

MUTIS

REVISTA DIGITAL DE LA FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA



MUTIS, Journal of the Faculty of Sciences and Engineering, Jorge Tadeo Lozano University, is licensed under the Creative Commons 4.0: Attribution - Noncommercial - No Derivative Works



UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA

MUTIS

Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano
Dirección de Publicaciones
Carrera 4 N° 23-76 Módulo 29
Piso 2, Bogotá D. C., Colombia
Tel: (571) 242 7030 Exts. 1880-3131

ISSN: 2256-1498

Rectora
CECILIA MARÍA VÉLEZ WHITE

Vicerrectora Académica
MARGARITA MARÍA PEÑA BORRERO

Vicerrectora Administrativa
NOHEMY ARIAS OTERO

Director de Investigación, Creación y Extensión
LEONARDO PINEDA SERNA

Decano de la Facultad de Ciencias Naturales
e Ingeniería
ISAAC DYNER REZONZEW

Director de Publicaciones
JAIME MELO CASTIBLANCO

Coordinador Editorial
HENRY COLMENARES MELGAREJO

Revisión de textos
HENRY COLMENARES MELGAREJO

Concepto gráfico diseño y diagramación
LUIS CARLOS CELIS CALDERÓN

Portada: *Cattleya trianae* (Orchidaceae). Fuente:
JAVIER HERNÁNDEZ



MUTIS, Journal of the Faculty of Sciences and Engineering, Jorge Tadeo Lozano University, is licensed under the Creative Commons 4.0: Attribution - Noncommercial - No Derivative Works

Mutis es una publicación semestral de ciencia e investigación de la Universidad Jorge Tadeo Lozano. Los artículos publicados son responsabilidad de sus autores y no comprometen la posición editorial de *Mutis*.

Editores
JAVIER HERNÁNDEZ FERNÁNDEZ
Ciencias Naturales
ALIS YOVANA PATAQUIVA MATEUS
Ingeniería

Comité Editorial
ISAAC DYNER REZONZEW
Universidad Jorge Tadeo Lozano
MICHAEL J. AHRENS
Universidad Jorge Tadeo Lozano
LEONARDO MARIÑO RAMÍREZ
NCBI - National Center for Biotechnology Information,
Bethesda MD, EE. UU.
MYRON SPECTOR
Harvard University, EE. UU.

Comité Científico
MÓNICA PUYANA HEGEDUS
Universidad Jorge Tadeo Lozano
ANDRÉS FELIPE SUÁREZ ESCOBAR
Universidad Jorge Tadeo Lozano
JOSÉ HERNEY RAMÍREZ
Universidad Nacional de Colombia
ALBA GRACIELA ÁVILA
Universidad de los Andes
ANDRÉS FELIPE LÓPEZ
Universidad Libre
SILVIO ALEJANDRO LÓPEZ PASOS
Colegio Mayor de Cundinamarca

CONTENIDO

Vol. 5 Nº 1, enero-junio 2015

Editorial

Café editorial “Ciencia y Mujer”

Alis Pataquiva-Mateus

Editora revista *Mutis*

4

ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN – RESEARCH ARTICLES

Estudios morfoanatómicos en *Cattleya trianae* (Orchidaceae). I. Etapas tempranas del desarrollo del fruto

Morphoanatomic studies of *Cattleya trianae* (Orchidaceae). I. Early stages of fruit development

Miguel Ángel Gamboa Gaitán

6

Presencia de bacterias asociadas a nieve marina en arrecifes influenciados por escorrentía continental del Caribe colombiano: primer acercamiento

Bacteria associated with snow reef marina influenced by Colombian Caribbean continental Runoff: first approach

Hernán Alejandro Henao-Castro, Elvira M. Alvarado Ch., Laura C. Rodríguez y Johanna Santamaría

14

Evaluación de un sistema de filtros de cascarilla de arroz y *Luffa cylindrica* para el tratamiento de aguas lluvias

Evaluation of filtration system of rice husk and *Luffa cylindrica* for the treatment of harvested rainwater

Andrés Suárez, Paola Mesa, Víctor Bravo y Andrés Prieto

21

Análisis preliminar de la estructura primaria y secundaria del ARNt^{Trp} en tortugas marinas

ARNt^{Trp} primary and secondary structure of sea turtle: first approach

Harvey Infante-Rojas y Javier Hernández-Fernández

28

Estabilidad de procesamiento de polímeros: índice de degradación en proceso

Stability of polymer processing: index of degradation in process

Andrés Felipe Rojas González y Laura María Aranzazu Ríos

37

ARTÍCULO DE REVISIÓN – REVIEW ARTICLE

Diseño de un sistema alternativo para el tratamiento de aguas residuales urbanas por medio de la técnica de lombrifiltros utilizando la especie *Eisenia foetida*

Design of an alternative system for the treatment of urban waste water by means of the technique of earthworm filters using the *Eisenia foetida* specie

Jacipt Alexander Ramón, José Alejandro León y Nelson Castillo

46

COMUNICACIONES CORTAS – SHORTS COMMUNICATIONS

Diseño de sistemas de energía solar fotovoltaica para usuarios residenciales en Chía, Cundinamarca

Design of photovoltaic solar energy systems for residential users in Chía, Cundinamarca

Ana Katherine Rodríguez Manrique, Ángela Inés Cadena Monroy y Andrés Julián Aristizábal Cardona

55

Modelo y simulación de una intersección vial usando el software Arena®

Model and simulation of a road intersection using the software Arena®

Sebastian Puerto Hernández, Sergio Forero Forero, Eliasib Rivera Aya y Jorge Herrera Cuartas

66

Instrucciones para autores

74

Comité evaluador

77

EDITORIAL

Café editorial “Ciencia y Mujer”

El jueves 30 de abril de 2015 en el marco de la versión 28 de la Feria Internacional del Libro de Bogotá, siete investigadoras se reunieron alrededor del tema Ciencia y Mujer en el estand de la Universidad Jorge Tadeo Lozano.

La mesa estuvo compuesta por Ángela Camacho (Física, Universidad de los Andes), Susana Fiorentino (Inmunología, Universidad Javeriana), Alba Ávila (Nanotecnología, Universidad de los Andes), Yineth Piñeros (Ingeniería Química, UTadeo), Liliana Obregón (Derecho, Universidad de los Andes), Sandra Patricia Barragán (Matemáticas, UTadeo) y Alis Pataquiva (Ingeniería Química, UTadeo) como moderadora del café editorial y editora de la revista *Mutis*.

Hasta nuestro último número (Vol. 4 N° 2), un 44 % de los artículos científicos publicados han tenido contribución femenina, cubriendo temas de las Ciencias Naturales y de las Ingenierías. Sin embargo, esta cifra, bastante alentadora en lo que a equidad de género se refiere, no es reflejo nacional o incluso internacional sobre el tema.

Como lo comentó la Dra. Camacho, Coordinadora de la Red Nacional de Mujeres Científicas, un ejercicio realizado en varias universidades estadounidenses demostró que aun estando en igualdad de condiciones académicas, los empleadores hicieron prelación del hombre sobre la mujer ofreciendo además a estas un salario sustancialmente menor solo por la condición de género.

Son tres los puntos claves que apuntó la Dra. Ávila en cuanto al tema de ciencia y mujer: (1) visibilidad, según el Observatorio de Ciencia y Tecnología (datos 2003-2012) los investigadores activos hombres suman 4230 mientras que las investigadoras activas son tan solo 3300, siendo líderes de grupos de investigación 2800 hombres y 1300 mujeres; (2) incapacidad de reconocer y retener talento femenino, que impide la continuidad del trabajo de la mujer en el campo de la ciencia afectado por otros planos como el familiar principalmente, reflejado en condiciones desiguales que implican salarios, pensiones y beneficios diferenciales; y (3) dilema ciencia y familia, que lleva a muchas mujeres a tener que decidir entre ambos sin contar con la posibilidad de realizar una distribución de su tiempo para conseguir su realización, sin que un aspecto implique la anulación del otro. Finalmente, la Dra. Ávila advierte que la toma de conciencia se debe realizar con niños y jóvenes de todos los géneros para iniciar un proceso de cambio, por lo que destaca la iniciativa en este sentido de *Girls in Tech* a nivel internacional.

Por otro lado, la Dra. Fiorentino recalcó que las diferencias de género sí existen, lo que no implica que se justifique que el mismo trabajo llevado a cabo por hombres y mujeres contenga una desigualdad salarial. Sin embargo, se deben reconocer y aceptar estas diferencias de género como complementarias y no excluyentes dentro del ámbito social y científico ya que la ciencia está hecha por los dos géneros.

El desempeño de los jóvenes colombianos en ciencias no ha sido el mejor y puede verificarse al revisar los resultados de los exámenes Pisa (OECD) o SERCE (Unesco) en los últimos años, se percibe que la problemática viene desde los primeros años de educación, aclara la Dra. (c) Barragán. A partir del módulo de estadística del SNIES, se

conoce que el número de hombres que entran a un programa doctoral nacional en matemáticas es mucho mayor que el de mujeres, no encontrándose reportes de grados de estas últimas en esta área, haciéndose evidente el rezago de género.

La Dra. Obregón resalta que, aunque bien se han duplicado las cifras de la participación femenina en todas las áreas, todavía es mucho el trabajo por realizar en este tema. Además, comenta que la situación no es diferente en otras latitudes debido a que ningún país tiene un modelo en el que se realice una verdadera equidad de género sin caer en casos de participación femenina solo por cumplir con la cuota de mujeres, sin tomar en cuenta sus capacidades y logros.

Es una necesidad urgente que en Colombia se realicen investigaciones acerca de la participación de la mujer en la ciencia, una vez que el Observatorio del SNIES no tiene datos específicos que permitan visualizar y hacer reconocimiento de la mujer en diferentes áreas de trabajo; para así mismo tomar medidas en la educación primaria y realizar seguimientos al tema de equidad de género. Colombia es un país con 50 años de guerra interna que ha permeado sus impactos en las mujeres y su participación en la ciencia además de otras áreas, finaliza la Dra. Ávila.

“Es más fácil construir en equipo” señala la Dra. Piñeros, haciendo referencia a que las diferencias complementan y fortalecen cualquier equipo de trabajo y rompiendo desde temprana edad con esos paradigmas que persisten hasta la adultez. Son esas competencias de hombres y mujeres que hacen enriquecedor un trabajo conjunto y que además, debe ser modelo en todos los niveles de educación, lo que significa un mayor grado de compromiso entre los educadores, maestros y profesores.

Finalmente, la Dra. Camacho invitó a las actividades que se realizarán en agosto de 2015 sobre el tema de “Ciencia, mujer y emprendimiento”, donde se espera enfatizar en el tema de equidad de género en maestros de primaria que influyen de manera decisiva en el comportamiento social futuro.

