sqrt{Y/\rho_0}$ velocidad de la perturbación, descrita por el módulo de Young y densidad del aire a 20 °C
- $\alpha = \omega/a$ factor de atenuación de la viscosidad
- $\alpha = Y/\mu$
- $\beta = Y'/Y$ constante sin unidades, establece el límite útil del modelo
- $D = d/S$

Se propone una solución a través del método de separación de variables:

$$\eta(r, t) = f(r)T(t) = f(r) \cos \omega t \quad (5)$$

Y con su sustitución en la ecuación diferencial se tiene:

$$\frac{d^2 f}{dr^2} + \frac{\omega^2}{(1 + \alpha)c^2} f = \frac{d^2 f}{dr^2} + k_1^2 f = \frac{\beta D}{(1 + \alpha)} \quad (6)$$

Considerando el término $\beta = (Y'/Y)$, como un límite a dicha teoría establecida en el trabajo solo se puede tener una variación de unos cuantos ordenes de magnitud, entre un módulo de Young y el otro. Si $Y' \gg Y$, β tiende a infinito, por consiguiente, también la función, algo físicamente imposible. Si $Y' \ll Y$, β tiende a cero, entonces el pulso acústico solo podría existir si la amplitud inicial es muy grande, es decir, para una fuente láser de alta potencia.

Un análisis de unidades del término de ley de Hooke, $F_H = -Y' dr$, muestra que $Y' d$ tiene unidades de constante de resorte. La expresión de amortiguamiento, $(1 + \alpha)$ [MILNE-

THOMSON, 2011, MORFEY, SOROKIN, GABARD, 2012], no se puede despreciar incluso si el nivel de humedad relativa es pequeño. Se busca demostrar que el análisis matemático es válido para condiciones con un nivel de humedad diverso.

La ecuación diferencial homogénea de una onda en una barra de densidad constante y sección transversal variable [ELMORE, HEALRD, 1985], muestra una similitud con la establecida previamente:

$$\frac{d^2 f}{dr^2} + k_1^2 f = \frac{d^2 f}{dr^2} + \frac{k^2}{(1 + \alpha)} f = 0 \quad (7)$$

El análisis físico requiere la solución senoidal. Para el caso de la ecuación diferencial no homogénea, se recurre a la integral de Green [BUTKOV, 1973]:

$$f(r) = \int_{r_0}^r G(r'; \xi) f'(\xi) d\xi = \int_{r_0}^r \sin k_1(\xi - r) d\xi = - \int_0^r \sin k_1(r - \xi) d\xi \quad (8)$$

Cuya solución (para el caso en que $r_0=0$) no tiene componente complejo:

$$f(r) = \frac{-A\beta D}{k} (1 - \cos k_1 r) \quad (9)$$

$$A = - \frac{\sqrt{1 + \alpha}}{k} \quad (10)$$

Se requiere una corrección para coincidir con los datos experimentales. Por condiciones del sistema de toma de datos, la amplitud inicial se considera constante, con $A_0=5V$. Se tiene que la función solución consta de dos partes, una para el caso en que no hay oscilación armónica en la membrana, como se muestra:

$$\eta(r, t) = A_0(1 - \cos k_1 r) \cos \omega t \quad (11)$$

Un cuerpo sólido perfecto, se conoce como cuerpo rígido. Esta placa, a diferencia, reacciona con una vibración en la zona cercana al impacto de la señal de referencia. Una vez que el HC-SR04 manda otro pulso, se tiene un tiempo breve para que la membrana se relaje antes de volverse a compactar. Estas vibraciones armónicas dependen de las características del medio y la placa.

La resonancia se presenta en algunos materiales cuando su extensión es debidamente larga o cuando su grosor es suficientemente pequeño. En este modelo es necesario considerar dicha resonancia. Se hicieron pruebas con placas metálicas delgadas (orden de mm). Considerando dicha resonancia cual un repetidor de frecuencia angular como parte del vector de desplazamiento. Los valores posibles para este factor son enteros positivos. La resonancia se puede detectar como resultado del camino de regreso, o parte del recorrido completo.

Supóngase que el factor de resonancia es:

$$\left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^2 k}{\sqrt{1 + \alpha}}\right) = \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^2 \omega}{c\sqrt{1 + \alpha}}\right) \quad (12)$$

Con lo que se obtiene una función más precisa:

$$\eta = A_0 \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^2 k}{\sqrt{1 + \alpha}}\right) (1 - \cos k_1 r) \cos \omega t \quad (14)$$

Este factor de la resonancia (o repetidor de la amplitud) no desaparece si se sustituye la nueva función solución en la ecuación diferencial no homogénea. Donde dicho factor, predice una variabilidad de la amplitud medida.

Una vez establecida la solución, es necesario establecer la relación con las propiedades a medir. Si el cuerpo en estudio fuese un cuerpo rígido súper masivo, la señal de referencia haría el recorrido sin tener un cambio en amplitud. La placa en cuestión es un cuerpo que reacciona a la señal incidente generando una pequeña vibración en la zona, donde esta cambia la uniformidad de dicha señal recibida. Cambia la amplitud (aumentando o disminuyendo) de acuerdo a la vibración de la membrana.

Se puede aproximar que la distancia recorrida por la señal es equivalente a la separación del HC-SR04 con la placa y el grosor de la placa. Esta variación se da en términos de la señal original, A_0 y la medida, A_2 ;

$$d = \frac{c\sqrt{1 + \alpha}}{2\omega} \cos^{-1} \left(\frac{A_0 - A_2}{A_0}\right) \quad (15)$$

En el tiempo cero, el sistema permanece en equilibrio. Una vez que se enciende el HC-SR04, se genera una señal ante la cual, la membrana intenta oponerse en los intervalos de tiempo que no hay señal enviada (1 s entre pulsos). Se puede ver como dos resortes interactuando entre ellos (el medio y la placa delgada);

$$\eta_{r=d} \frac{YS\Delta r}{d} \cos \omega t = F_{aire} = F_{cuerpo} = (Y'd)d \cos \omega t \quad (16)$$

Si consideramos que $\Delta r \approx 1$ *unidad*, gracias a que la señal permanece casi constante, se reescribe la ecuación (16) de forma que se pueda despejar el módulo de Young correspondiente a la placa delgada;

$$Y' = \frac{\eta_{r=d} Y S}{d^3} \quad (17)$$

Para poder medir la densidad de la placa, se recurre primero a su expresión simplificada:

$$\rho = \frac{m}{v} = \frac{m}{dS} \quad (18)$$

Desde el comienzo del desarrollo se estableció la interacción de dinámica de fuerzas

con apoyo de las leyes de Newton. El término correspondiente a la aceleración viene de la idea que se trata de una barra que vibra (cilindro de aire) [7, 8]. Relacionando este concepto con la ecuación (18) se puede medir la densidad del cuerpo:

$$\rho = \frac{m}{dS} = \frac{F/a}{dS} = \frac{(Y'd) r \cos \omega t}{\left(d \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2}\right) dS} \quad (19)$$

Donde $\psi = A_0 \cos k_1 r \cos \omega t$, la densidad se despeja como:

$$\rho = -\frac{Y'}{S\omega^2 A_0 \cos k_1 r} \quad (20)$$

Si la señal medida por el HC-SR04 después del recorrido, tiene una relación con la frecuencia natural, se puede decir que el corrimiento de fase está relacionado con esta señal. Se puede conocer la frecuencia de resonancia natural, en el caso que se conozcan las características del cuerpo:

$$f(d) = A_0 \left(1 - \cos \frac{2(\omega - \phi)d}{c\sqrt{1 + \alpha}}\right) = A_2 \quad (21)$$

$$\phi = \omega - \frac{c\sqrt{1 + \alpha}}{2d} \cos^{-1} \left(\frac{A_0 - A_2}{A_0}\right) \quad (22)$$

3 I ENFOQUE NUMÉRICO

Se usó el método de resolución de ecuaciones numérica de Runge-Kutta de cuarto orden, para la ecuación diferencial radial, suponiendo una función temporal del tipo trigonométrica como se expuso anteriormente. La finalidad de conocer la solución radial pura es poder determinar cuan rápido decae la onda generada para las mediciones experimentales.

Para el código en MatLab (Licencia 40673431), se establece como aclaración lo siguiente:

- $k_1 = \frac{\omega}{c\sqrt{1+\alpha}}$ vector de desplazamiento, relacionado con la densidad.

Para el primero conjunto de simulaciones, se busca conocer que tan pronunciado es el cambio de amplitud de la onda generada en la placa, de acuerdo a la ecuación (6). Las condiciones pertinentes para la simulación y los parámetros fijos se mencionan a continuación:

- Rango de radio: 0 a 5
- M. de Young del aire [WIKIPEDIA]: 0.2 MPa
- M. de Young del acero [WIKIPEDIA]: 210 000 MPa
- Velocidad de sonido en el medio: 343 m/s (a 20 °C)
- Velocidad de onda inicial: 0 m/s

- Grosor de placa: 0.0001, 1.5
- Factor de reducción (alfa): 0.0001, 1, 15
- Frecuencia de pulso: 40 000 Hz

Las soluciones para la ecuación diferencial no homogénea son exponenciales, trigonométricas y/o superposiciones de estas. Pueden ser obtenidas por diferentes métodos de resolución analítica o numérica. También, dependiendo de condiciones frontera o de inicio.

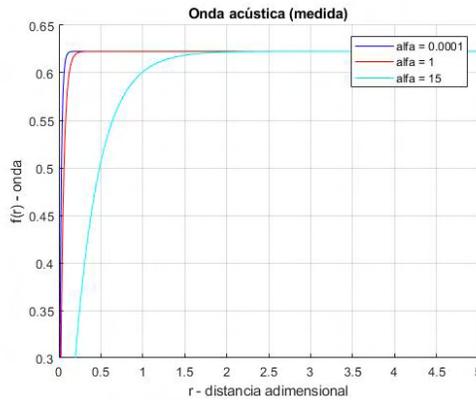


Figura 2. Función radial esperada para un grosor de 0.0001

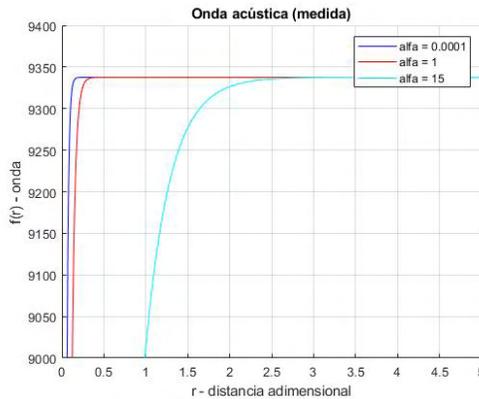


Figura 3. Función radial esperada para un grosor de 1.5

En las simulaciones realizadas, se obtuvieron funciones de tipo exponencial. Lo pronunciado en las gráficas cambia de acuerdo a los parámetros de grosor y el valor de alfa (relacionado con el amortiguamiento debido de la humedad relativa).

La señal recibida en el segundo micrófono, es una nueva función de tiempo, con un

posible corrimiento de fase. La siguiente gráfica muestra el comportamiento de la señal en términos del tiempo y posibles fases, para valores de simulación: alfa = 1, grosor = 0.0001.

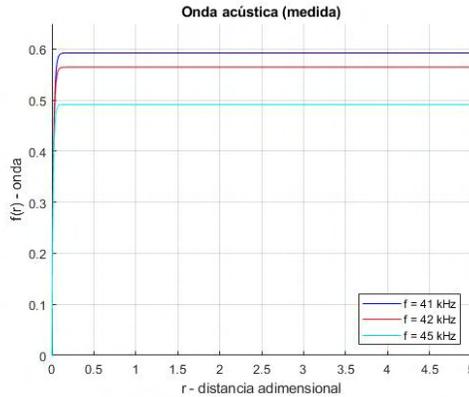


Fig. 5. Perturbación con su amplitud máxima para diferentes frecuencias de respuesta.