La conclusión de este conversatorio se puede dividir en la necesidad de acción en varias líneas tales como redefinir las estrategias de enseñanza para niños y niñas, empoderamiento de jóvenes y el reconocimiento de mujeres científicas; además de formular y realizar proyectos de investigación que se vuelquen a la recopilación de la situación de género en cifras reales actuales. Por lo tanto, se espera que este tipo de iniciativas en búsqueda de igualdad de oportunidades para todos tengan eco en diferentes instancias a nivel gubernamental y académico.

Alis Pataquiva Mateus

Editora en Ingeniería

Revise este café editorial en: <https://www.youtube.com/watch?v=7NO23moRYxk>

Estudios morfoanatómicos en *Cattleya trianae* (Orchidaceae). I. Etapas tempranas del desarrollo del fruto

Miguel Ángel Gamboa-Gaitán

Laboratorio de Biología Tropical, Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia, Carrera 30 N° 45-03 Bogotá, D. C.

Autor para correspondencia: magamboaga@unal.edu.co.

Resumen

La flor nacional de Colombia, *Cattleya trianae*, es un emblemático ejemplo de las orquídeas ornamentales de importancia económica. Si bien algunos estudios se han realizado en aspectos como reproducción y ecología, no hay estudios morfoanatómicos registrados para esta especie, por lo que con el presente manuscrito se pretende iniciar una serie de publicaciones que aporten información en este campo acerca de una especie particularmente atractiva por ser un símbolo nacional. Este estudio se centra en la anatomía del ovario y en los cambios que experimenta en los siguientes días a la polinización. El ovario muestra dos cavidades longitudinales, una para atraer al polinizador y otra para contener los óvulos que serán semillas tras la fertilización. Varios cambios anatómicos como la acumulación de un material de depósito que taponan el acceso a los óvulos y la formación de haces vasculares, son notables en los primeros días luego de la polinización en esta especie. La importancia de dichos cambios así como el uso de la anatomía para el estudio de la historia natural de las especies se discute aquí, ya que hay posiciones contradictorias al respecto.

Palabras clave: anatomía vegetal, desarrollo del fruto, ovario.

Editor: Hernández-Fernández J.

Citation: Gamboa-Gaitán MA. (2015). Estudios morfoanatómicos en *Cattleya trianae* (Orchidaceae). I. Etapas tempranas del desarrollo del fruto. *Revista Mutis* 5(1); pag 6-13.

Received: April 4, 2015; **Accepted:** May 23, 2015; **Published on line:** June 30, 2015.

Copyright: ©2015 Gamboa. This is an open-access article, which permits unrestricted use, distributions and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Competing Interests: The authors have no conflict of interest.

Morphoanatomic studies of *Cattleya trianae* (Orchidaceae). I. Early stages of fruit development

Abstract

Cattleya trianae is the most emblematic plant species of Colombia. Surprisingly, very few studies have been performed in this plant and many aspects of its natural history are unknown. This is the first of a series of papers that will cover morphological and anatomical aspects of this plant, in an attempt to better understand the biology of *C. trianae*. In this paper the anatomical changes in ovary following fertilization are shown and discussed by using common anatomical and staining techniques. This ovary shows two cavities, one devoted to attract pollinators and the other one



is used for storing ovules that will become seeds after fertilization. Two notable changes are observed in the ovary of *C. trianae* after pollination: the deposition of a material that blocks the cavity in which seeds develop and the arising and growing of vascular bundles. The significance of these findings are discussed as well as the relative importance of anatomical studies in the natural history of orchids.

Keywords: plant anatomy, fruit development, ovary.

Introducción

Entre las más de 30.000 especies que constituyen la familia *Orchidaceae* (Dressler 1981, Chase *et al.*, 2003), las especies con importancia económica son casi todas ornamentales (Ortiz *et al.*, 1982; Arditti, 1992), siendo la única excepción las especies comestibles del género *Vanilla*. Por su gran valor comercial y su fácil recolección, las poblaciones nativas han sido sujeto de una extracción indiscriminada de individuos que, asociada a la destrucción de sus hábitats naturales, tiene a muchas especies en peligro de extinción (Calderón, 2007). Entre las orquídeas colombianas uno de los principales grupos ornamentales es el género *Cattleya*, el cual representa el típico taxón que se ha visto duramente afectado por la excesiva recolección de plantas silvestres y la destrucción de su hábitat (Arango, 1972; Ospinam 1958; citados por Constantino, 1984). En efecto, de acuerdo con la Oficina de Enlace de la Secretaría Distrital de Ambiente encargada del control del tráfico ilegal de flora silvestre, el género *Cattleya* es uno de los grupos con mayor número de individuos incautados en Bogotá, D. C. (Ordóñez-Blanco, com. personal). El estado actual de este género podría describirse como el de un grupo que presenta una disminución drástica de sus poblaciones naturales y una larga lista de híbridos y variedades ornamentales.

Una forma de contribuir a la preservación de estas especies amenazadas, es estudiar y dilucidar su biología reproductiva, lo cual permitiría desarrollar programas de reproducción y reintroducción de individuos a sus hábitats nativos. Una búsqueda somera en las bases de datos muestra claramente que la mayoría de los estudios reproductivos se concentran en la biología de la polinización en el campo, mientras que los aspectos posteriores a la polinización, tales como el desarrollo del ovario, la fertilización de los óvulos, la viabilidad de las semillas, etc., son mucho más escasos (Gamboa-Gai-

tán, en prep.). Los notables cambios morfoanatómicos que se presentan en el ovario luego de la polinización son un ejemplo de lo importante que son las etapas subsecuentes, pues ellas determinan la cantidad y calidad de semillas formadas, aspectos que tienen incidencia directa en el éxito reproductivo de la planta.

Los estudios anatómicos en orquídeas son pocos y se cree que menos del 0,5 % de las especies han sido estudiadas al nivel de su anatomía vascular (St-Arnaud & Barabé, 1989). Esto no deja de ser curioso, ya que los patrones vasculares, además de ser fundamentales para el correcto desarrollo del fruto, pueden ser usados en la clasificación de las orquídeas, tal como lo ha demostrado Garay (1972). Trabajando con el género *Cypripedium*, St-Arnaud & Barabé (1989) encontraron una impactante variación en la organización de la anatomía vascular de especies con características comunes, resaltando la importancia de estos aspectos anatómicos en la clasificación de las especies, especialmente si se estudian asociados a procesos reproductivos. También en *Cypripedium* (Liu *et al.*, 2012) han hecho estudios sobre la dinámica del fruto en sus primeras etapas, pero más dirigidos a entender la biología reproductiva que la sistemática. Se han realizado estudios anatómicos dirigidos a clarificar aspectos taxonómicos en la tribu *Vanilleae* (Stern & Judd, 2000). Sin embargo, un estudio realizado por Stern & Carlswald (2006) en la subtribu *Oncidiinae*, muestra que el solo estudio de los caracteres anatómicos de partes somáticas no son útiles en taxonomía. En contraposición a este enunciado está la postura de Aybeke *et al.* (2010), quienes realzan la importancia de los estudios anatómicos detallados en la taxonomía de las orquídeas.

En el presente reporte se muestran los cambios anatómicos experimentados por el ovario de la “flor de mayo” (*Cattleya trianae* Linden & Rchb.f.) en las primeras etapas luego de la polinización y se discuten las posibles implicaciones de estos cambios en la historia natural de la planta.

Materiales y métodos

Especie: *Cattleya trianae* es una planta de amplio uso ornamental y junto a otras nueve especies constituye el registro actual para Colombia (Constantino, 1984; Ortíz-Valdivieso, 2010). Esta riqueza, sin embargo, podría verse alterada ya que recientes estudios moleculares cambian la clasificación de las especies de *Cattle-*

ya (Van den Berg, 2014). Por ser nativa de dicho país, poseer los colores usados en los símbolos patrios y estar dedicada al botánico colombiano más famoso (José Jerónimo Triana), es considerada la flor nacional de Colombia y es comúnmente llamada flor de mayo (Díaz-Piedrahita, 2001). En esta especie es común encontrar muchas variedades e híbridos, ya que es una planta muy apreciada por los coleccionistas. Por esta misma razón hay una fuerte presión extractiva de individuos de sus poblaciones nativas (particularmente en Cundinamarca, Huila y Tolima), y aunque numerosos individuos sobreviven en colecciones privadas, puede considerarse una especie amenazada (Calderón, 2007).

Muestreo: se escogieron cinco individuos de una colección privada de *C. trianae* y se autopolinizaron manualmente tres flores en cada planta. Un ovario de cada planta fue recolectado 5, 10 y 20 días luego de

la polinización (DLP). Los ovarios fueron divididos en tres segmentos y se pusieron 24 h en una solución fijadora (CRAFT III) (Curtis, 1986). Luego se lavaron en agua corriente y se deshidrataron en secuencias de n-propanol en los siguientes porcentajes: 50, 70, 80, 90, 95, 100 y 100 % durante períodos de 4-12 h. Se sumergieron en xilol al 100 % dos veces y por último se montaron en bloques de parafina y se realizaron cortes de 6 μm de espesor con un micrótopo de deslizamiento manual. Los cortes se tiñeron con safranina (24 h) y verde rápido durante 15 min, con un paso previo de desparafinación en xilol (15 h) y uno intermedio de limpieza en n-propanol 100 %. Posteriormente se hicieron montajes permanentes en laminillas portaobjetos de vidrio, los cuales se observaron e interpretaron al microscopio óptico marca Leica®.

Resultados

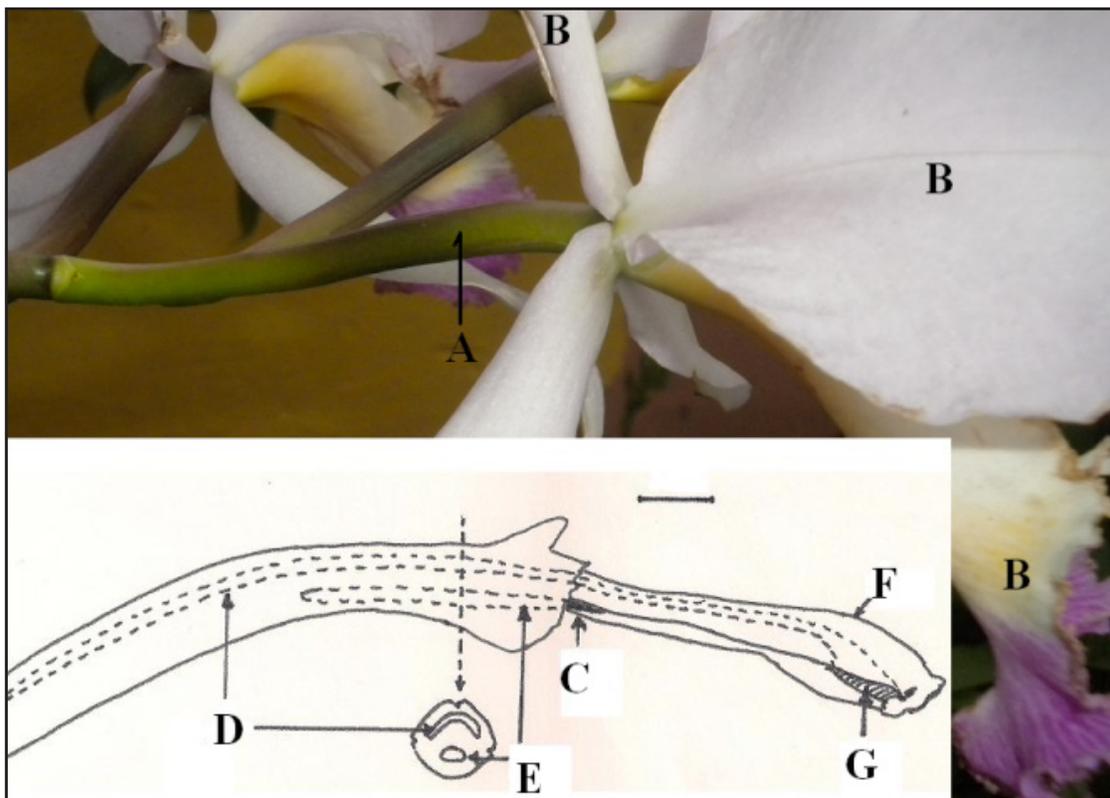


Figura 1. Vista lateral de un ovario no fecundado de *C. trianae*. A) Ovario ínfero, B) tépalos. En el esquema inferior se ha retirado el perianto y se esquematiza parte del interior de las estructuras reproductivas, C) entrada al canal nectarífero, D) canal ovárico, E) canal nectarífero, F) columna, G) estigma.

El análisis anatómico del ovario no fecundado de *C. trianae* (figura 1), muestra en su primer tercio un canal ovárico obliterado, que posee un enmallado en toda su superficie interna. Este enmallado presenta una hebra más gruesa, casi central, que parece constituir una especie de eje. También se aprecia el canal nectarífero, semiovalado, con un amplio lumen que se abre en la base de la columna y penetra el ovario aproximadamente un tercio de su longitud total. Dicho canal está tapizado por un epitelio de células piramidales, posiblemente con función secretora (figura

2B), seguido de dos o tres capas de células aplanadas y de paredes más gruesas que las del tejido circundante. Se aprecian paquetes vasculares dispersos de pequeño tamaño (figuras 2 y 3). A este mismo nivel en un ovario de cinco DLP, existe una disposición igual de haces vasculares pero de mayor tamaño, sin embargo el canal nectarífero conserva su forma y tamaño. En algunos puntos el enmallado del canal ovárico está roto y en otros sitios se ha desprendido de la pared. El perímetro del ovario se torna ligeramente ondulado.

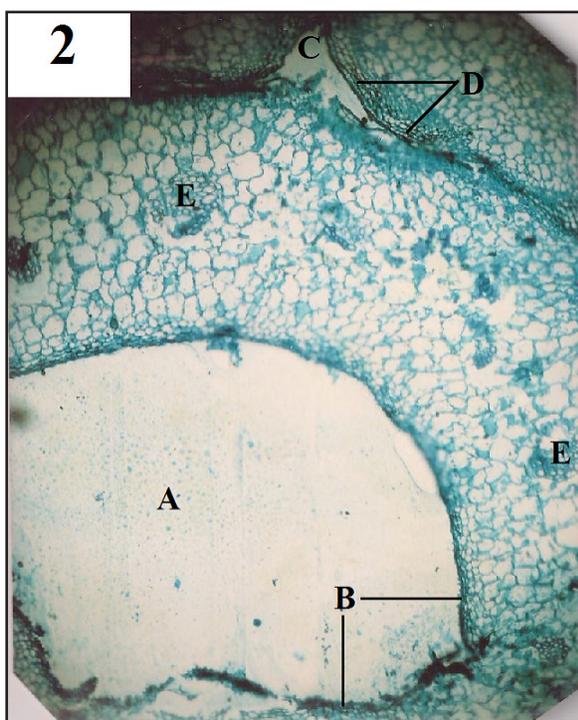


Figura 2. Corte transversal de ovario de *C. trianae* en el tercio distal. A) Canal nectarífero, B) epitelio secretor, C) canal ovárico, D) malla en el lumen del canal ovárico, E) haces vasculares.

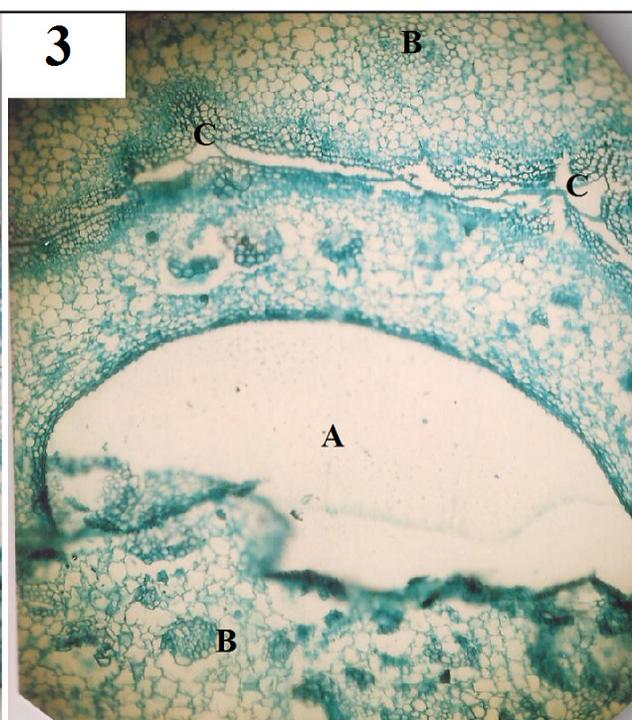


Figura 3. Corte transversal en el tercio distal del ovario de *C. trianae* 5 días luego de la polinización. A) Canal nectarífero, B) haces vasculares, C) enmallado del canal ovárico, obsérvese el desprendimiento.

Tras diez DLP el perímetro presenta ondulaciones amplias y en los lugares por donde se efectuará la dehiscencia del fruto (unión de los carpelos), se observan haces vasculares. Los haces vasculares del estroma se han agrandado y el enmallado del canal ovárico se diferencia poco (figura 4). Luego de 20 DLP se presen-

ta un tapón de naturaleza fibrilar a lo largo del canal ovárico, que abarca desde la columna (figuras 5 y 6) hasta el primer tercio del ovario (figura 7). En esta etapa los haces vasculares son mucho más grandes y el ovario ha duplicado o incluso triplicado su tamaño.

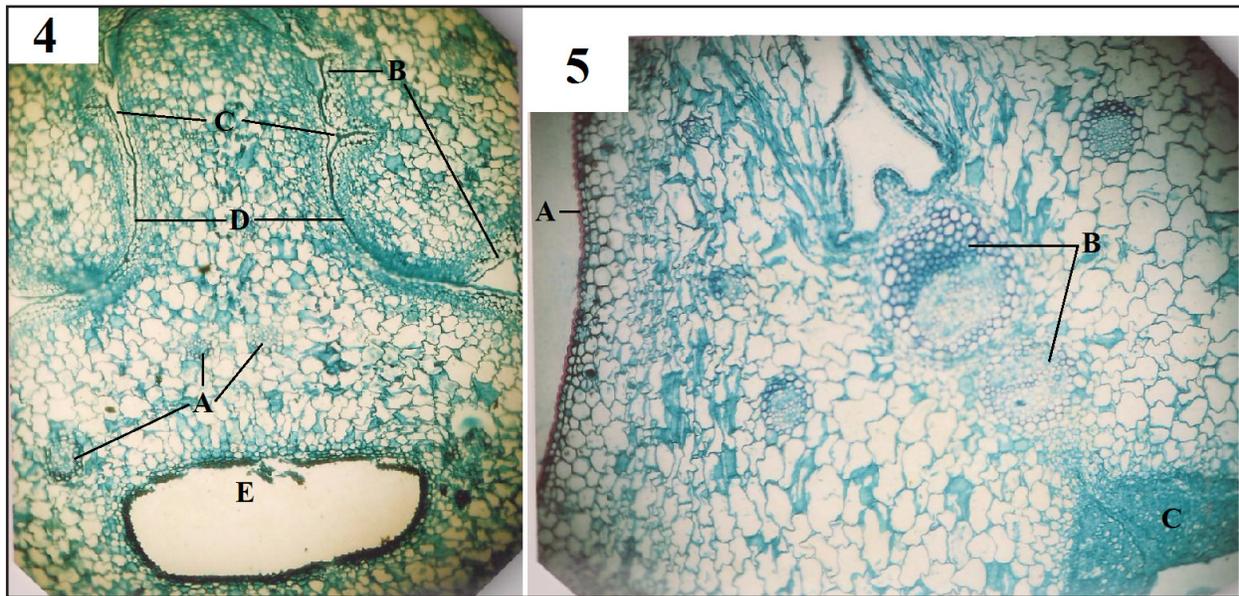


Figura 4. Corte transversal en el tercio distal del ovario de *C. trianae* 10 días luego de la polinización. A) Hazes vasculares, B) malla del canal ovárico que se encuentra completamente obliterado, C) desprendimiento de la pared, D) hebra central, E) canal nectarífero.

Figura 5. Corte transversal en zona de dehiscencia del ovario de *C. trianae* 20 días luego de la polinización. A) Cutícula, B) haz vascular sobre la línea de dehiscencia, C) enmallado cubierto de material de depósito en el canal ovárico.