La gráfica obtenida muestra una función que parece incrementar hasta el infinito, esto se debe a que la ecuación diferencial como la solución, son válidos para la zona del fenómeno fotoacústico y no se tienen condiciones de amortiguamiento debidas a la pérdida de homogeneidad de acuerdo al aumento de temperatura o de la fricción que el gradiente de temperatura usada y las condiciones del medio. En condiciones controladas, el modelo es una buena aproximación para sistema de control de calidad en una empresa para un medidor ubicado cerca de la línea de producción.

4 | RESULTADOS Y TRATAMIENTO DE DATOS

Sin un circuito con filtrado de ruido apropiado, el sonido de fondo está presente en la señal medida. Para cada intervalo de tiempo, la amplitud registrada tiene un ruido debido al diseño del circuito y ruido dispersivo debido a que la señal ultrasónica se debilita a causa de la potencia. Aun si se considera que el gradiente de temperatura no forma parte del fenómeno simplificado estudiado.

Para hacer una clasificación apropiada de los datos medidos, se debe tener primero un registro del ruido electrónico como el ruido de fondo del medio gaseoso. Sin la presencia de la fuente láser. Cuidando que cada registro de ruido como las mediciones experimentales, tuvieran la misma temperatura ambiente (295.15 K) y presión atmosférica (alrededor de 101 355 Pa).

En el caso del registro de ruido como el registro de datos experimentales se calcularon los promedios temporales. A considerar en el fenómeno estudiado tres tipos de perturbaciones: el ultrasonido incidente en el cuerpo, la resonancia del cuerpo y el efecto

de ley de Hooke debido al láser. Posteriormente, con dichos registros se calculan los datos de los parámetros medidos.

De la ecuación (12) se obtienen las relaciones entre las amplitudes medidas como las de referencia, para el análisis de los datos. Dentro de las pruebas realizadas, se trabajó brevemente con cartón delgado debido a su importancia en la industria papelera y su aplicación para una empresa mexicana. Sin embargo, este último material es desconocido en sus componentes básicos.

En la tabla siguiente, aparece el término “factor de corrección”, que es el coeficiente numérico requerido para los valores de amplitud en que se satura el sistema del micrófono. Del factor de repetición en la ecuación (15) se puede hacer un despeje de la señal alterada con respecto a la superposición de ondas de la señal base con el ruido de fondo y el ruido del HC-SR04. Ahora, en la siguiente tabla se muestra el “% de interacción”, o bien, el nivel de resonancia (12) encontrado para una señal medida y para ciertas placas. Y posteriormente se muestran los datos obtenidos experimentalmente con su error relativo, calculado como sigue:

$$error = \frac{|v_{teórico} - v_{experimental}|}{v_{teórico}} \times 100\% \quad (23)$$

Grosor real (mm)	Material	Amplitud medida (A_2)	Factor de corrección	Amplitud sin resonancia	Densidad teórica (kg/m ³)	Módulo de Young reportado (MPa)
1.900	Acero	16.3	6.590449	9.709551	7 850 [WIKIPEDIA]	210 000 [BUTKOV]
1.800	Cartón	13.1	9.519534	3.580466	Desconocido	Desconocido
0.650	Acero	2.06896552	Ninguno	2.06896552	7 850	210 000
0.610	Acero	2.69230769	0.732272	1.96003569	7 850	210 000
0.406	Acero	10.222222	10.98408157	0.76185957	7 850	210 000
0.305	Acero	6.78571429	7.322721	0.53700671	7 850	210 000

Tabla 1. Valores de referencia para las comparaciones y cálculo de error.

Frecuencia angular	251 327.4123 Hz	Velocidad del sonido	343 m/s
viscosidad, μ	1002 $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ (agua)		
n, m	Factor (vector de desplazamiento)	Factor (frecuencia para la resonancia de la onda)	% interacción
1	0.732272	502 654.8246	(aprox.) 0
2	2.929088	753 982.2369	50
3	6.590449	1 005 309.649	66.66667
4	11.71635	1 256 637.061	75
5	18.30680	1 507 964.474	80
6	26.36180	1 759 291.886	83.33333

7	35.88133	2 010 619.298	85.71429
8	46.86541	2 261 946.711	87.5
9	59.31404	2 513 274.123	88.88889
.....

Tabla 2. Algunos de los factores de resonancia que surgieron en los datos experimentales.

Se muestra una breve descripción de cada factor involucrado en el análisis:

- Dejando de lado la composición atómica y estructura cristalina de los cuerpos, en este caso, de acuerdo a las dimensiones, se considera a la placa delgada un cuerpo unitario. Esta percibe la perturbación como una onda que viaja por dentro de ida y vuelta. Válido solo para ciertos rangos de tiempo de respuesta y de interacción, propios para cada material. Con esto, se obtiene el factor de vector de desplazamiento mencionado, como la cantidad de veces que la onda “rebota” dentro de la placa:

$$n^2 k_1 = \frac{n^2 k}{\sqrt{1+\alpha}} = \frac{n^2 \omega}{c\sqrt{1+\alpha}} \quad (24)$$

- En otros casos, si consideramos la estructura molecular y/o atómica, de forma que se puede tener una resonancia en la membrana. Cada partícula tiene su valor propio de vibración, y en la interacción de los átomos conformando el objeto se tiene una frecuencia de resonancia propia para el material. Sin conocer los valores de resonancia del material, se puede suponer que la señal del HC-SR04 tiene un tiempo efectivo en la placa, para que se sume la señal original y se puede conocer este factor a través de: $n\omega=(1+l)\omega=\omega+l\omega$.

Grosor real (mm)	A_2 (sin resonancia)	Grosor medido	% error	Módulo de Young ($\sim 10^{11}$ N/m ²)	% error	densidad, ρ	% error
1.900	9.709551	1.911222209	0.5906	0.4281949543	FR	1559.314219	FR
1.800	3.580466	1.752098776	2.6612	0.2049461403	Desconocido	746.3316148	Desconocido
0.650	2.06896552	0.644455345	0.8530	2.379856174	13.3265	8666.481344	10.4010
0.610	1.96003569	0.625921228	2.6100	2.254558132	7.35991	8210.196147	4.5885
0.406	0.76185957	0.381891827	5.7057	4.211431912	FR	15336.34532	FR
0.305	0.53700671	0.319361995	4.7088	5.075817082	FR	18484.0893	FR

Tabla 3. Medición de los parámetros y cálculo del error relativo. RF = Fuera de Rango

Grosor real (mm)	Amplitud (medida)	Factor de resonancia	Frecuencia de resonancia medida	Factor de repetición interna
0.406	10.222222	6.590449	- 298 552.8171	1.175587832
0.305	6.78571429	2.929088	- 502 667.3546	2.000049855
0.203	2.894736842	Ninguno	- 709 162.0716	2.821666229
0.152	20.27586207	18.306800	- 786 830.7529	3.130700059
0.102	3.344262295	0.732272	- 1 553 707.389	6.182005277

Tabla 4. Análisis de datos para factores de repetición relacionados a valores de vibración.

Con estos datos se puede concluir la solución para el análisis de propiedades:

$$\eta(r, t) = \begin{cases} A_0(1 - \cos k_1 r) \cos \omega t; & \text{sin resonancia} \\ A_0 \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^2 k}{\sqrt{1 + \alpha}} \right) \left(1 - \cos \frac{m\omega}{c\sqrt{1 + \alpha}} \right) \cos \omega t; & \text{resonancia} \end{cases} \quad (25)$$

5 | TRABAJOS FUTUROS

El efecto de la ley de Hooke genera una perturbación que viaja por el cuerpo en todas las direcciones, dinámica que fue omitida en el análisis. Dichas consideraciones se deben incluir para trabajos futuros, junto como la posible deformación del cuerpo o compresiones que requieran un tiempo grande para recuperar su forma. A futuro se planea usar el tensor de estrés y deformaciones en alguna forma simplificada que involucre cuerpos isotrópicos, pero con medios anisótropos. Los elementos matemáticos que no se han considerado sobre deformaciones que evolucionan con el tiempo o variaciones en sistemas casi reales de la densidad, son parte del siguiente escalón.

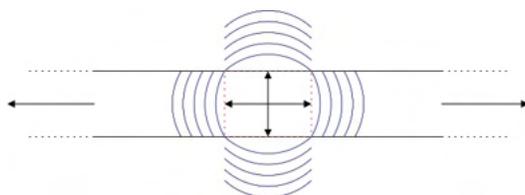


Figura 5. Corte transversal de la estructura de la placa metálica. Representación básica del efecto de la ley de Hooke propagándose en las direcciones posibles.

¿En qué nivel se induce la resonancia en el efecto fotoacústico? Con la luz interactuando con el metal, ¿toma importancia el efecto de *skin depth*? ¿Qué ocurre cuando hay una polarización del medio? Todas estas son cuestiones que se deben responder en trabajos futuros. Incluyendo el uso de un modelo matemático más completo que pueda prever ciertas condiciones como la falta de simetría, la resonancia o materiales que no son tan rígidos.

6 | DISCUSIÓN

La física permite conocer ciertas condiciones del efecto fotoacústico que no aparecen en estas simulaciones. La experiencia muestra que una señal acústica eternamente creciente no existe. Conforme una onda acústica evoluciona en el tiempo, se genera un gradiente de la densidad y un cambio de la temperatura, disminuyendo la primera, dificultando la posibilidad de propagación de un sonido (incluso ultrasonido o infrasonido).

No hay forma de estudiar el efecto fotoacústico en su totalidad con unas cuantas simulaciones sobre una ecuación diferencial homogénea. Por su complejidad requiere simulaciones y estudios de los efectos internos, el gradiente de temperatura de la placa, adherencia de la humedad, la importancia de los eigenvalores y las posibles deformaciones.

Otros de las consideraciones necesarias, es el estudio de los tipos de ruido que están involucrados y como se puede analizar estos. Incluso ver si los tipos de ruido pueden ser eliminados sin perder información. Incluso considerar el ruido de Johnson como parte del fenómeno y no solo hacer pruebas con variaciones pequeñas de temperatura.

La evolución de la función en el tiempo y la distancia, nos da información sobre el sistema como algo libre de restricciones. Es de gran importancia conocer el valor de distancia límite del cambio significativo de la presión, alterando la densidad, la viscosidad o ambas. Con eso se puede tener un análisis no limitado a casos adiabático e isotérmico.

Se demostró que los factores de resonancia y de repetición son importantes en la caracterización de metales por efecto fotoacústico. Datos experimentales muestran un error relativo considerablemente pequeño. Para conocer los valores precisos de n , m se requiere establecer un nuevo modelo matemático o un conjunto de experimentos en que se conozcan las propiedades de las placas. Para placas muy delgadas, el factor de resonancia es mayor.

REFERENCIAS

Wiley editorial. **Appendix C. Physical properties of water.** Disponible en: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781118131473.app3/pdf>

BUTKOV, E. **Mathematical Physics.** New York: Addison-Wesley Publishing Company, St. John's University, 1973, 154-156, 291-294, 503-543 p.

ELMORE, W. C., Heald, M. A. **Physics of Waves.** 1era ed. New York: Dover Publications, 1985, 94-96, 104-106, 139-142, 152 p.

HardwareLibre. **HC-SR04.** Disponible en: <https://www.hwlibre.com/hc-sr04/>

LANDAU, L. D., Lifshitz, E. M. **Electrodynamics of Continuous Media.** New York: Pergamon Press, 1963, 69-72 p.

MILNE-THOMSON, M. **Theoretical Hydrodynamics**. 5a ed. New York: Dover Publications, 2011, 72-76 p.

MORFET, C. L., Sorokin, S. V., Gabard, G. The effects of viscosity on sound radiation near solid surfaces. **Journal of Fluid Mechanics**, año 2012, n. 690, p. 441-460. <https://doi.org/10.1017/jfm.2011.449>

NAVARRO. **Tema 6. Elasticidad**. Universidad de Almeria. Disponible en: <http://www.ual.es/personal/mnavarro/Tema%206%20%20Elasticidad.pdf>

RANDALL, R. H. **An Introduction to Acoustics**. New York: Dover Publications, 2005.

The Engineering Toolbox. **Metals and Alloys – Densities**. Disponible en: http://www.engineeringtoolbox.com/metal-alloys-densities-d_50.html

Wikipedia. **Constante elástica, Anexo: Constantes elástoplásticas de diferentes materiales**. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Constante_elástoplásticas_de_diferentes_materiales

MODELACIÓN DE PATRONES DE VEGETACIÓN CON ECUACIONES NO LINEALES UTILIZANDO LOS MODELOS HARDENBERG Y LEFEVER

Data de aceite: 01/03/2022

Data de submissão: 06/02/2022

Rebeca Franco

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla,
Facultad de Ciencias Físico Matemáticas
Puebla, Pue., México
<https://orcid.org/0000-0002-4000-8547>

Marco A. Morales

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla,
Facultad de Ingeniería Química
Puebla, Pue., México
<https://orcid.org/0000-0002-2361-9645>

José I. Rodríguez-Mora

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla,
Facultad de Ingeniería
Puebla, México
<https://orcid.org/0000-0003-0029-4128>

Ricardo Agustín-Serrano

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla,
Facultad de Ciencias Físico Matemáticas
Puebla, Pue., México
<https://orcid.org/0000-0002-6468-7548>

RESUMEN: En esta investigación científica se estudió numéricamente el modelo matemático de Harderberg – Lefever. Este modelo es un sistema de ecuaciones diferenciales parciales no-lineales, el cual, reproduce una amplia gama de patrones observados con regiones limitadas en agua, incluida fase de puntos entremezclada con fase de desertificación con laberintos. Predice

las transiciones de suelo desnudo con poca precipitación a la vegetación homogénea con alta precipitación, pasando por estados intermedios de patrones de puntos, tripas y huecos. Utilizando estas predicciones, proponemos una explicación novedosa de los fenómenos de desertificación y un nuevo enfoque para clasificar la distribución de biomasa en forma de patrones espacio-temporales. Estos resultados muestran que, en escenarios climáticos futuros, el destino del sistema dependerá de las características y las adaptaciones de las plantas, así como, de la influencia que tienen las condiciones de humedad sobre ellas.

PALABRAS CLAVE: Patrones de vegetación, desertificación, ecohidrología.

MODELING VEGETATION PATTERNS WITH NONLINEAR EQUATIONS USING THE HARDENBERG AND LEFEVER MODELS

ABSTRACT: This paper proposes a new model to describe the vegetation distribution of biomass-desertification. This model is a system of nonlinear partial differential equations, which reproduces a wide range of patterns observed in water-limited regions, including points and intermixed phases of desertification with mazes. It predicts transitions from bare soil with low precipitation to homogeneous vegetation with high precipitation through intermediate states of point, gut, and gap patterns. Using these predictions, we propose a novel explanation of desertification phenomena and a new approach to classify the biomass by means of the morphology of their pattern. The

results obtained by the model show that, in future climate scenarios, the fate of the system will depend on the characteristics and improvements of the plants, as well as the influence of moisture conditions on them.

KEYWORDS: Vegetation-patterns, desertification, ecohydrology.

1 | INTRODUCCIÓN

El cambio climático es un tema que, durante años, ha capturado la atención de todo ser pensante en el globo terráqueo. Los temas ambientales han sido ignorados o considerados secundarios, debido a que no se le ha dado una justa dimensión a la importancia de un medio ambiente sano; o bien, ingenuamente como especie humana conservamos la esperanza de que al solucionar los problemas sociales y económicos los ecosistemas naturales tendrían tiempo y capacidad de recuperarse por sí solos. Sin embargo, se enfrenta el hecho de que el deterioro ambiental amenaza seriamente el desarrollo actual y el futuro de diferentes ecosistemas [13]. La degradación del medio ambiente con el consecuente cambio climático es una bomba de tiempo que debe ser desactivada, si el ser humano no quiere desaparecer como especie de nuestro planeta.

Se han sugerido una gran cantidad de hipótesis sobre el origen de formación de patrones de vegetación. Existe una gran variedad de modelos matemáticos que describen la formación de estos mismos o específicamente: la distribución vegetal de biomasa mediante las leyes de la Física y su comportamiento no lineal para modelar la interacción de las plantas con su medio ambiente. Este nuevo esfuerzo científico ha fructificado en nuevas áreas de la ciencia como la Ecohidrología [1, 7] y otras herramientas como la Alometría [10]. Tal es el caso del modelo de Hardenberg [11], el cual predice las transiciones de suelo desnudo con poca precipitación y la vegetación homogénea con alta precipitación donde coexisten diferentes estados estables. O bien, el modelo de Lefever [17] donde los resultados modifican la interpretación común que asocia los patrones de vegetación y el proceso de desertificación local bajo inestabilidad de Turing, dando así una comprensión unificada de la autoorganización de la vegetación dentro del amplio contexto de las transiciones entre el orden-desorden de la materia.

Por otro lado, Giland [8] desarrolla un modelo matemático para un par de ingenieros de ecosistemas que se encuentran comúnmente en las tierras secas los cuales forman patrones de vegetación y cianobacterias que forman costras del suelo, el cual es un enfoque distinto al de HilleRisLambers [12], quien revela que la formación de patrones puede ocurrir en áreas semiáridas dada solo la retroalimentación positiva entre la densidad de plantas y la infiltración de agua local, junto con la redistribución espacial del agua de escorrentía. Estos modelos son algunos de la gran cantidad de hipótesis que se han sugerido sobre el origen de formación de patrones de vegetación; no obstante, aún no se ha alcanzado un consenso generalizado. Inclusive, se han propuesto modelos estocásticos antagónicos a

los modelos de reacción-difusión [4, 26].

El objetivo de este trabajo es estudiar analítica y numéricamente un modelo matemático propuesto a partir de los modelos de Hardenberg y Lefever, el cual tendrá como objetivo describir la distribución vegetal de biomasa, dando así una forma de entender la formación de patrones de vegetación y desertificación. Por ello, será necesario considerar algunos factores ambientales que tengan causas capaces de explicar la formación de dichos patrones. Existe una gran complejidad en las comunidades vegetales, sumado a las escalas de tiempo muy largas que rigen la evolución de la ecología vegetal (respecto a los estándares humanos), idear modelos capaces de determinar qué efectos tiene una multitud de factores ambientales en la distribución de la vegetación, es una tarea altamente problemática y es aún más problemático cuantificar estos efectos.

El modelo de dinámica de la distribución vegetal presentado en este documento pretende llenar los vacíos teóricos. Permitirá predecir que las distribuciones de vegetación pueden sufrir una inestabilidad que rompe la simetría como resultado de las interacciones entre los diferentes tipos de biomasa, haciendo notar que corresponde al ámbito de los fenómenos no lineales y la hidroecología. Los parámetros adecuados para describir esta inestabilidad corresponden más a las propiedades de la vegetación que al medio ambiente.

2 | EL MODELO DE HARDENBERG – LEFEVER

Se propone un modelo que emplea ecuaciones diferenciales parciales y no lineales. La primera ecuación de este sistema modela propiedades de $\eta(\vec{r}, t)$ como la forma de su reproducción, la difusión espacial de la misma y las fuentes de recursos que poseen dependiendo el entorno en el que se encuentran. Además, la segunda ecuación del modelo considera las propiedades que tiene $\omega(\vec{r}, t)$ tales como, la evapotranspiración de las plantas, una fuente de saturación de agua y la difusión espacial de $\omega(\vec{r}, t)$ influyendo sobre $\eta(\vec{r}, t)$, Esta variable representa la densidad de la distribución de biomasa y $\omega(\vec{r}, t)$ representa la humedad, dándole así al modelo un enfoque no lineal más completo. La primera de las ecuaciones del modelo se escribe como:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = M - K\eta + g\eta^2 - \eta^3 + \Gamma \nabla^2 \eta + \frac{1}{2} \Gamma \nabla^4 \eta \quad (1)$$

donde el término M está asociado a una fuente/perdida de densidad de biomasa estacionaria, el término $K\eta$ explica la mortalidad por los herbívoros, η^3 impide la separación de fases, $\Gamma \nabla^2 \eta$ es la difusión espacial de biomasa y el término $\frac{1}{2} \Gamma \nabla^4 \eta$ representa un término de difusión de largo alcance de la densidad de biomasa [17].

Como se busca un modelo más realista, consideramos que la cantidad de agua que tienen las plantas no es constante, detalle que nos lleva a acoplar la ecuación para la humedad al modelo de Hardenberg [11] a la ecuación (1) de la densidad de biomasa del modelo de Lefever [17], de manera que:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -M - K\eta + g\eta^2 - \eta^3 + \varepsilon\omega^2\eta + \Gamma\nabla^2\eta + \frac{1}{2}\Gamma\nabla^4\eta \quad (2)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = p - (1 - \rho\eta)\omega - \varepsilon\omega^2\eta + \delta\nabla^2(\omega - \beta\eta) - v\frac{\partial}{\partial t}(\omega - \alpha\eta) \quad (3)$$

donde p es la precipitación anual; $-(1-\rho\eta)\omega$ es el término de pérdida por evaporación, $\delta\nabla^2(\omega-\beta\eta)$ es el término que modela la difusión de agua mediante absorción de raíces de la planta, $\varepsilon\omega^2\eta$ representa el término de acoplamiento que muestra la ganancia/pérdida por transpiración del agua en las plantas. Finalmente, el término $v\frac{\partial}{\partial t}(\omega - \alpha\eta)$ muestra la pérdida de agua por filtración debido a la pendiente del suelo v , la cual puede ser una función espacial [11].

3 | RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados numéricos obtenidos mediante el método de diferencia finita y aproximando las derivadas espaciales de segundo orden con derivada numérica centrada [6, 25, 29], empleado para resolver las ecuaciones (2) y (3) del modelo de Hardenberg – Lefever. Se realizaron experimentos numéricos con arreglos de mallas de 256x256 a 100,000 iteraciones con un paso de tiempo $dt = 0.001$, variando los parámetros de control K con un paso $dK=0.5$ y ε con un paso $d\varepsilon=0.5$. La implementación del método numérico fue realizada en lenguaje de programación Python en su versión 3.9 y sus librerías (Tkinter y numpy) [16].

Se encontraron 6 fases fundamentales en las cuales, se puede observar que la variable η del modelo significa simultáneamente densidad de biomasa para valores positivos y desertificación para valores negativos. El parámetro de control K del modelo propuesto indica la cooperatividad del sistema, mientras que el parámetro de acoplamiento ε modula los términos tipo Lotka-Volterra. Los valores de los parámetros de control restantes son fijos y tales que: $M=0.1$, $p=0.4$, $g=0$, $\Gamma=0.88$, $y=0$ y $\rho=2$. Es importante mencionar que, al cambiar el valor de M , p y ρ los resultados que se obtienen no cambian significativamente, mientras que, al cambiar los valores de g y y las soluciones numéricas del modelo de Hardenberg – Lefever cambian drásticamente, llevando a este a una fase de desertificación. Las combinaciones explícitas de los valores de los parámetros de control, empleados para obtener las soluciones numéricas en forma de patrones de vegetación-desertificación, se presentan en las Tablas 1 y 2 del Apéndice A.