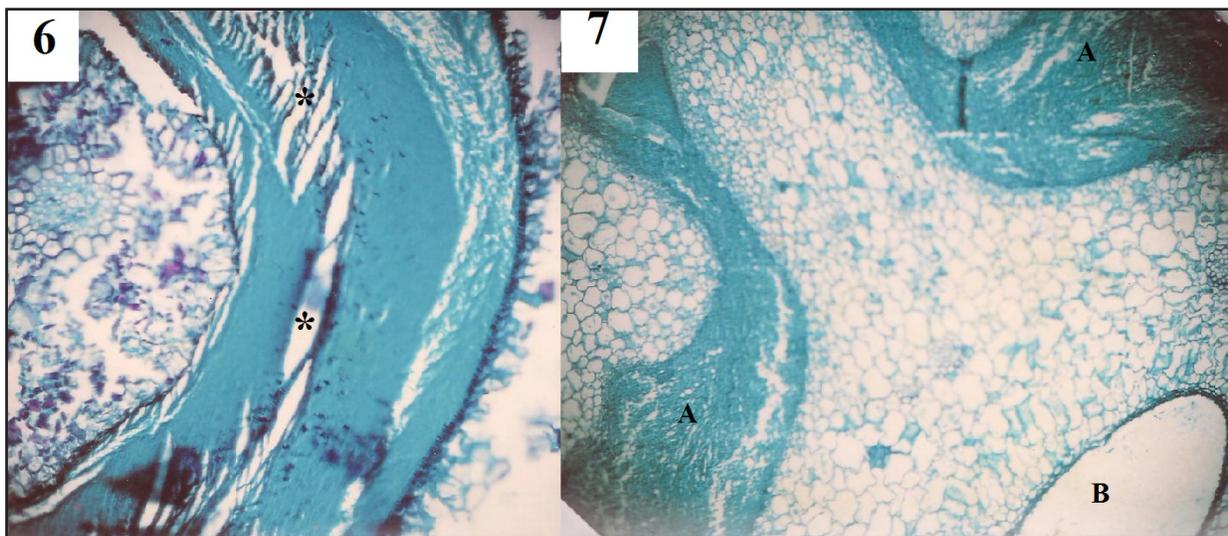


Figura 6. Corte transversal del canal ovárico de *C. trianae* a nivel de columna 20 días luego de la polinización. Se evidencia en detalle el material de depósito que se organiza en torno al enmallado que se encuentra en su interior. Nótese su naturaleza no celular, los espacios en su interior son probablemente artefactos producidos por el desgarro del tejido durante el montaje (*).

Figura 7. Corte transversal del ovario de *C. trianae* 20 días luego de la polinización. A) Canal ovárico completamente lleno de material de depósito, B) canal nectarífero dispuesto basalmente en la flor normal.

En el tercio medio del ovario fecundado se observa un lóculo con pliegues gruesos de los cuales parecen desprenderse unas masas celulares compactas (figura 8), oscuras, con núcleo bien definido y de diversa ubicación en la célula. El parénquima que rodea al lóculo

hace transición con este a través de un tejido circular de células aplanadas, dispuestas en unas 4-8 capas. En los amplios pliegues de la pared del lóculo se depositan cristales.

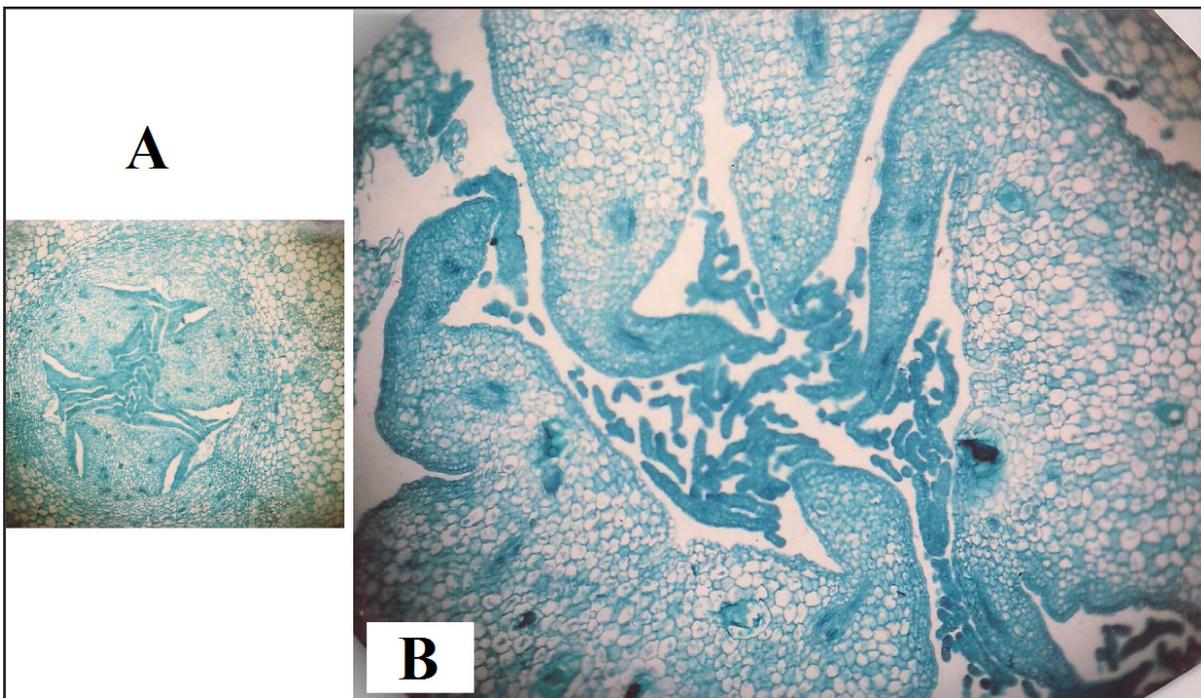


Figura 8. Corte transversal del tercio medio del ovario de *C. trianae* 20 días luego de la polinización. A) Se aprecian acúmulos de naturaleza celular en la luz del lóculo, B) vista aumentada para mostrar los acúmulos que parecen ser semillas en formación. Son notables los pliegues de la pared del lóculo que aumentan la superficie disponible.

Discusión

Notables cambios anatómicos se verifican en el ovario de *C. trianae* poco después de la polinización, e incluyen el aumento del tamaño de los haces vasculares, la formación de haces vasculares sobre los futuros sitios de dehiscencia y el depósito de un material fibroso rellenando la columna y el tercio distal del canal ovárico.

En estado maduro, el fruto de *C. trianae* es una cápsula de aproximadamente 10 cm de longitud por 3,5 cm de ancho, cuya dehiscencia se verifica entre seis y nueve meses luego de la polinización. El tener que conservar un fruto tan grande durante tanto tiempo, implica grandes gastos para el individuo ya que en las orquídeas es necesario realizar una producción masiva de semillas debido a la baja probabilidad de sobrevivencia de las plántulas y la escasez de polinizaciones exitosas (por ejemplo Calvo, 1993).

La producción del tapón que obstruye la entrada al canal ovárico, puede interpretarse como la estrategia usada ante la necesidad de mantener las semillas en formación en un ambiente estéril y a salvo de depredadores y patógenos. La composición de ese material se desconoce, pero es viable pensar que sus componentes básicos sean carbohidratos, sustancias comúnmente usadas por las plantas en estas circunstancias. El compuesto más comúnmente asociado a esta función taponadora es la calosa, un polisacárido común en plantas, que es considerada una defensa polifacética de las plantas (Luna *et al.*, 2011), así que pruebas para la detección de este compuesto deberán ser realizadas en primera instancia en la siguiente fase de este proyecto. Es viable postular que el enmallado presente en los ovarios no polinizados sirve de base estructural para la posterior acumulación del material de relleno.

Los desgarros observados en el enmallado no pueden atribuirse al paso de tubos polínicos, pues fue común observar en varias clases de tejidos estos desprendimientos. Al parecer fue el arrastre de la cuchilla del micrótopo el causante de ellos, por lo que habría que mejorar la calidad de la fijación del material vegetal. Es muy probable que las técnicas aquí empleadas impidan la observación de los tubos polínicos. De haberse originado un tubo por cada semilla formada, cientos de miles de tubos debieron haber sido observados, pues en este género se producen hasta un millón de semillas. Las masas celulares compactas del tercio medio del ovario (figura 8), tienen cierta semejanza con lo reportado por Mayer *et al.* (2011), que ellos atribuyen a la presencia de un embrión con un susensor bien desarrollado.

Se postula, con base en los datos obtenidos, que la polinización en *C. trianae* es seguida por una migración masiva de granos de polen (o sus tubos polínicos) hasta la parte medial del ovario, donde se efectúa la fecundación de los óvulos e inmediatamente después se forma un tapón que impide el acceso al banco de semillas en formación. Dicho tapón se establece sobre el enmallado fibrilar preexistente en el canal ovárico que le sirve de matriz basal. Se observa también un incremento en el número y tamaño de los haces vasculares del fruto, lo cual es compatible con la necesidad de nutrir miles de semillas en formación.

Es necesario continuar la investigación en aspectos como la composición química y el origen del material de depósito, la detección y migración de los núcleos espermáticos desde los granos de polen en el estigma hasta los óvulos y la naturaleza de las interacciones fisiológicas de los tubos polínicos con su entorno ovárico.

Referencias

- Arango, C. (1972). *Cattleyas Colombianas*. VII Conferencia Mundial de Orquideología, Programa Commemorativo.
- Arditti, J. (1992). *Fundamentals of orchid biology*. John Wiley & Sons, Nueva York.
- Aybeke, M., Sezik, E., & Olgun, G. (2010). Vegetative anatomy of *Ophrys*, *Orchis*, and *Dactylorhiza* (Orchidaceae) taxa in Trakya región of Turkey. *Flora* 205: 73-89.
- Calderón, E. (2007). *Libro rojo de plantas de Colombia. Volumen 6, primera parte. Orquídeas*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Bogotá, D. C.
- Calvo, R. N. (1993). Evolutionary Demography of orchids: Intensity and frequency of pollination and the cost of fruiting. *Ecology* 74(4): 1033-1042.
- Chase, M., Freudenstein, J., Cameron, K., & Barrett, R. (2003). DNA data and Orchidaceae systematics: a new phylogenetic classification. En Dixon, K., Kell, S., Barrett, R., & Cribb, P. (Eds.). *Orchid Conservation. Natural History Publications*. (págs. 69-89). Kota Kinabalu, Malasia.
- Constantino, E. (1984). *Las Orquídeas del Género Cattleya en Colombia*. Fundación Herencia Verde, División de Publicaciones, Santiago de Cali.
- Curtis, J. (1986). *Microtecnia Vegetal*. Editorial Trillas, S. A., México D. F.
- Díaz-Piedrahita, S. (2001). La Flor de Mayo, *Cattleya trianae*, flor nacional. *Revista Credencial Historia*, edición 139.
- Dressler, R. L. (1981). *The Orchids: natural history and classification*. Harvard University Press, Cambridge.
- Garay, L. A. (1972). On the Origin of the Orchidaceae, II. *Journal of the Arnold Arboretum* 53: 202-215.
- Liu, F., Tian, M., Wang, C. X., Gong, M. J. & Li, Q. J. (2012) Observation on fruit growth dynamics and embryo development process of *Cypripedium japonicum*. *Journal of Plant Research and Environment* 21: 28-35.
- Luna, E., Pastor, V., Robert, J., Flors, V., Mauch-Mani, B., & Ton, J. (2011). Callose deposition: a multifaceted plant defense response. *Molecular Plant Microbe Interactions* 24(2): 183-93.
- Mayer, J. L. S., Carmello-Guerreiro, S. M., & Apazzato-da-Glória, B. (2011). Anatomical development of the pericarp and seed of *Oncidium flexuosum* Sims (Orchidaceae). *Flora* 206(6): 601-609.
- Ortiz-Valdivieso, P. (2010). *Orquídeas: Especies de Colombia*. Villegas Editores, Bogotá, D. C.