Por observación directa de los patrones de vegetación y desertificación, permite confirmar las fases de distribución de biomasa – desertificación del modelo Hardenberg – Lefever, ya que, además de contar con las fases de puntos (ver Figura 3), huecos (ver Figura 5), laberintos (ver Figura 4) y fase de vegetación uniforme (ver Figura 6) reportados en las referencias [15-28, 7, 11, 13, 17, 19, 27, 3-20], además se obtiene una fase entremezclada de desertificación con laberintos de mayor complejidad morfológica (ver Figura 2).

Como una aplicación y resultado final, se realiza una comparación de los resultados

obtenidos por nuestro modelo con fotografías capturadas de la formación de zonas de biomasa – desertificación en distintas regiones, en las cuales, podemos observar algunas de las fases presentadas en las Figuras 1 a 10, tales como, puntos, huecos, laberintos y algunas de estas fases son entremezcladas.

En todos los resultados obtenidos de la simulación computacional, consideramos que la pérdida de agua por filtración debido a la pendiente del suelo era nula, es decir, que $v=0$, de manera que, el término $v \frac{\partial}{\partial t} (\omega - \alpha \eta)$ en la ecuación (5) no había sido tomado en cuenta. Por esta razón, realizamos un experimento numérico más, en donde consideramos los valores de los parámetros para los arreglos de mallas 256x256 de las fases de puntos, laberintos, huecos y la fase entremezclada, con la diferencia de que en este experimento se encendió el valor de v arrojando como resultado lo que se reporta a continuación.

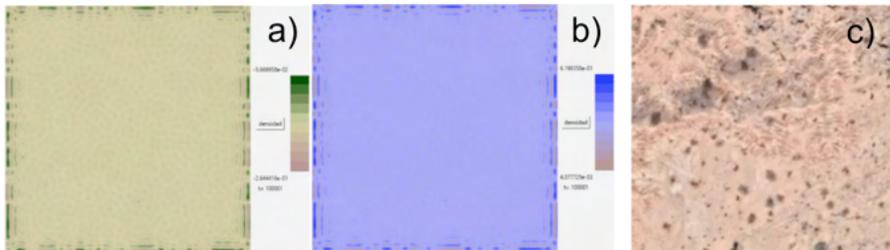


Fig. 1 **Fase de desertificación.** a) Patrón de distribución de biomasa, b) Patrón de distribución de humedad. c) Panorama real ubicado en 3°13'38"N 75°10'059"W.

Fuente: Google Earth.

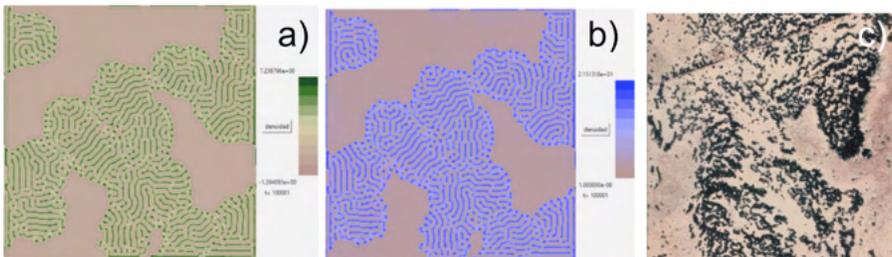


Fig. 2 **Fase intermezclada de desertificación con laberintos.** a) Patrón de distribución de biomasa, b) Patrón de distribución de humedad. c) Panorama real ubicado en 13°20'55"N 2°36'39"E.

Fuente: Google Earth.

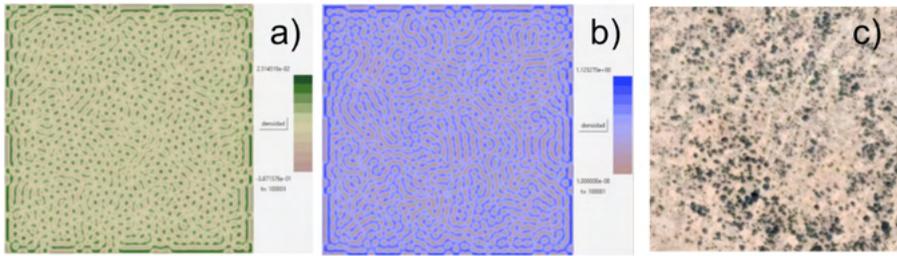


Fig. 3 **Fase de puntos.** a) Patrón de distribución de biomasa, b) Patrón de distribución de humedad. c) Panorama real ubicado en $12^{\circ}57'06''\text{N } 3^{\circ}21'08''\text{E}$.

Fuente: Google Earth.

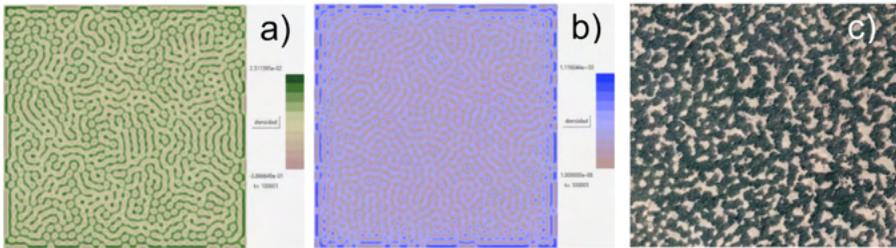


Fig. 4 **Fase de laberintos.** a) Patrón de distribución de biomasa, b) Patrón de distribución de humedad. c) Panorama real ubicado en $12^{\circ}38'59''\text{N } 3^{\circ}10'09''\text{E}$.

Fuente: Google Earth.

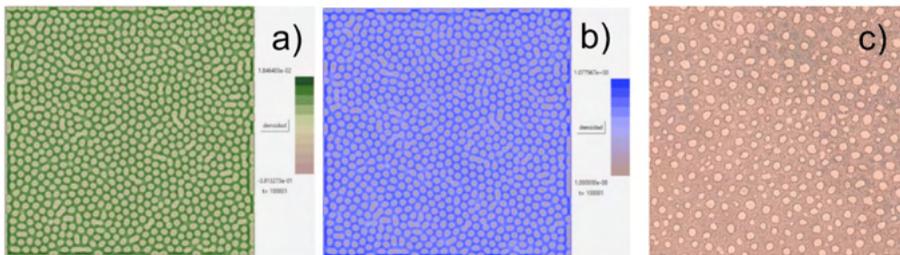


Fig. 5 **Fase de huecos.** a) Patrón de distribución de biomasa, b) Patrón de distribución de humedad. c) Panorama real ubicado en $19^{\circ}01'59''\text{S } 13^{\circ}20'28''\text{E}$.

Fuente: Google Earth.



Fig. 6 **Fase de vegetación uniforme.** a) Patrón de distribución de biomasa, b) Patrón de distribución de humedad. c) Panorama real ubicado en $3^{\circ}23'31''\text{S } 62^{\circ}10'23''\text{W}$.

Fuente: Google Earth.

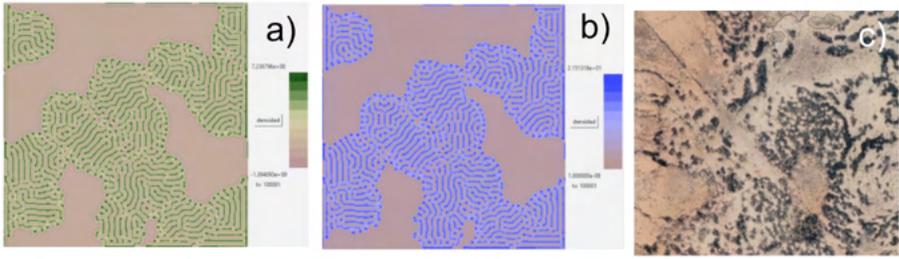


Fig.7 **Fase intermezclada de desertificación con laberintos.** a) Patrón de distribución de biomasa, b) Patrón de distribución de humedad. c) Panorama real ubicado en $13^{\circ}10'30''N$ $2^{\circ}34'52''E$.

Fuente: Google Earth.

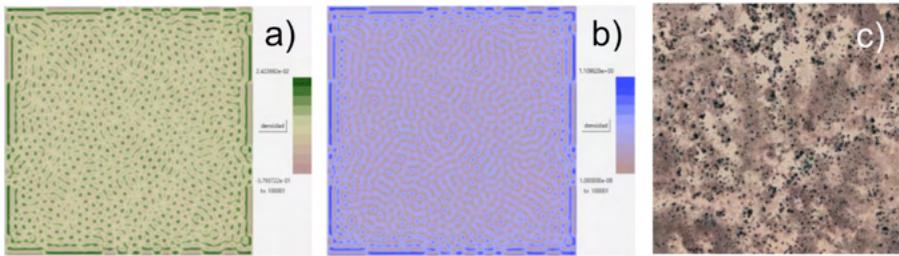


Fig.8 **Fase de puntos.** a) Patrón de distribución de biomasa, b) Patrón de distribución de humedad. c) Panorama real ubicado en $13^{\circ}01'36''N$ $2^{\circ}06'05''E$.

Fuente: Google Earth.

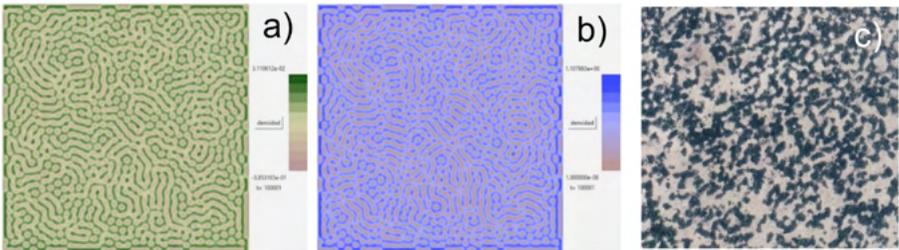


Fig.9 **Fase de laberintos.** a) Patrón de distribución de biomasa, b) Patrón de distribución de humedad. c) Panorama real ubicado en $13^{\circ}07'02''N$ $2^{\circ}38'16''E$.

Fuente: Google Earth.

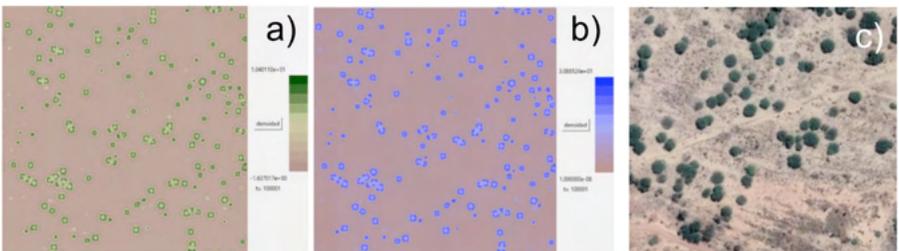


Fig.10 **Fase de huecos.** a) Patrón de distribución de biomasa, b) Patrón de distribución de humedad. c) Panorama real ubicado en $3^{\circ}12'41''N$ $75^{\circ}10'04''W$.

Fuente: Google Eath.

4 | DISCUSIÓN

El modelo de Hardenberg-Lefever propuesto, permite entender la formación de patrones de vegetación de una manera distinta a la mencionada en la diversidad de modelos matemáticos presentados hasta la actualidad. Este modelo es más general y más allá que los sistemas de reacción-difusión, cuyas características observables son la densidad de la distribución de biomasa y aridez (η) y la humedad (ω).

La mayoría de las fases mencionadas anteriormente se han observado en diversos tipos de ecosistemas reportados en la literatura [1, 7, 17, 20]. Se han encontrado patrones de puntos, rayas y bandas en una amplia gama de áreas geográficas en todo el mundo [1, 7, 17, 20]. Muy a menudo, los patrones involucran a más de una especie. La irregularidad autoorganizada en estos ecosistemas difiere en escala y forma. Un ejemplo de patrones que han sido reportados en la actualidad son huecos, laberintos, rayas (“arbusto de tigre”) y manchas (“arbusto de leopardo”) [24].

El mecanismo general que subyace a esta irregularidad autoorganizada es una retroalimentación positiva entre el crecimiento de las plantas y la disponibilidad de agua. Una mayor densidad de vegetación permite una mayor infiltración de agua en el suelo (debido a la penetración de las raíces) y una menor evaporación del suelo (debido a la sombra). Como resultado, la vegetación persiste una vez presente. Sin embargo, el suelo desnudo es demasiado hostil para la recolonización después de que la vegetación desaparezca. En términos generales, esto se debe a inestabilidades inducidas por difusión en el mejor de los casos [14, 22], aunque existen otros tipos de inestabilidades que ocurren mediante otros mecanismos de inestabilidad [2, 14, 21, 23].

La formación de patrones es parte de la dinámica inestable de las ecuaciones no lineales dadas por el modelo Hardenberg – Lefever, como producto de una dinámica inestable. La solución numérica del modelo nos muestra una diversidad de diferentes fases morfológicas en los patrones. Esta inestabilidad es causada por la competencia de distribución de biomasa sobre los recursos hídricos. El tipo de patrón depende del rango de acumulación de humedad por planta; fase uniforme de vegetación para valores de ε relativamente altos, laberintos (o franjas/tripas) para cuando el valor de ε toma un valor intermedio y agujeros en una cobertura uniforme para valores de ε relativamente bajos. Estos patrones reflejan una auto-organización óptima del sistema con respecto a los recursos hídricos, esto se sabe debido a la dinámica no lineal y la competencia interacción de los términos del modelo.

De acuerdo con Mander y Dekker [19], estos patrones pueden observarse en imágenes satelitales y pueden producirse mediante sistemas de activación-inhibición en modelos computacionales. O bien, mediante software que permite una caracterización de la distribución de biomasa o desertificación de estas imágenes satelitales [5], lo cual es motivo de estudios futuros. El desarrollo de patrones de vegetación espacial en simulaciones sigue

una secuencia bien establecida que está relacionada con la cantidad de lluvia suministrada a la superficie terrestre. Con niveles de lluvia relativamente altos, toda la superficie de la tierra está cubierta de vegetación y, a medida que la lluvia disminuye progresivamente, los patrones de vegetación cambian de huecos (cubierta de vegetación casi continua con pequeñas aberturas) a laberintos (redes reticuladas de vegetación) a manchas (pequeños parches de vegetación), y finalmente al suelo desnudo, tal y como se puede observar en las Figuras 1 - 6.

El aumento de la infiltración de agua debajo de los patrones de vegetación y la sombra representan importantes procesos de facilitación local, mientras que el flujo de agua terrestre y la competencia a través del sistema de raíces son ejemplos de importantes retroalimentaciones a largo plazo. Kletter y von Hardenberg [15], mencionan que, un resultado importante de estos estudios es su robustez y consistencia: todos los modelos son capaces de reproducir la misma fenomenología de patrones periódicos de biomasa tan pronto como se eligen rangos realistas para los parámetros. Se diferencian principalmente en el detalle con el que representan diferentes mecanismos de retroalimentación, lo que permite a algunos de ellos capturar con mayor detalle la fenomenología de los patrones de vegetación, su resiliencia a los cambios ambientales o la creación de nichos ecológicos.

Presentamos aquí un nuevo modelo matemático que da cuenta de una amplia gama de patrones de biomasa – desertificación. Usando este modelo demostramos la ventaja potencial de un enfoque de la dinámica no lineal espacio-temporal en el estudio de los ecosistemas (Ecohidrología). La coexistencia de estados estables e inestables arroja nueva luz sobre los fenómenos de desertificación y vegetación. La secuencia de estados estables a lo largo de un gradiente de lluvia motiva una clasificación de la aridez que refleja mejor las propiedades del sistema, como la vulnerabilidad a la desertificación.

5 | CONCLUSIONES

En general, estos patrones de vegetación se interpretan como un proceso de autoorganización descrito por mecanismos no lineales dados por las ecuaciones del modelo Hardenberg – Lefever. La dinámica de separación de fases encontrada y sus transiciones entre sus fases, refleja el cambio de acuerdo con los parámetros sensibles ϵ y K de la estructura de la distribución de biomasa frente al estrés hídrico.

El modelo de Hardenberg – Lefever es un modelo bastante completo y competente, pues además de mostrar en los resultados una cantidad considerable de reproducción de patrones de vegetación y desertificación de diferentes ecosistemas, también puede ser comparado con la naturaleza de manera inmediata mediante imágenes satelitales. Mediante ésta comparación de resultados, se ha demostrado que el modelo de Hardenberg – Lefever es un modelo descriptivo. Estas observaciones muestran que pueden surgir patrones auto-organizados a diferentes escalas [7, 8, 11. 18-24].

A diferencia de otros modelos existentes, tales como el modelo de Rietkerk [24], el modelo de Lefever – Lejeune [18] o el modelo de Siero [27], los cuales utilizan sistemas de ecuaciones diferenciales parciales más complicados, el modelo de Hardenberg-Lefever es más fácil de tratar analítica y numéricamente.

En el contexto de los patrones de biomasa – desertificación espacial en ecosistemas de tierras secas, el enfoque que hemos desarrollado, se suma a la creciente caja de herramientas de métodos para analizar estos patrones. En este contexto, el trabajo futuro podría explorar el grado en que nuestra caracterización de la morfología del patrón de biomasa podría usarse como una herramienta de detección temprana del estado de desertificación.

Finalmente se demuestra que el patrón de vegetación es conceptualmente una transición desorden – orden, cuya dinámica es similar a los procesos no lineales de separación de fases, más que a la inestabilidad inducida por difusión.

AGRADECIMIENTOS

Apoyo especial VIEP-BUAP No. de Proyecto Asignado 39566. Manufacture of an electrospinning industrial equipment for processing of PLA/PVA membranes enriched with extract of Agave Salmiana as active dressings to skin wound healing.

APÉNDICE A: TABLAS CON LOS VALORES DE LOS PARÁMETROS DE CONTROL PARA LAS SOLUCIONES NUMÉRICAS DEL MODELO DE LEFEVER-HARDERG

Parameters	Fig. 1(a,b)	Fig. 2(a,b)	Fig. 3(a,b)	Fig. 4(a,b)	Fig. 5(a,b)	Fig. 6(a,b)
K	0.52	1.34	0.45	0.45	0.44	1.14
ε	-0.67	0.115	-0.67	-0.88	-1.23	-0.42
ρ	2	2	2	2	2	2
M	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
p	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Γ	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88
g	0	30	0	0	0	0
Grid	256 ²					

Tabla 1: valores de los parámetros de control de las figuras 1 a 6.

Parameters	Fig. 7(a,b)	Fig. 8(a,b)	Fig. 9(a,b)	Fig. 10(a,b)
K	1.34	0.45	0.45	0.44
ε	0.115	-0.67	-0.88	-1.23
ρ	2	2	2	2
M	0.1	0.1	0.1	0.1
p	0.4	0.4	0.4	0.4
Γ	0.88	0.88	0.88	0.88
g	30	0	0	0
Grid	256 ²	256 ²	256 ²	256 ²

Tabla 2: valores de los parámetros de control de las figuras 7 a 10.

REFERENCIAS

- [1] BORGOGNO, F.; D'ODORICO, P.; LAIO, F.; RIDOLFI L. **Mathematical Models of Vegetation Pattern Formation in Ecohydrology**. *Reviews of Geophysics*, v. 47, n. 1, CitelD RG1005, March 2009. DOI: 10.1029/2007RG000256
- [2] BOYER, D.; VIÑALS, J. **Weakly Nonlinear Theory of Grain Boundary Motion in Patterns with Crystalline Symmetry**. *Physical Review Letters*, v. 89, n. 5, July 2002. DOI: 10.1103/PhysRevLett.89.055501.
- [3] CHENG, Y.; STIEGLITZ, M.; TURK, G. AND ENGEL, V. **Effects of anisotropy on pattern formation in wetland ecosystems**. *Geophysical Research Letters*, v. 38, n. 4: L04402, February 2011. DOI:10.1029/2010GL046091.
- [4] D'ODORICO P., LAIO, F.; AND RIDOLFI, L. **Vegetation patterns induced by random climate fluctuations**. *Geophysical Research Letters*, v. 33, n.19, October 2006. DOI: 10.1029/2006GL027499.
- [5] FERREIRA, T.; RASBAND, W. **Image J User Guide**. IJ1.46r. October 2012.
- [6] FORNBERG, B. **Generation of finite difference formulas on arbitrarily spaced grids**. *Mathematics of computation*, v. 51, n. 184, p. 699-706, October 1988. DOI: 10.1090/S0025-5718-1988-0935077-0.
- [7] GANDHI, P.; IAMS, S.; BONETTI, S.; SILVER, M. **Vegetation Pattern Formation in Drylands**. *Dryland Ecohydrology*, p. 469-509, October 2019. ISBN: 978-3-030-23269-6. DOI: 10.1007/978-3-030-23269-6_18.
- [8] GILAD, E.; J. VON HARDENBERG; PROVENZALE, A.; SHACHAK, M.; AND MERON, E. **Ecosystem Engineers: From Pattern Formation to Habitat Creation**. *Physical Review Letters*, v. 93, n. 9, 098105, August 2004. DOI: 10.1103/PhysRevLett.93.098105.
- [9] GILAD, E.; J. VON HARDENBERG; PROVENZALE, A.; SHACHAK, M.; AND MERON, E. **A mathematical model of plants as ecosystem engineers**. *Journal of Theoretical Biology*, v. 244, n. 4, p. 680–691, February 2007. DOI: 10.1016/j.jtbi.2006.08.006.