- Ortiz, P., Martínez, & M. A., Misas, G. (1982). *Orquídeas Ornamentales de Colombia*. Carlos Valencia Editores, Santafé de Bogotá.
- Ospina, M. (1958). *Orquídeas Colombianas*. Publicaciones Técnicas Ltda., Santafé de Bogotá.
- ST-Arnaud, M., & Barabé, D. (1989). Comparative analysis of the flower vascularization of some *Cypripedium* species (Orchidaceae). *Lindleyana* 4(3): 146-153.
- Stern, W. L., & Carlswald, B. S. (2006). Comparative vegetative anatomy and systematics of the Oncidiinae (Maxillarieae, Orchidaceae). *Botanical Journal of the Linnean Society* 152(1): 91-107.
- Stern, W. L., & Judd, W. S. (2000). Comparative anatomy and systematics of the orchid tribe Vanilleae excluding *Vanilla*. *Botanical Journal of the Linnean Society* 134(1-2): 179-202.
- Van den Berg, C. (2014). Reaching a compromise between conflicting nuclear and plastid phylogenetic trees: a new classification for the genus *Cattleya* (Epidendreae; Epidendroideae; Orchidaceae). *Phytotaxa*, 186(2):75-86.

Presencia de bacterias asociadas a nieve marina en arrecifes influenciados por escorrentía continental del Caribe colombiano: primer acercamiento

Hernán Alejandro Henao-Castro,¹ Elvira M. Alvarado Ch.,²
Laura C. Rodríguez³ y Johanna Santamaría⁴

¹Investigador independiente. henaocastro.alejandro@gmail.com

²Investigadora independiente. Profesora de cátedra Universidad Jorge Tadeo Lozano. ealvaradochacon@gmail.com

³Estudiante de pregrado de Biología Marina. laurac.rodriguezr@utadeo.edu.co

⁴Profesora titular, Universidad Jorge Tadeo Lozano. johanna.santamaria@utadeo.edu.co

Resumen

Parte del deterioro de los arrecifes de coral se atribuye al efecto del aporte de agua dulce cargada de nutrientes y sedimentos finos. Estas condiciones favorecen la formación de nieve marina lodosa que transporta gran carga de bacterias que pueden ser patógenos de corales. Por lo anterior, se estudió la presencia de bacterias asociadas a nieve marina lodosa en una zona arrecifal del Caribe colombiano en un gradiente de distancia a la desembocadura del canal del Dique (Cartagena). Por medio de técnicas moleculares PCR-DGGE, se registró baja riqueza, con bandas representativas de siete bacterias diferentes. El número de especies varió según el sitio, pero no hubo relación con la cercanía a la fuente de escorrentía. Como estudio pionero, sirve como punto de partida para estudios en arrecifes del Caribe colombiano impactados por escorrentía.

Palabras clave: nieve marina lodosa, arrecifes de coral, escorrentía continental, bacterias asociadas a partículas y agregados, DGGE.

Editor: Hernández- Fernández, J.

Citation: Henao, H., Alvarado, E., Rodríguez, L., Santamaría, J. (2015). Presencia de bacterias asociadas a nieve marina en arrecifes influenciados por escorrentía continental del Caribe colombiano: Primer acercamiento. *Revista Mutis 5(1); pág. 14-20.*

Received: March 2, 2015; **Accepted:** May 20, 2015; **Published on line:** June 30, 2015

Copyright: ©2015 Henao *et al.* This is an open-access article, which permits unrestricted use, distributions and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Competing Interests: The authors have no conflict of interest.

Bacteria associated with muddy marine snow in coral reefs influenced by terrestrial runoff in the Colombian caribbean: first approach.

Abstract

Part of the degradation of coral reefs has been attributed to the effect of freshwater inputs with nutrients and fine-grain sediments. These conditions favor the formation of muddy marine snow which transports great bacterial loads that can be pathogenic to corals. Therefore, the presence of bacteria associated to muddy marine snow in a reef zone of the Colombian Caribbean in a distance gradient to



the mouth of the Dique Channel (Cartagena), was done. Using molecular techniques like PCR-DGGE, low species richness was registered by means of seven phylogroups possibly representing seven different species. The number of species differed according to the site, but no relation with the proximity to source point of run-off was found. As a pioneer study, it serves as a starting point for studies on reefs exposed to run-off.

Keywords: muddy marine snow, coral reefs, terrestrial runoff, particle-attached and aggregates associated bacteria, DGGE.

Introducción

El estudio de los arrecifes de coral en Colombia es relativamente reciente, comprendiendo entre 4 y 5 décadas (Pizarro y Alvarado, 2011). A pesar de la gran importancia de estos ecosistemas a nivel global, regional y local, se sabe que más del 60 % se encuentran en amenaza directa o inmediata (Burke *et al.*, 2011). Actualmente se han identificado un sinnúmero de amenazas naturales y antropogénicas. Las primeras comprenden huracanes, cambio climático, acidificación oceánica y calentamiento global, y las segundas incluyen sobrepesca, contaminación, alteración de condiciones medioambientales y escorrentía continental, entre otras. Esta última es de un gran interés en Colombia ya que es donde se ha reportado una de las mayores tasas de deforestación a nivel mundial, en especial a lo largo de la cuenca del río Magdalena (Restrepo *et al.*, 2006) y, por consiguiente, se presenta la mayor descarga de sedimentos en el mar Caribe (Restrepo y Kjerfve, 2000). El aporte de agua dulce no solo cambia la salinidad, sino también disminuye la transparencia y aumenta la concentración de nutrientes y de partículas en suspensión (Wolanski *et al.*, 2004). Con el cambio de la calidad del agua, se generan respuestas biológicas de los organismos que habitan los ecosistemas costeros, incluyendo los microorganismos. Así, los arrecifes de coral pueden presentar alteraciones como pérdida de biodiversidad, cambios estructurales y proliferación de bacterias patógenas, entre otras, que conllevan a una disminución de la resiliencia arrecifal y un posible colapso del sistema (Fabricius, 2011).

Los arrecifes coralinos se caracterizan por presentar aguas pobres en nutrientes (Stoddar, 1969) pero con

una gran variedad de materia suspendida como material calcáreo, partículas detríticas orgánicas y *mucus* secretado por el plancton, algas, bacterias, e incluso el mismo *mucus* de los corales (Fabricius y Wolanski, 2000). Estas partículas en suspensión se agregan rápidamente por floculación así como por uniones químicas entre los exopolímeros. Estos agregados se asemejan a copos de nieve y son llamados nieve marina (Wolanski *et al.*, 2003). La nieve marina se considera vital para procesos de remineralización de nutrientes y actualmente es fundamental en el secuestro de carbono hacia las profundidades oceánicas, siendo relevante en temáticas de cambio climático y calentamiento global (Alldredge y Silver, 1988). Se encuentra tanto en aguas continentales (nieve de río y lagos) como en las zonas estuarinas, las costeras y las oceánicas. Debido a su gran abundancia en mares templados, ha sido ampliamente estudiada en estos ambientes donde se registran agregados que van de centímetros a metros de diámetro en diferentes estratos de profundidad (Alldredge *et al.*, 1986). A pesar de su presencia cosmopolita y de su evidente importancia, es poco lo que se sabe de este compuesto en ambientes arrecifales, a tal punto, que la mayoría de los estudios existentes se han realizado en la Gran Barrera de Coral australiana (Wolanski *et al.*, 2003).

Si bien la nieve marina es vital en la dinámica de los ecosistemas marinos, a medida que se alteran las condiciones ambientales como temperatura, salinidad, concentraciones de nutrientes y material particulado en suspensión (p. ej. sedimentos finos), generalmente a través de escorrentía continental, este compuesto se transforma en nieve marina lodosa (Wolanski *et al.*, 2003) y puede tener efectos negativos como ahogamiento, abrasión y proliferación de organismos patógenos, letales para el sostenimiento de arrecifes coralinos. Estos efectos perturban el desarrollo y sobrevivencia de organismos arrecifales de la comunidad planctónica y bentónica, poniendo en riesgo la salud de los arrecifes coralinos (Fabricius y Wolanski, 2000). Existen referentes de diversidad bacteriana en la columna de agua de arrecifes "prístinos" e impactados antropogénicamente (Dinsdale *et al.*, 2008), que reflejan diferencias en la estructura y composición de las comunidades. En atolones del Pacífico Central, los arrecifes intervenidos antropogénicamente presentan hasta 10 veces más células microbianas y partículas semejantes a virus, que aquellas zonas no influenciadas por actividades humanas.

Esta mayor abundancia es acompañada de una mayor fracción de bacterias heterótrofas, dominadas por un gran porcentaje de patógenos, lo cual está asociado a arrecifes con menor cobertura coralina y mayor incidencia de enfermedades en corales escleractinios (Dinsdale *et al.*, 2008). Estudios experimentales han comprobado que la nieve marina enriquecida con nutrientes y lodos es más pegajosa, lo que dificulta su remoción en organismos filtradores (zooplancton) y sésiles (corales), resultando en mortalidad por ahogamiento (Fabricius y Wolanski, 2000). Asimismo, se ha determinado que este compuesto presenta mayor impacto en reclutas de corales duros, lo que implica afectaciones negativas en procesos de repoblamiento natural coralino (Fabricius *et al.*, 2003).

En Colombia se conoce muy poco sobre la nieve marina. Solo se menciona dentro de estudios oceanográficos biológicos como componente importante del plancton, especialmente en el Pacífico (Betancur y Martínez, 2003; Giraldo *et al.*, 2011). Aún más, no se ha estudiado en arrecifes coralinos ni se conocen las implicaciones de esta sobre los corales, especialmente en ambientes influenciados por escorrentía continental. Hasta la fecha, estudios como los de Bernal *et al.* (2006), Restrepo y Alvarado (2011) y Henao-Castro (2013), infieren que la nieve marina, especialmente la de tipo lodoso, podría estar presente y contribuyendo notablemente en el deterioro y degradación de arrecifes coralinos del Caribe colombiano, por lo cual recomiendan investigaciones en arrecifes degradados e influenciados por aportes continentales. Solo un estudio ha demostrado que existe una alta densidad de microorganismos heterótrofos asociados a partículas de nieve marina lodosa, principalmente cuando esta se encuentra en zonas con mayor influencia de escorrentía continental (Henao-Castro *et al.*, 2015).