- [10] GOMES DE ARAÚJO, E. J.; HAMBRECHT LOUREIRO, G.; SANQUETTA, C. R.; INOUE SANQUETTA, M. N.; DALLA CORTE, A. P.; PÉLICO NETTO, S.; BEHLING, A. **Allometric models to biomass in restoration areas in the Atlantic rain forest**. *Floresta e Ambiente*, v. 25, n. 1, e20160193, February 2018. DOI: 10.1590/2179-8087.019316.
- [11] HARDENBERG, J. VON; MERON, E.; SHACHAK, M.; ZARMI, Y. **Diversity of Vegetation Patterns and Desertification**. *Physical Review Letters*, v. 87, n. 19: 198101. DOI: 10.1103/PhysRevLett.87.198101.
- [12] HILLERISLAMBERS, R.; RIETKERK, M.; VAN DEN BOSCH, F.; PRINS, H. H. T. AND DE KROON, H. **Vegetation pattern formation in semi-arid grazing systems**. *Ecology*, v. 82, n. 1, p. 50-61, January 2001. DOI: 10.2307/2680085.
- [13] KÉFI, S.; RIETKERK, M.; ALADOS, C. L.; PUEYO, Y.; PAPANASTASIS, V. P.; ELAICH, A. AND DE RUITER, P.C. **Spatial vegetation patterns and imminent desertification in Mediterranean arid ecosystems**. *Nature*, v. 449, n. 7159, p. 213-217, September 2007. DOI: 10.1038/nature06111.
- [14] KISHORE DUTTA, **Reaction-diffusion Dynamics and Biological Pattern Formation**. *Journal of Applied Nonlinear Dynamics*, v. 6, n. 4, p. 547–564, November 2017. DOI:10.5890/JAND.2017.12.009
- [15] KLETTER, A.; J. VON HARDENBERG; MERON, E. **Ostwald Ripening in Dryland Vegetation**. *Communications on Pure and Applied Analysis*, v. 11, n.1, p. 261 – 263, January 2012. DOI: 10.3934/cpaa.2012.11.261.
- [16] LANGTANGEN, HANS PETTER. **A primer on scientific programming with Python**. Vol. 6. Berlin/Heidelberg: Springer, 2011. ISBN: 978-3-662-49887-3.
- [17] LEFEVER, R.; BARBIER, N.; COUTERON, P. AND LEJEUNE, O. **Deeply gapped vegetation patterns: on crown/root allometry, criticality and desertification**. *Journal of Theoretical Biology*, v. 261, n. 2, p. 194, August 2009. DOI: 10.1016/j.jtbi.2009.07.030.
- [18] LEFEVER, R.; AND LEJEUNE, O.; **On the origin of tiger bush**. *Bulletin of Mathematical Biology*, v. 59, n. 2, p. 263-294, March 1997. DOI:10.1007/BF02462004.
- [19] MANDER, L.; DEKKER, S. C.; LI, M.; MIO, W.; PUNYASENA, S. W. AND LENTON, T. M. **A morphometric análisis of vegetation patterns in dryland ecosystems**. *Royal society open science*, v. 4, n. 2, February 2017. DOI: 10.1098/rsos.160443.
- [20] MERON, E. **Vegetation pattern formation: The mechanisms behind the forms**. *Physics Today*, v. 72, n. 11, pg. 30 – 36, November 2019. DOI:10.1063/PT.3.4340.
- [21] MORALES, M. A., FERNÁNDEZ-CERVANTES, I., AGUSTÍN-SERRANO, R., ANZO, A., & SAMPEDRO, M. P. **Patterns formation in ferrofluids and solid dissolutions using stochastic models with dissipative dynamics**. *The European Physical Journal B*, v. 89, n. 8, p. 182, August 2016. DOI:10.1140/epjb/e2016-70344-7.
- [22] MURRAY, J. D. **Mathematical biology: I. An introduction**. Vol. 17. Springer Science & Business Media, 2007. ISBN: 978-0-387-22437-4.

[23] QUAN-XING, L.; DOELMAN, A.; ROTTSCHAFFER, V. AND DE JAGER, M. **Phase separation explains a new class of self-organized spatial patterns in ecological systems**. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 110, n. 29, p. 11905-11910, July 2013. DOI:10.1073/pnas.1222339110.

[24] RIETKERK, M.; BOERLIJST, M. C.; VAN LANGEVELDE, F.; HILLERISLAMBERS, R.; VAN DE KOPPEL, J.; KUMAR, L.; PRINS, H. H. T. AND DE ROOS, A. M. **Self-organization of vegetation in arid ecosystems**. American Naturalist, v. 160, n. 4, p. 524 – 530, October 2002. DOI: 10.1086/342078.

[25] ROJAS-RODRÍGUEZ, J. F. **Procesos dinámicos en ecosistemas: interacciones y autoorganización espacial**. Disertación de tesis doctoral, Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (2010).

[26] SHNERB, N. M.; SARAH, P.; LAVEE, H. AND SOLOMON, S. **Reactive glass and vegetation patterns**. Physical Review Letter, v. 90, n. 3: 038101, February 2003. DOI:10.1103/PhysRevLett.90.038101.

[27] SIERO, E.; DOELMAN, A.; EPPINGA, M. B.; RADEMACHER, J. D. M.; RIETKERK, M. AND SITEUR, K. **Striped pattern selection by advective reaction-diffusion systems: Resilience of banded vegetation on slopes**. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, v. 25, n. 3, 036411, March 2015. DOI: 10.1063/1.4914450.

[28] TARNITA, C.; BONACHELA, J.; SHEFFER, E.; GUYTON, J.; COVERDALE, T.; LONG, R. & PRINGLE, R. **A theoretical foundation for multi-scale regular vegetation patterns**. Nature, v. 541, n. 7637, p. 398 – 401, January 2017. DOI: 10.1038/nature20801.

[29] WITELSKI, T.; BOWEN, M. **Methods of Mathematical Modelling: Continuous Systems and Differential Equations**. Springer. June 2015. ISBN: 978-3-319-23042-9.

[30] ZHANG, H.; HUANG, T.; DAI, L.; PAN, G.; LIU, Z.; GAO, Z.; ZHANG, X. **Regular and Irregular Vegetation Pattern Formation in Semiarid Regions: A Study on Discrete Klausmeier Model**. Hindawi Complexity, v. 2020, January 2020. DOI:10.1155/2020/2498073.

UTILIZAÇÃO DOS EXTRATOS BOTÂNICOS DE FOLHAS DE LARANJA (*Citrus sinensis* L), SOBRE AS FORMIGAS CORTADEIRAS (*Atta sexdens sexdens*) EM CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS

Data de aceite: 01/03/2022

Antônio Geilson Matias Monteiro

Universidade Federal do Amazonas
Campus Manaus
Manaus-Amazonas
<http://lattes.cnpq.br/0153437427429212>

Adriana Dantas Gonzaga de Freitas

Universidade Federal do Amazonas
Campus Manaus
Manaus-Amazonas
<http://lattes.cnpq.br/3694117633635449>

RESUMO: As formigas cortadeiras são responsáveis por prejuízos agrícolas. Seu controle é basicamente químico, o que causa prejuízos ambientais, aos animais selvagens e a saúde do homem. Medidas preventivas de controle devem ser tomadas, e o uso de plantas inseticidas é uma alternativa viável. Desta maneira, o objetivo deste trabalho foi investigar o potencial de ação inseticida das folhas de laranja (*Citrus sinensis* L.) e Bt (*Bacillus thuringiensis*) sobre as formigas cortadeiras (*A. sexdens sexdens*) em condições experimentais. O projeto foi executado no laboratório de zoologia do Instituto de Saúde e Biotecnologia – ISB/UFAM, Campus/Coari. A coleta das formigas cortadeiras foi realizada no Centro de Apoio à Pesquisa do Médio Solimões, localizado na cidade de Coari. As folhas de laranja foram coletadas no campus do ISB, encaminhadas ao laboratório de química, onde foi realizada assepsia com água destilada. As amostras foram separadas, pesadas e

levadas à estufa de circulação de ar forçada a uma temperatura de 55° C, por um período de cinco dias. As folhas foram trituradas e levadas ao sistema Soxhlet, tendo como solvente água destilada. No bioensaio, foram colocadas 10 formigas adultas para cada placa de Petri, com auxílio de pinças entomológicas. Posteriormente, foi aplicado cerca de 3 mL dos extratos botânicos em cinco concentrações (1:0; 1:½; 1:1; 1:1½; 1:2). A testemunha foi pulverizada com água destilada. Foram utilizados cinco tratamentos com três repetições, mais a testemunha totalizando 18 parcelas para cada produto. O experimento foi observado diariamente durante cinco dias. Os dados foram submetidos a uma análise de variância com 95% de significância. Registramos 95% de mortalidade das formigas nas 120 horas de observação em todos os tratamentos, mas não houve diferença significativa. Novos testes estão sendo realizados para verificar a eficiência dos produtos vegetais.

PALAVRAS-CHAVE: Controle alternativo, plantas inseticidas, insetos pragas.

USE OF BOTANICAL EXTRACTS OF ORANGE LEAVES (*Citrus sinensis* L), ON HARVESTING ANTS (*Atta sexdens sexdens*) IN EXPERIMENTAL CONDITIONS

ABSTRACT: Leaf-cutting ants are responsible for agricultural losses. Its control is basically chemical, which causes damage to the environment, wild animals and human health. Preventive control measures must be taken, and the use of insecticidal plants is a viable alternative. Thus, the objective of this work was to investigate

the insecticidal action potential of orange (*Citrus sinensis* L.) and Bt (*Bacillus thuringiensis*) leaves on leaf-cutting ants (*A. sexdens sexdens*) under experimental conditions. The project was carried out in the zoology laboratory of the Institute of Health and Biotechnology – ISB/UFAM, Campus/Coari. The collection of leaf-cutting ants was carried out at the Middle Solimões Research Support Center, located in the city of Coari. The orange leaves were collected on the ISB campus, sent to the chemistry laboratory, where asepsis was performed with distilled water. The samples were separated, weighed and taken to a forced air circulation oven at a temperature of 55°C for a period of five days. The leaves were crushed and taken to the Soxhlet system, using distilled water as solvent. In the bioassay, 10 adult ants were placed in each Petri dish, with the aid of entomological tweezers. Subsequently, approximately 3 mL of botanical extracts were applied in five concentrations (1:0; 1:½; 1:1; 1:1½; 1:2). The control was sprayed with distilled water. Five treatments were used with three replications, plus the control, totaling 18 plots for each product. The experiment was observed daily for five days. The data were submitted to an analysis of variance with 95% of significance. We recorded 95% ant mortality in the 120 hours of observation in all treatments, but there was no significant difference. New tests are being carried out to verify the efficiency of plant products.

KEYWORDS: Alternative control, insecticidal plants, insect pest.

INTRODUÇÃO

As formigas cortadeiras são responsáveis por grandes prejuízos econômicos, sendo que as formigas pertencentes aos gêneros *Atta* (saúvas) e *Acromyrmex* (quenquéns), são as que mais se destacam como um dos principais insetos-pragas, que atacam os sistemas agrícolas, nas regiões de clima tropical e subtropical das Américas. Dentre estas, as saúvas são as maiores causadoras de danos, devido ao grande tamanho populacional das colônias, desta forma para suprir a necessidade de alimentação destes insetos, as formigas precisam de grandes quantidades de folhas, que servem de substrato para o fungo simbiote que compõe a principal fonte de alimentação do saúveiro (HOWARD et al., 1988)

Existe uma forte relação entre as formigas cortadeiras e o fungo simbiote, pois a sobrevivência de ambos está relacionada a essa associação, e acredita-se que estes não podem sobreviver separadamente. As formigas são responsáveis pelo fornecimento de substrato para o fungo, além de manterem o ambiente limpo e livre de contaminantes, o que favorece o desenvolvimento do fungo (HOLLOBLER; WILSON, 1990). As formigas cortadeiras são de grande importância econômica pelo fato de utilizarem grande quantidade de material vegetal para o cultivo do fungo simbiote.

Segundo Della Lucia e Oliveira (1993), o processo de obtenção de material vegetal para suprir as necessidades alimentar da colônia, possui alguns critérios como, seleção do material, corte e transporte das folhas para o interior do ninho. Para a eficiência das atividades de forrageamento, as formigas possuem estratégias comportamentais para encontrar e utilizar fontes energéticas e nutrientes, isso resulta na interação de comportamentos

individuais das operárias e na construção de trilhas de exploração (SCHLINDWEIN, 2004).