Los arrecifes del Archipiélago de Nuestra Señora del Rosario han exhibido un evidente deterioro en las últimas cuatro décadas, caracterizado por disminución de cobertura de corales e incremento de cobertura algal (Restrepo y Alvarado, 2011), así como un aumento en la incidencia de enfermedades coralinas (Navas-Camacho *et al.*, 2010). Estos cambios se han atribuido a distintas fuentes de disturbio como calentamiento global, sobrepesca y especialmente a la escorrentía continental proveniente del canal del Dique (Alvarado y Corchuelo, 1992; Restre-

po y Alvarado, 2011). Un estudio reciente en el Parque Nacional Natural Corales del Rosario y San Bernardo (Henao-Castro, 2013) registró aguas con alta concentración de nutrientes (nitratos y amonio > 27 μM) y sedimentos de tipo lodoso (20,6 % de la tasa de sedimentación total). Es posible, entonces, que la escorrentía continental en esta zona pueda estar promoviendo la formación de nieve marina lodosa con abundancia y diversidad de microorganismos, incluyendo patógenos para los corales. Por lo anterior, en esta investigación se realizaron los primeros acercamientos al estudio de la presencia de bacterias asociadas a nieve marina lodosa en zonas arrecifales de un área marina protegida del Caribe colombiano. Asimismo, se pretendió determinar diferencias en la riqueza de bacterias (asociadas a la nieve marina lodosa) a partir de un gradiente de distancia a la desembocadura del canal del Dique desde la bahía de Barbacoas.

Métodos

Para estudiar la riqueza de bacterias asociada a nieve marina se tomaron tres muestras ($\geq 1 \text{ cm}^3$) de flóculos presentes en la columna de agua entre los 8 y 10 m de profundidad en 6 sitios arrecifales del Archipiélago de Nuestra Señora del Rosario en un gradiente desde Isla Arena (cercano a la fuente de escorrentía) hasta Isla Tesoro (distante de la fuente). Cada muestra ($N= 18$) se extrajo con jeringa estéril de 50 ml mediante buceo autónomo durante 10 minutos. Por medio de técnicas moleculares (aislamiento de ADN total, reacción de amplificación en cadena del gen 16S rADN-PCR y gel de electroforesis de gradiente denaturante-DGGE) se obtuvo una imagen con diferentes patrones de bandas por cada sitio. En la reacción de amplificación de esta región se utilizaron los oligonucleótidos universales 341 F-GC (5'-CGC CCG CCG CGC GCG GCG GCG GGG GCG GGG GCA CGG GGG GCC TAC GGG AGG CAG CAG-3') y 907 R 5'-CCG TCA ATT CTT TTG AGT TT-3' que amplifican una región de 566 pb (Ishii and Fukui, 2001). La reacción de amplificación se llevó a cabo en un volumen final de reacción de 50 μL . El programa de gradiente de temperatura empleado para el termociclador marca Labmate fue: 94 °C por 4 minutos, seguido por 10 ciclos de 94 °C por 50 segundos, 59-49 °C de temperatura de alineación por 45 segundos, un minuto de extensión a 72 °C. Después, 18 ciclos de 94 °C por 50 segundos, 49 °C por 45 segundos, 1 minuto a 72 °C y un paso final de extensión a 72 °C por 7 minu-

tos. El análisis de DGGE se llevó a cabo en un sistema Bio Rad Decode. Los productos de amplificación de PCR del gen 16S rADN, con los cuales se analizan las poblaciones de bacterias en las muestras, se corrió en un gel de poliacrilamida del 8 % con un gradiente paralelo del 45 % de urea formamida en la parte superior y de 50 % en la base del gel. Este se corrió por 18 h a 40 V cm⁻¹ a 60 °C en buffer TAE 1X. Para visualizar las bandas de DNA, el gel se tiñó en una solución de bromuro de etidio (0.5 µg/ml). Finalmente se tomó una fotografía de la imagen con el sistema fotodocumentador UVP Gel Doc-ittm 300. Cada banda representa una posible especie de bacteria, con lo que al final se obtuvo la riqueza taxonómica de cada muestra analizada. La extracción de ADN y reamplificación se realizó en los laboratorios de la Universidad Jorge Tadeo Lozano. La técnica de DGGE se llevó a cabo en el laboratorio de Biología Molecular Marina (BIOMMAR) de la Universidad de los Andes.

Resultados Y Discusión

Se detectaron siete filogrupos diferentes de bacterias asociadas a nieve marina lodosa en los arrecifes del Archipiélago de Nuestra Señora del Rosario, que oscilaron entre 1 y 4 por zona arrecifal (figura 1). Aunque no se han encontrado referentes en sistemas arrecifales coralinos, comparaciones en ambientes controlados en laboratorio (16 a 20 especies – Schäfer, 2002), en episodios de proliferación de microalgas en la costa de California durante la primavera cuando hay mayor disponibilidad de nutrientes (10 a 12 especies ☐ Fandino *et al.*, 2001), y estudios en sistemas oceánicos del golfo de Trieste, mar Adriático influenciados por la presencia de ríos (más de 90 taxa – Rath *et al.*, 1998), permiten inferir que el número de filogrupos presentes en los ambientes arrecifales del archipiélago es bajo. Es probable que la baja riqueza sea producto del tamaño de muestra pequeña (1 cm³ por muestra, 3 muestras por sitio). También podría ser causado por el uso de un gradiente o tiempo en el proceso de DGGE inadecuado, aunque para este estudio se utilizaron 13 gradientes con diferentes tiempos de corrido de geles, encontrándose que el gradiente de 45 % de urea formamida en la parte superior y de 50 % en la base del gel que corrió por 18 h a 40 V cm⁻¹ a 60 °C permitió diferenciar las distintas bandas que representan a las especies de bacterias (figura 1). Por último, no se puede descartar que efectivamente la riqueza bacteriana asociada a nieve marina sea

baja *per se* en el área de estudio, y por ausencia de referentes de investigaciones de diversidad bacteriana en nieve marina lodosa en arrecifes coralinos del mundo, no se tenga un referente para comparar o discutir el resultado. No obstante, de un estudio simultáneo en la zona de estudio se sabe que las densidades de bacterias asociadas a este tipo de nieve marina es alta en comparación con las abundancias de aquellas de vida libre e incluso de otras zonas arrecifales y estuarinas del Caribe (Henao-Castro *et al.*, 2015). Así, existe la posibilidad de que haya baja riqueza con alta abundancia de esas pocas especies o filogrupos para el caso concreto del presente estudio.

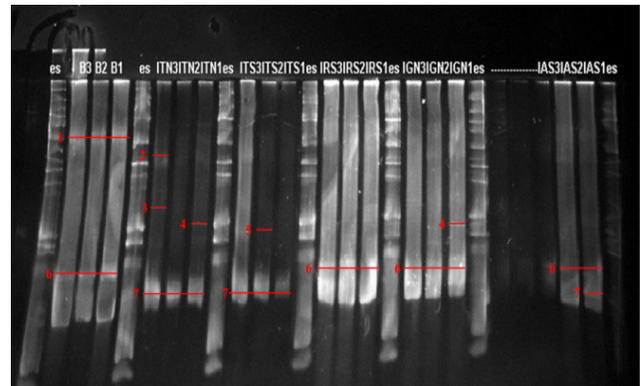


Figura 1. Electroforesis de gel de gradiente denaturante (DGGE) de nieve marina en zonas arrecifales del área marina protegida PNNCRy SB. Las muestras indican los arrecifes en un gradiente de lejanía a la fuente de escorrentía partiendo de la bahía de Barbacoas. En orden de lejanía, las estaciones de muestreo fueron Burbujas (B), Isla Tesoro Norte (ITN), Isla Rosario Sur (IRS), Isla Grande Norte (IGN) e Isla Arena Sur (IAS). En rojo se muestran las bandas que representan un posible filogrupo de los siete identificados.

Por otra parte, contrario a lo esperado, el número de filogrupos de bacterias no fue diferencial según el gradiente por aportes del canal del Dique (figura 2). Los patrones de banda, a partir de la comparación filogenética con la técnica DGGE, mostraron que Isla Tesoro Norte (sitio más distante a los aportes del canal del Dique) presentó la mayor riqueza (S=4), mientras que Isla Rosario Sur, que también está alejado de la escorrentía del afluyente continental, presentó el menor número de filogrupos (S=1). Las demás estaciones exhibieron dos filogrupos. Un patrón similar también se registró en bacterias adheridas a partículas en ambientes marinos estuarinos en el Puerto Victoria, Hong Kong (Zhang *et al.*, 2007) donde no se encontraron diferencias en el número de especies (N= 21 - 24) en tres puntos con condiciones ambientales distintas

como concentración de nutrientes y partículas en suspensión. Sin embargo, aunque la riqueza no mostró un patrón, sí se observan diferencias en los filogrupos presentes ya que algunos solo se presentaron en los sitios más alejados (Sp 1 en Burbujas y sp 2 y 3 en Tesoro Norte) mientras que la Sp 6 se encontró en todos menos en las estaciones de Tesoro (figura 2).

Como estudio preliminar, el registro de bacterias diferentes asociadas a la nieve marina lodosa es un primer paso. Sin embargo, es necesaria la identificación de esas bacterias (filogrupos) a través de técnicas moleculares más avanzadas como pirosecuenciación para comprender el rol que tienen en los arrecifes de coral y si están asociadas a las enfermedades de los corales. Además es necesario cuantificar sus abundancias ya que las dominancias de las especies podrían dar indicios del impacto antropogénico en el sistema arrecifal de una forma diferencial, ya que se sabe que en ambientes intervenidos antropogénicamente, con elevadas concentraciones de nutrientes y sedimentos finos en suspensión, existe mayor número de bacterias heterótrofas (Henao-Castro *et al.*, 2015) dentro de las cuales se podrían encontrar agentes patógenos para los corales (Dinsdale *et al.*, 2008).

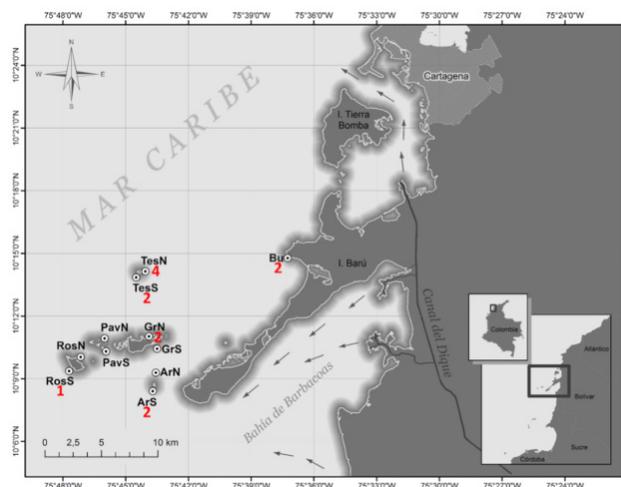


Figura 2. Número de filogrupos (color rojo) de bacterias asociadas a nieve marina lodosa en un gradiente espacial en zonas arrecifales del Archipiélago de Nuestra Señora del Rosario. Isla Arena Sur (ArS), Isla Arena Norte (ArN), Isla Grande Sur (GrS), Isla Grande Norte (GrN), Isla Pavitos Sur (PavS), Isla Pavitos Norte (PavN), Isla Rosario Norte (RosN), Isla Rosario Sur (RosS), Isla Tesoro Sur (TesS), Isla Tesoro Norte (TesN), Burbujas (Bu).

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano por la financiación del proyecto de convocatoria interna N° 8, 2011 “Nieve marina: biodiversidad de microorganismos en los arrecifes de coral del Archipiélago Nuestra Señora del Rosario, Área Marina Protegida”. Al Capitán de Corbeta Carlos Andrés Martínez, a Esteban Zarza, Diego Duque y Ameth Vargas del Parque Nacional Natural Corales del Rosario y San Bernardo por el apoyo logístico y acompañamiento en la salida de campo para la colecta de muestras. Especial agradecimiento a Liliana López por su ayuda en los procesos de extracción y amplificación de ADN, así como en el protocolo de estandarización del DGGE. Al profesor Juan Armando Sánchez de la Universidad de los Andes por facilitar la infraestructura y reactivos del laboratorio BIOMMAR y a Mauricio Buitrago, de la misma Universidad por su asesoría y acompañamiento en el protocolo de DGGE. Finalmente, al profesor Javier Hernández de la Universidad Jorge Tadeo Lozano por facilitar la toma de imágenes con el fotodocumentador del laboratorio de Biología Molecular.

Bibliografía

- Acinas, S. G., Antón, J., & Rodríguez-Valera, F. (1999). Diversity of Free-Living and Attached Bacteria in Offshore Western Mediterranean Waters as Depicted by Analysis of Genes Encoding 16S Rrna. *Appl. Environ. Microbiol.* 65: 2514-522.
- Allredge, A. L., Cole, J. J., & Caron, D. A. (1986). Production of heterotrophic bacteria inhabiting macroscopic organic aggregates (marine snow) from surface waters. *Limnol. Oceanogr.* 31: 68-78.
- Allredge, A. L. & Silver, M. W. (1988). Characteristics, dynamics and significance of marine snow. *Prog. Oceanogr.* 20: 41-82.
- Alvarado, E. M., & Corchuelo, M. C. (1992). Los nutrientes, la temperatura y la salinidad provenientes del Canal del Dique como factores de deterioro en el Parque Nacional Natural Corales del Rosario. En: VII Seminario Nacional de Ciencias y Tecnologías del Mar. Santa Marta. 277-287 p.
- Bernal, G., A. Velásquez, I. Vargas, A. Agudelo, C. Andrade, J. Domínguez, C. Ricaurte, & G. Mayo. (2006). Variabilidad de los aportes a los sedimen-

- tos superficiales durante un ciclo anual de los bancos de Salmedina. *Bol. Invest. Mar. Cost.* 35: 59-75.
- Betancur, M., & Martínez, I. (2003). Foraminíferos bentónicos recientes en sedimentos de fondo de la cuenca de Panamá (Pacífico colombiano), como indicadores de productividad y oxigenación. *Bol. Invest. Mar. Cost.* 32: 93-123.
- Burke, L., Reyntar, K., Spalding, M., & Perry, A. (2011). Reefs at risk revisited. *World Resources Institute*: Washington, DC. 130 p.
- DeLong, E. F., Franks, D. G., & Alldredge, A. L. (1993). Phylogenetic diversity of aggregate-attached vs. free-living marine bacterial assemblages. *Limnol. Oceanogr.* 38: 924-934.
- Dinsdale, E., Pantos, O., Smriga, S., Edwards, R., & Angly, F. (2008). Microbial ecology of four coral atolls in the Northern Line Islands. *Plos One* 3: 1-17.
- Fabricius, K. (2011). Factors determining the resilience of coral reefs to eutrophication: a review and conceptual model. En: Dubinsky, Z. y N. Stambler. (Eds.). *Coral reefs: an ecosystem in transition*. Springer, 525 p.
- Fabricius, K. E., & Wolanski, E. (2000). Rapid smothering of coral reef organisms by muddy marine snow. *Est. Coast. Shelf Sci.* 50: 115-120.
- Fabricius, K., Wild, C., Wolanski, E., & Abele, D. (2003). Effects of transparent exopolymer particles and muddy terrigenous sediments on the survival of hard coral recruits. *Est. Coast. Shelf Sci.* 56: 1-9.
- Fandino, L. B., Riemann, L., Steward, G. F., Long, R. A., & Azam, F. (2001). Variations in bacterial community structure during a dinoflagellate Bloom analyzed by DGGE and 16S rDNA sequencing. *Aquat. Microb. Ecol.* 23: 119-130.
- Giraldo, A., Valencia, B., & Ramírez, D. (2011). Productividad planctónica y condiciones oceanográficas locales en Isla Gorgona durante julio 2006. *Bol. Invest. Mar. Cost.* 40:185-201.
- Henao-Castro, H. A. (2013). *Efectos de los aportes del canal del dique sobre el reclutamiento de especies de coral en los arrecifes del archipiélago Nuestra Señora del Rosario, área marina protegida*. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Colombia.
- Henao-Castro, H. A., Comba, N., Alvarado, E. M., & Santamaría, J. (2014). Bacterias autótrofas y heterótrofas asociadas a nieve marina lodosa en arrecifes con escorrentía continental. *Univ. Sci.* 20: 9-16. DOI: 10.11144/Javeriana.SC20-1.baha
- Ishii, K., & Fukui, M. (2001) Optimization of annealing temperature to reduce bias caused by a primer mismatch in multitemplate PCR. *Appl. Environ. Microbiol.* 67: 3753-3755 DOI 10.1128/AEM.67.8.3753-375567.
- Kiorboe, T. (2001). Formation and fate of marine snow: small-scale processes with large-scale implications. *Sci. Mar.* 652: 57-71.
- Navas-Camacho, R., Gil-Agudelo, D., Rodríguez-Ramírez, A., Reyes-Nidia, M., & Garzón-Ferreira, J. (2010). Coral diseases and bleaching on Colombian Caribbean coral reefs. *I. J. Trop. Biol.* 58: 95-106.
- Pizarro, V., & Alvarado, E. M. (2011). Cambios que no hemos interiorizado: los arrecifes que aún desconocemos. *Expediitio.* 5: 63-69.
- Rath, J., Wu, K., Herndl, G., & DeLong, E. (1998). High phylogenetic diversity in marine-snow associated bacterial assemblage. *Aquat. Microb. Ecol.* 14: 261-269.
- Restrepo, J., & Alvarado, E. M. (2011). Assessing major environmental issues in the Caribbean and Pacific coasts of Colombia, South America: an overview of fluvial fluxes, coral reef degradation, and mangrove ecosystems impacted by river diversion. En: Wolanski E, McLusky D (Eds.) *Treatise on Estuarine and Coastal Science*. Waltham: Academic Press. DOI: 10.1016/B978-0-12-374711-2.01117-7.
- Restrepo, J. D., & Kjerfve, B. (2000). Magdalena River: interannual variability (1975-1995) and revised water discharge and sediment load estimates. *J. Hydrol.* 235: 137-149.
- Restrepo, J. D., Zapata, P., Díaz, J. M., Garzón-Ferreira, J., & García, C. (2006). Fluvial fluxes into the Caribbean Sea and their impact on coastal eco-

systems: The Magdalena River, Colombia. *Glob. Planet. Change.* 50: 33-49.

Schäfer, H., Abbas, B., Witte, H., & Muyzer, G. (2002). Genetic diversity of "satellite" bacteria present in cultures of marine diatoms. *FEMS Microbiol. Ecol* 42: 25-35.

Stoddart, D. (1969). Ecology and morphology of recent coral reefs. *Biol. Rev. Cambridge Phil. Soc.* 44: 433-498.

Wolanski, E., Richmond, R., McCook, L., & Sweatman, H. (2003). Mud, Marine Snow and Coral Reefs: The survival of coral reefs requires integrated water-

shed-based management activities and marine conservation. *Amer. Sci.* 91: 44-51.

Wolanski, E., Richmond, R., & McCook, L. (2004). A model of the effects of land-based, human activities on the health of coral reefs in the Great Barrier Reef and in Fouha Bay, Guam, Micronesia. *J. Mar. Sys.* 46: 133-144.

Zhang, R., Liu, B., Lau, S., Ki1, J., & Qian, P. (2007). Particle-attached and free-living bacterial communities in a contrasting marine environment: Victoria Harbor, Hong Kong. *FEMS Microbiol. Ecol.* 61: 496-508.

Evaluación de un sistema de filtros de cascarilla de arroz y *luffa cylindrica* para el tratamiento de aguas lluvias

Andrés Suárez,^{1*} Paola Mesa,² Víctor Bravo³ y Andrés Prieto⁴

¹Universidad Jorge Tadeo Lozano, Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería, Departamento de Ingeniería. Cra. 4 N° 22-61 Bogotá D. C., Colombia

*Autor para correspondencia: andresf.suarez@utadeo.edu.co

²Universidad Juan N. Corpas. Facultad de Medicina

³Cormacarena. Grupo Aire y Urbano

⁴Interventor relleno Doña Juana

Resumen

Se evaluó un sistema de tratamiento para agua lluvia cosechada en los techos de la Universidad Libre, sede Bosque Popular empleando elementos lignocelulósicos mediante dos filtros de flujo descendente con lecho profundo. Uno que consta de *luffa cylindrica* como soporte combinado con cascarilla de arroz como medio filtrante y otro que solo funcionó con cascarilla de arroz como medio filtrante.

La eficiencia del tratamiento se evaluó a través de análisis físicos, químicos y biológicos como pH, turbiedad, sólidos disueltos totales, sólidos suspendidos totales, DQO y coliformes para un período de 10 días. Algunos de estos parámetros no mejoraron con el sistema en el período de prueba. Se observó además la ausencia de alcalinidad y dureza, lo que puede permitir el uso de esta agua en procesos diferentes al de consumo humano.

Palabras clave: sistema de filtración, *luffa cilíndrica*, cascarilla de arroz, agua lluvia.

Editora: Pataquiva-Mateus, A. Y.

Citation: Suárez, A., Mesa, P., Bravo, V. y Prieto, A. (2015). Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Revista Mutis 5(1)*; pag 21-27.