Durante as atividades de forrageamento as saúvas, exploram enormes áreas, fazendo o corte em diversas espécies de plantas, ao longo dessas áreas são construídas trilhas, de aproximadamente 400 metros de comprimento por 20 cm de largura, essa trilha é usada para o transporte do material vegetal. As formigas possuem hábitos noturnos para as atividades de forrageamento, porém essas atividades podem ser observadas durante o dia no período da manhã com o clima mais ameno. Apesar de se alimentarem de várias espécies vegetais, as formigas apresentam características bastante seletivas, possuem preferências com relação ao corte das plantas, por partes mais jovens e macias, como folhas novas, brotos e flores (LIMA et al., 2001).

As formigas são conhecidas pela sua voracidade, em relação ao ataque que fazem nos sistemas agroflorestal, os danos causados por essas formigas variam de danos parciais a total desfolhamento das plantas, as ações das formigas são intensa e constante podendo acontecer em qualquer fase de desenvolvimento das culturas. Por estes motivos as formigas cortadeiras são denominadas uma das principais pragas das culturas (ZANETTI et al., 2002).

Estes insetos representam uma forte ameaça às plantações, sendo responsável por sérios danos econômicos a agricultura nacional, pelo fato da competição pelas plantas cultivadas pelo homem. As formigas cortadeiras estão distribuídas por quase todo o território brasileiro, e os ataques são realizados intensamente durante o ano inteiro. Outra questão preocupante está relacionado às dificuldades e os altos custos no controle destas formigas. Para muitos agricultores as formigas cortadeiras estão na linha de frente como os principais inimigos das culturas, e para o efetivo controle, é necessário muito investimento com formicidas, equipamentos e mãos de obra (LOECK; GRÜTZMACHER, 2001).

Em virtude dos danos econômicos causados pelas formigas cortadeiras, diversas formas de controle já foram desenvolvidas (JACCOUD, 2000). Apesar dos vários métodos de controle existente, os métodos mais utilizados no controle das formigas cortadeiras são uso de inseticidas sintéticos, porém estes podem gerar impactos negativos ao ambiente e ao homem (SOUZA-SILVA et al., 2005). Segundo Boaretto e Forti (1997) o controle químico de formigas cortadeiras é realizado por meio de iscas, termonebulização e fumigantes, contudo estes métodos exigem altos custos. Desta forma grandes quantidades de inseticidas são aplicadas na tentativa de controle dessas formigas e, nem sempre apresentam resultados satisfatórios (DELLA LUCIA; FOWLER, 1993).

Para Júnior (2003) é de fundamental importância à busca por novas alternativas, que possam fazer frente ao controle de pragas, e que o mesmo possa oferecer maior segurança, seletividade, biodegradabilidade, viabilidade econômica e aplicabilidade e baixo impacto ambiental em programas integrados de controle de insetos. Os diversos efeitos negativos advindo do uso indiscriminado de agrotóxicos sintéticos podem ser minimizados com o uso de produtos alternativos como os extratos botânicos, devido a algumas características

benéficas relativas à toxicidade, pois possuem degradação rápida o que geralmente pode reduzir o impacto aos inimigos naturais, ao homem e ao ambiente (BRITO et al., 2008).

Muitos estudos estão sendo desenvolvidos sobre plantas com potencial inseticida, com o objetivo de extrair e identificar compostos que possam atuar no controle das formigas ou a seu fungo, esses estudos têm sido realizados com o intuito de desenvolver metodologias viáveis para aplicação em campo. O uso de substâncias tóxicas, extraídas de vegetais, poderá apresentar-se, no futuro, como uma possibilidade de controle (ACÁCIO BIGI et al., 2004). Logo esta pesquisa teve como objetivo investigar o potencial de ação inseticida das folhas de laranja (*Citrus sinensis* L.) sobre as formigas cortadeiras (*A. sexdens sexdens*) em condições experimentais e comparar a toxicidade da mortalidade das concentrações dos extratos das folhas de laranja.

MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento (bioensaios) foi realizado nos laboratórios de Química Analítica, Química Geral e Química Orgânica, e zoologia localizados na Universidade Federal do Amazonas na cidade Coari.

Coleta dos insetos

A coleta das formigas cortadeiras foi realizada no Campus UFAM / ISB, localizados na cidade de Coari, nas coordenadas S 04°05'37.5 W 063°09'04.1.

Coleta da planta

Amostras de folhas de laranja (*Citrus sinensis*) foram coletadas no campus do ISB/UFAM, encaminhadas ao laboratório de química, no qual foi realizada uma assepsia com água destilada. As folhas prensadas para a confecção da exsicata com fins de identificação e catalogação e encaminhadas ao laboratório de botânica do ISB.

Preparo das concentrações

No laboratório de Química Orgânica as folhas dos vegetais citados acima foram separadas, pesadas e levadas a estufa de circulação de ar forçado a uma temperatura de 55°C, por um período de cinco dias. As folhas retiradas da estufa, já secas (500 g) foram trituradas. O material triturado foi encaminhado ao sistema Soxhlet, tendo como solvente água destilada.

Bioensaio: exposição via de contato

Foi realizado o ensaio com objetivo de testar a eficiência do método de aplicação do produto: exposição via de contato.

Foram colocados 10 formigas adultas, com idade de 10 a 15 dias, para cada placa de Petri, com auxílio de pinças entomológicas. Após foi aplicado cerca de 3 mL do extrato botânico nas concentrações de (1:0; 1/1/2; 1:1; 1:1 ½; 1:2), totalizando 5 concentrações

(cinco tratamentos) com cinco repetições, mais a testemunha, totalizando 30 parcelas. As observações foram diárias, totalizando 120 horas ou cinco dias consecutivos de visualização do experimento. A testemunha foi pulverizada com água destilada.

Estatística e análise de dados

Os dados foram submetidos a uma análise de variância – ANOVA (Zar, 1984), onde foi usado um delineamento inteiramente casualizado com cinco tratamentos e cinco repetições, sendo avaliada a mortalidade dos insetos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As observações referentes à taxa de mortalidade foram realizadas a cada 06 horas durante 5 dias (120 horas). Os valores percentuais referentes à mortalidade dos insetos, nas concentrações de (1:0; 1/1/2; 1:1; 1:1 ½; 1:2) do extrato de laranja e testemunha, no intervalo de tempo de 120 horas, encontra-se no gráfico 01.

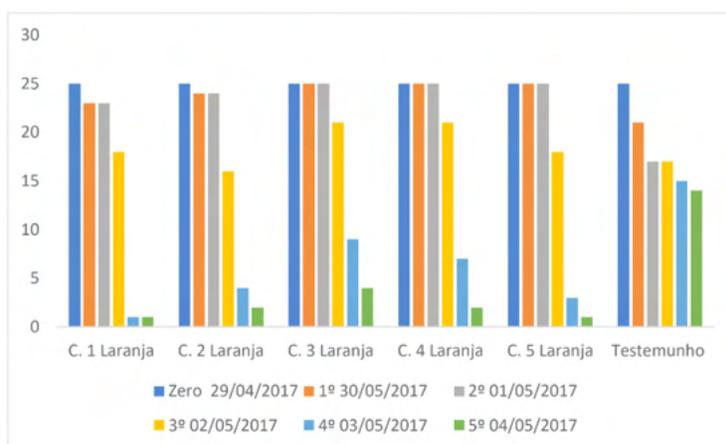


Gráfico 01 - Mortalidade das formigas cortadeiras, nas 120 horas de observação.

De acordo com GALLO *et al.* (2002), o objetivo principal do uso de extratos vegetais é reduzir o crescimento da população de pragas. Segundo os autores, a mortalidade do inseto é apenas um dos efeitos e que, geralmente, necessita de concentrações muito elevadas.

Segundo VENDRAMIM (1997) as avaliações podem ser feitas em campo, casa de vegetação ou em condições de laboratório. Em campo ou em casa de vegetação, utilizando-se parcelas tratadas ou não, o efeito pode ser determinado através da avaliação da população e oviposição do inseto ou do dano sofrido pela planta. Em condições de laboratório, quando são oferecidas folhas provenientes de plantas tratadas e não tratadas,

são avaliados a oviposição, consumo de alimento (em testes com e sem chance de escolha), duração do ciclo biológico, peso e tamanho, mortalidade das fases imaturas e da fase adulta, fecundidade, fertilidade e alterações morfogenéticas.

O uso de extrato vegetais ressurgiu como uma opção para o manejo integrado de pragas onde associado a outras práticas, pode contribuir para a redução de doses e aplicações de inseticidas químicos sintéticos, além de amenizar a mortalidade dos organismos benéficos e ao meio ambiente.

Os testes com os extratos de laranja apresentaram uma mortalidade de 100% dos indivíduos nas 120 horas de observação. Na concentração 1:0 (extrato puro) após 24 horas dos testes 100% das formigas estavam mortas nas cinco repetições. Na concentração de 1/2 a taxa de 100% de mortalidade dos insetos foi alcançada após 48 horas do início dos testes. As demais concentrações (1:1; 1:1 ½; 1:2) após 72 horas possuíam 100% dos insetos mortos em todas as placas. Não ocorreu mortalidade da testemunha em todo o experimento.

Lima et al (2009) testou atividade inseticida do óleo essencial de *Piper hispidinervum* sobre lagarta-do cartucho do milho (*Spodoptera frugiperda*) por ingestão e contato tópico. No Brasil a lagarta-do-cartucho *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith, 1797) (Lepidoptera: Noctuidae), é considerada a principal praga da cultura de milho, atacando plantas jovens e reduzindo em até 34% a produção; dependendo da idade da planta ataca também a cultura da cana-de-açúcar, o arroz e o algodoeiro (VALICENTE & CRUZ, 1991). Os bioensaios demonstraram sua atividade inseticida para *S. frugiperda*, causando mortalidade e redução alimentar pelo teste de ingestão e toxicidade aguda pelo teste de aplicação tópica, sendo também observados sintomas de neurotoxicidade, como agitação e hiperatividade.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na concentração 1:0 (extrato puro) ocorreu a mortalidade de 100% dos indivíduos nas primeiras 24h. Todas as concentrações utilizadas mostraram-se eficientes no controle das formigas cortadeiras em condições experimentais. No entanto, novos testes precisam ser realizados em campo, para recomendar tal produto para agricultores.

Avanços nessa linha de conhecimento é de fundamental importância para auxiliar no controle das pragas para produtores que são adeptos à agricultura orgânica (agroecologia).

REFERÊNCIAS

ACÁCIO-BIGI, M. F. M.; TORKOMIAN, V. L. V.; DE GROOTE, S. T. C.; HEBLING, M. J. A.; BUENO, O. C.; PAGNOCCA, F. C.; FERNANDES, J. B.; VIEIRA, P. C.; SILVA, M. F. G. F. DA Activity of the Ricinus communis (Euphorbiaceae) and ricinine to the leaf-cutting ants *Atta sexdens rubropilosa* Forel, 1908, (Hymenoptera, Formicidae) and to the symbiotic fungus *Leucoagarzcus gongylophorus* (Singer) Möller. Pest Manager Science, v. 60, p. 933-938, 2004.

ALTIERI, M. A.; SILVA, E. N.; NICHOLLS, C. I. 2003. **O papel da diversidade no controle de pragas**. São Paulo. Holos, 226 p.

ALONSO, J. **Tratado de Fitofármacos y Nutracéuticos**. Rosario, Argentina: Corpus Libros, 2004. p. 839-842

ANDREI, E. 1999. **Compêndio de defensivos agrícolas**. 6 ed. São Paulo. 672 p.

AZEVEDO, L.A. 1999. O Manejo Integrado de doenças e pragas do ponto de vista da indústria e defensivos. In: **Manejo Integrado de Pragas e Doenças**, UFV, Viçosa, 147 p.

CEREDA, M.P. 1990. **Resíduos da industrialização da mandioca**. Botucatu: Departamento de tecnologia de produtos agropecuários, Faculdade de Ciências Agrônômicas, UNESP, 42 p.

CROCOMO, W. 1990. **Manejo integrado de pragas**. São Paulo:[s.n]. 540 p.

DELLA LÚCIA, T. M. C. As formigas cortadeiras. Viçosa: Editora da UFV, 1993. 262p.

DELLA LÚCIA, T. M. C.; OLIVEIRA, M. A.; ARAÚJO, M. S. Avaliação da não preferência da formiga cortadeira *Acromyrmex subterraneus* Forel ao corte de Eucalyptus. Revista *Árvore*, Viçosa, v.19, n.1, p. 92-99, 1995.

DI STASI, L.C.; HIRUMA-LIMA, C.A. **Plantas medicinais na Amazônia e na Mata Atlântica**. 2.ed. Colaboração de Alba Regina Monteiro Souza-Brito, Alexandre Mariot, Claudenice Moreira dos Santos. São Paulo: Editora UNESP, 2002. p. p. 163-164.

FERNANDES, A. 1987. **Noções de toxicologia de plantas tóxicas**. 2ed., Fortaleza, 35 p.

FUNDECITRUS. 2005. Principais doenças e pragas. Disponível em www.fundecitros.com.br. Acesso em: 19 de Agosto. de 2013.

GÓES, E; PONTE, J.J. 2002. Manipueira em pó: estudo pioneiro sobre sua ação como fungicida e fertilizante. **Rev. de Agricultura**, Piracicaba, v. 77, n. 1, 15-21 p.

HÖLLDOBLER, B. & WILSON, E. O. The superorganism: the beauty, elegance, and strageness of insects societies. W. W. Norton, London, 2009, 544 p.

LAGUNES, T.A; RODRIGUEZ, H.C. 1992. **Extractos acuosos y polvos vegetales con propiedades insecticidas**. *Chapingo, colégio de postgraduados, centro de entomología y acarología*, 203 p.

MARICONI, F.A.M, CASTRO, V.P. Combate à saúva com iscas. São Paulo Agrícola, v. 4.n.4. maio, 1962.

MARICONI, F. A. M. As saúvas. São Paulo: Agronômica Ceres. 1970. 167p.

MARICONI, F.A.M. As saúvas. Circular Técnica, n. 77, IPEF, São Paulo, 1979.

MARTINS, J. E. C. 2000. **Plantas medicinais de uso na Amazônia**. 2° ed. São Paulo: Grafimagem. 90 p.

MATOS, F. J. A. **Plantas Mediciniais**: Guia de seleção e emprego de plantas usadas em fitoterapia no nordeste do Brasil. 2. ed. Fortaleza: IU, 2000. p. 253-255.

REVILLA, J. **Plantas da Amazônia**: oportunidades econômicas e sustentáveis. Manaus: SEBRAE - INPA, 2000. p. 307-310.

WILSON, E. O. Caste and division of labor in leaf-cutter ants (Hymenoptera, Formicidae: *Atta*). I: the overall pattern in *A. sexdens*. Behavioral Ecology and Sociobiology, v. 7, p. 143-156, 1980.

ZANETTI, R.; VILELA, E. F.; ZANUNCIO, J. C.; LEITE, H. G.; FREITAS, G. D. Influência da espécie cultivada e da vegetação nativa circundante na densidade de saúveiros em eucaliptais. Pesquisa Agropecária Brasileira, v.35, p.1911-1918, 2000b.

ZANETTI, R.; ZANUNCIO, J. C.; VILELA, E. F.; LEITE, H. G.; JAFFÉ, K.; OLIVEIRA, A. C. Level of economic damage for leaf-cutting ants (Hymenoptera: Formicidae) in Eucalyptus plantations in Brazil. Sociobiology, v. 42, p. 433-444, 2003.

Domingos Gallo(in memoriam) et al. **Entomologia Agrícola**. 10. ed. São Paulo: Piracicaba: Fealq, 2002. 920 p.

SOBRE O ORGANIZADOR

FRANCISCO ODÉCIO SALES - Bacharel em Matemática pela Universidade Federal do Ceará (2008) onde foi monitor de Cálculo Diferencial e Integral (2005) e bolsista de Iniciação Científica (PIBIC) financiado pelo CNPq (2005-2008) desenvolvendo pesquisa na área de Geometria Diferencial, com ênfase em Superfícies Mínimas e Equações Diferenciais Aplicadas. Licenciado Pleno em Matemática pela Universidade Estadual do Ceará (2009). Especialista em Ensino de Matemática pela Universidade Estadual do Ceará (2015). Mestre em Matemática pela Universidade Estadual do Ceará (2019). Especialista em Docência na Educação Profissional, Científica e tecnológica pelo Instituto Federal do Ceará (2020). Foi professor da rede pública estadual do Ceará entre 2009 e 2019, atuando no magistério do ensino fundamental e médio. Atuou entre 2013 e 2016 como Assessor Pedagógico na Secretaria de Educação do Ceará (SEDUC/CE) onde coordenou projetos relacionados a educação Financeira, Educação Fiscal, Educação Científica e Formação de Professores. Representou o Ceará nas reuniões iniciais para implementação da Base Nacional Comum Curricular (BNCC) na área de Matemática. Professor tutor da Universidade Aberta do Brasil (UAB/IFCE) desde de 2010 atuando na Licenciatura Plena em Matemática. Atualmente é Professor de Educação Básica, técnica e tecnológica (EBTT) do Instituto Federal do Ceará (IFCE) atuando nas licenciaturas em Matemática e Física. Tem experiência na área de Matemática, com ênfase em Geometria Diferencial. Coordena o Polo Olímpico de Treinamento Intensivo (POTI) de Crateús e o Projeto de Intervenção em Matemática (PIM). Atua nas seguintes frentes de pesquisa: Superfícies Mínimas, Geometria não euclidiana, Olimpíadas de Matemática e Equações Diferenciais Aplicadas. É membro do Laboratório de Ensino de Ciências Naturais, Matemática e Música (IFCE Campus Crateús), do Grupo de Pesquisa em Matemática e Educação Matemática do IFCE e Professor Coordenador do Grupo de Pesquisa e Estudos em Ensino de Matemática do Ceará - GEPEMAC (em reconhecimento pelo CNPq). Orientador de Graduação e pós graduação (Monografia e TCC). Membro do corpo editorial das editoras Atena, DINCE e InVivo e da Revista Clube dos Matemáticos. Autor de livros na área de Matemática e Educação.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Arsénico 11, 13, 15, 16, 21, 22

Aspergillus niger 1, 2, 5, 12, 13

B

Biomasa 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61

C

Calidad del agua 14, 15, 16, 17, 18, 22, 24

Controle alternativo 65

D

Densidad 28, 33, 38, 40, 41, 42, 43, 44, 47, 48, 49, 50, 53, 54, 55, 59

Desertification 52, 53, 63

Diseño 25, 26, 27, 28, 29, 35, 36, 37, 39, 46

Dureza 14, 15, 16, 18, 19, 23, 24

E

Ecohydrology 53, 62

Efecto fotoacústico 38, 39, 49, 50

G

Grosor 38, 40, 42, 43, 45, 46, 47, 48, 49

H

Hoja metálica 38

I

Insetos pragas 65

L

Láser rojo 38

Ley de Hook 38

M

Mercurio 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15

Molino 25, 26, 27, 28, 29, 30, 32, 36

P

Pet 25, 26, 27, 28, 30, 32, 36

Plomo 13, 15, 16, 21, 22

R

Remoción 1, 2, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11

S

SDT 14, 15, 20, 23

Simulación 25, 26, 27, 36, 38, 44, 46, 56

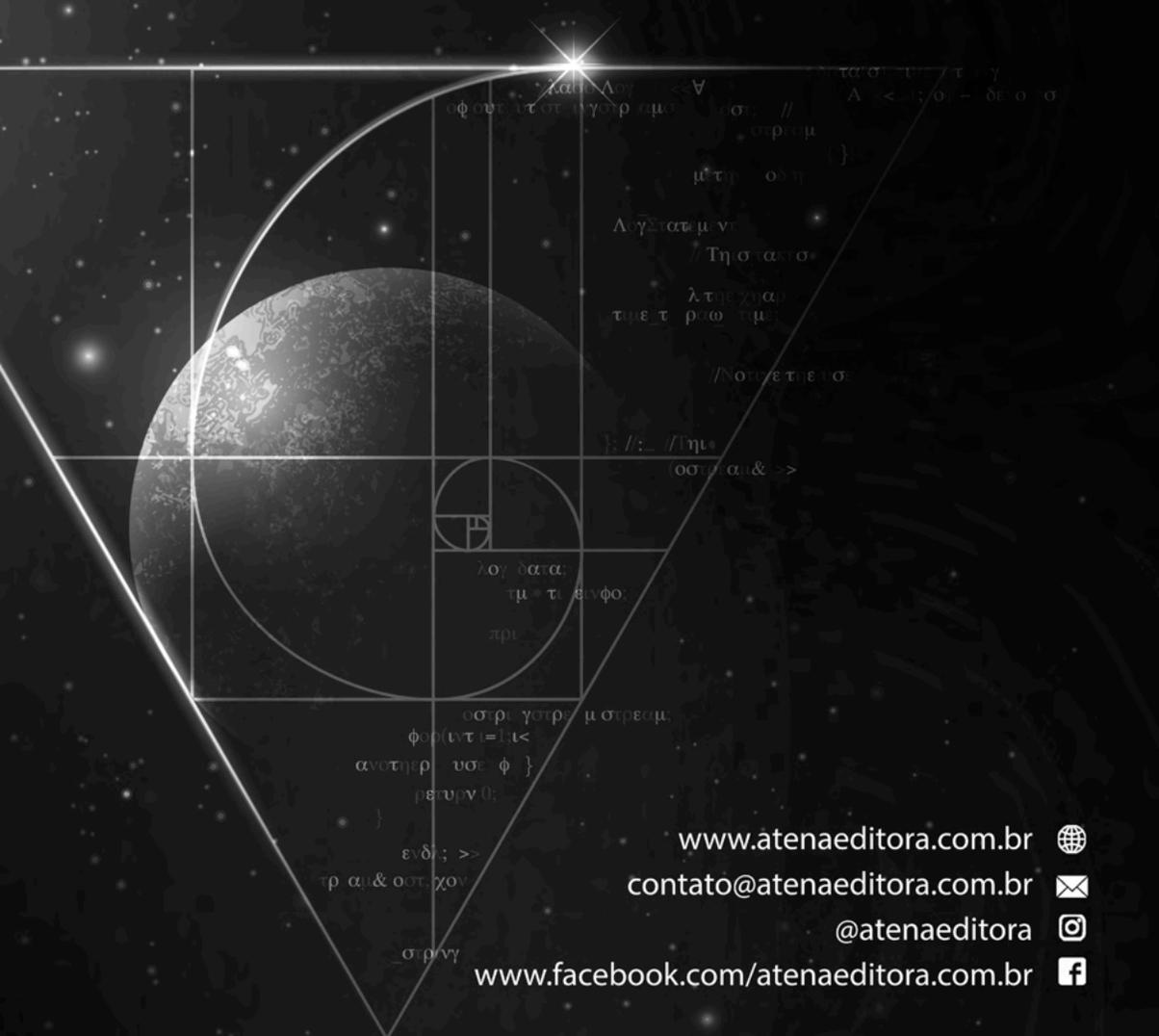
Solidworks 26

V

Vegetation-patterns 53

CIENCIAS EXACTAS Y DE LA TIERRA:

Observación, formulación y predicción



www.atenaeditora.com.br 

contato@atenaeditora.com.br 

[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora) 

www.facebook.com/atenaeditora.com.br 