Received: May 15, 2015; **Accepted:** June 5, 2015; **Published on line:** June 30, 2015

Copyright: ©2015 Suárez *et al.* This is an open-access article, which permits unrestricted use, distributions and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Competing Interests: The authors have no conflict of interest.

Evaluation of filtration system of rice husk and *luffa cylindrica* for the treatment of harvested rainwater

Abstract

Filtration treatment of harvested rainwater with lignocellulose material was evaluated in order to determinate the usage of this water source in the Libre University. Two descending flow filter were used, one with *luffa cylindrica* as support media combined with rice husk as filtrating media and the other one with rice husk and no support.

The treatment efficiency was established with physical, chemical and biological analysis of the water as pH, turbidity, solids dissolved and suspended, COD, total and fecal coliforms. The variation of those parameters



were evaluated in a period of 10 days. Some of those parameters did not show an improvement with the system. The absence of hardness and acidity in this water might allow the usage of this water for process besides the human consumption.

Keywords: filtration system, *luffa cilíndrica*, rice husk, rain water.

Introducción

La carencia de agua en el mundo ha llevado a buscar alternativas para la captación de este vital líquido, además de propender por la conservación del mismo. Por tal motivo se hace necesario incursionar en procesos de cosecha del agua lluvia, que implica procesos de captación, almacenamiento y conservación. Anteriormente se usaban simples técnicas de almacenamiento como jarras y ollas. Esta tecnología “antigua” está ganando popularidad en estos días de climas extremos y en lugares apartados sin infraestructuras adecuadas para la producción de agua potable especialmente en las zonas de períodos prolongados de lluvia escasa o nula (Guozhen, Yuanchao, Xiaodong & Weina, 2011).

Según evaluaciones del IDEAM, cerca del 50 % de la población colombiana que vive en las áreas urbanas municipales está expuesta a sufrir problemas de suministro de agua, como consecuencia de la presión sobre las cuencas hidrográficas y las restricciones de uso por contaminación de las aguas superficiales (Ballén, Galarza, & Ortiz, 2006). El agua de lluvia recolectada es una valiosa fuente de agua para miles de usos. Sin embargo, el agua para el consumo humano y uso doméstico debe estar libre de importantes concentraciones de contaminantes, haciéndose necesaria la implementación de algún tipo de sistema para su purificación (Sánchez, Cohim, & Kalid).

El proceso de recolección de agua lluvia implica aprovecharla ya sea como apoyo o sustitución del sistema de agua potable, con el objetivo de evitar el desperdicio del vital líquido. En áreas donde el sistema de agua potable no existe, es irregular o no es lo suficientemente apta para el consumo humano, este sistema ha sido implementado con el fin de suministrar de alguna forma el servicio, siendo así un mecanismo

que ofrece de alguna forma un uso sustentable del agua (Silva, Sousa, & Carvalho 2015).

El agua posee características especiales en cuanto a las posibles formas de recolección superficial puesto que hay diversos tipos de contaminantes que pueden ser arrastrados por las aguas lluvias en forma de minerales naturales, sustancias orgánicas resultado de la presencia de animales o de las actividades antropogénicas. Los elementos que pueden presentarse en estas aguas naturales incluyen contaminantes microbianos como virus y bacterias, contaminantes inorgánicos como sales y metales, que pueden ser de origen natural, resultado de actividades humanas como el transporte o mala disposición de aguas residuales industriales o domésticas, de la producción petrolera y de gas, de la minería o de la agricultura, pesticidas y herbicidas, contaminantes radiactivos, y compuestos orgánicos volátiles y persistentes, entre otros (Gwenzi, Dunjana, Pisa, Tauro, & Nyamadzawo; Thomas, Kirisits, Lye & Kinney, 2014)

El proceso de reciclaje de agua lluvia implica los procesos de recolección, consiste en el uso de una superficie lo suficientemente apropiada como para la captación del agua lluvia, que por medio de pendientes dirigen al líquido hacia una canaleta hasta el área de almacenaje en un tanque. Esta área de recolección habrá de estar limpia, el mantenimiento que se le da a un techo promedio –por ejemplo–, bastará para asegurarse de que el agua que se obtiene carezca de una gran cantidad de micro-organismos dañinos para plantas, cultivos y animales, aunque no garantiza la potabilidad de la misma (Méndez *et al.*, 2011). Limpieza de canaletas y bajadas de agua preexistentes llevarán el agua hasta el tanque de almacenamiento, con el objetivo de que partículas extrañas (basura, tierra, etc.) se queden en el fondo del mismo reduciendo al mínimo la contaminación por sólidos, previniendo tapones en el sistema del filtro diseñado, en las tuberías o sistemas de riego.

Estos diferentes usos, aparte del de consumo humano, han sido evaluados y marcados, como por ejemplo fuente de agua para servicio en edificios de grandes ciudades como Berlín, donde el agua lluvia es aprovechada en sistemas sanitarios y de riego mediante sistemas de recolección y almacenamiento diseñados para este

propósito particular (Wisý, 2011). Un estudio realizado en el año 2007 en Nigeria (Rim-rukeh, Ikhifa, Okokoyo, & Awatefe, 2007), evaluó el comportamiento de un filtro con partículas finas de hueso como material filtrante, donde se analizan los siguientes parámetros: pH, temperatura, turbidez, SDT, SST, DBO, DQO y nitratos. Un análisis de pretratamiento de la corriente de alimentación mostró valores de pH (6,4), temperatura (27,7 °C); turbidez (19,6 NTU); SDT (906 mg/L); SST (28 mg/L); DBO (37 mg/L); DQO (41 mg/L) y nitratos (21,17 mg/L). La eficiencia de remoción del filtro fue evaluada para un período de cinco (5) días. El proceso de tratamiento alcanzó una eficiencia global 86,60 % de turbidez, SST 69,34 %, 62,70 % de TDS, 84,38 % de DBO, DQO 41,88 % y 51,20 % de reducción de nitrato. De lo anterior se concluye que la adsorción de un filtro relleno con partículas finas de hueso, en términos de eficiencia de remoción de contaminantes en el agua lluvia es alta (Rim-Rukeh, Ikhifa, Okokoyo, & Awatefe, 2007). Sin embargo, todavía se encuentran lejos estas tecnologías de producir agua apta para consumo humano seguro (Lee, Yang, Han, & Choi, 2010; Moon, Lee, Lee, Park, & Jo, 2012).

Materiales y métodos

Para la recolección se usó una bajante la cual condujo el agua hacia un tanque de almacenamiento y cosecha. Esta fue objeto de determinación de parámetros físicos, químicos y biológicos, los cuales permitieron la caracterización del líquido. Para dichos análisis se tomó una muestra de dos litros de agua a la que se le determinaron diversos parámetros que se señalan a continuación: La determinación del pH se realizó de acuerdo con lo estipulado por el standard methods número 4500, método electrométrico empleando un potenciómetro en laboratorio Schott Handylab, que permitió medir pH con una precisión de 0,01 unidades de pH. La turbiedad se midió según el SMWW 2130, usando un turbidímetro Merck Turbiquant, con una precisión de 0,0001 NTU. Sólidos suspendidos y disueltos se determinaron de acuerdo al SMWW 2540 C. La carga orgánica se estableció por medio de la demanda química de oxígeno (DQO) de acuerdo al método titulométrico de reflujo cerrado, SMWW 5220 C. Coliformes totales y fecales fueron determinadas con el método 9221B (Eaton, Franson, Association, & Federation, 2005).

A la cascarilla de arroz se le realizó un lavado y luego fue triturada. Para la caracterización en el laboratorio se realizaron pruebas de basicidad y acidez pesando por triplicado aproximadamente 0,5000 g del material adsorbente, colocando las cantidades antes pesadas en frascos con 50,0 ml de soluciones volumétricas valoradas 0,1 N de hidróxido de sodio, ácido clorhídrico, carbonato de sodio y bicarbonato de sodio por separado. Las soluciones se taparon y se dejaron a una temperatura de 25,0 °C durante 5 días con agitación manual ocasional. Concluido este tiempo, se tomaron muestras de 5,00 ml de cada una de las soluciones y se titularon potenciométricamente por triplicado con solución estándar de ácido o base, según fuera el caso. Puesto que la concentración de grupos funcionales en el material adsorbente puede llegar a ser muy baja, es necesario que las soluciones a emplear tengan concentraciones menores a 0,05 N. Se realizó además la determinación de punto de carga cero (titulación de masas), pesando cantidades del material lignocelulósico en un rango de 0,1000 a 0,5000 g, cada una de las cuales fue colocada en frascos de 20,0 ml y se les adicionó 10,0 ml de cloruro de sodio 0,1 M. Las muestras fueron tapadas y se dejaron a una temperatura de 25,0 °C con agitación constante durante 48 horas, tiempo después del cual se procedió a medir el pH de cada solución. Luego de la caracterización del material filtrante se fabricaron dos filtros; uno tuvo un soporte vegetal de *luffa cylindrica* comúnmente conocida como estropajo (filtro 1), que se esperaba evitara una rápida colmatación o compactación del filtro. El otro sistema solo se relleno de material filtrante (filtro 2) en un espacio de 30 cm de los 40 cm que tuvo en total, teniendo además en los extremos espacios de retención para partículas de tamaño considerable y evitar su ingreso al filtro divididos en espacios de 5 cm en cada extremo, por medio de una tela de algodón que tiene la función adicional de repartir el flujo por toda la superficie del filtro como se muestra en la figura 1. Una vez montados los sistemas de filtración se realizó el seguimiento de los parámetros físicos y químicos mencionados por un período de 10 días y al final de este se hizo una evaluación microbiológica.

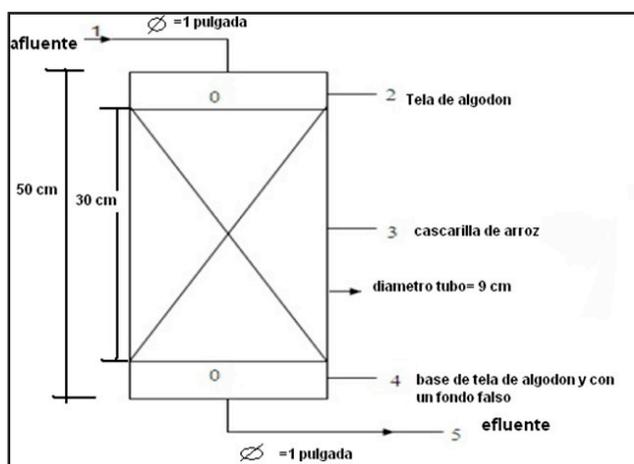


Figura 1. Esquema del sistema de filtración (arriba) y montaje experimental (abajo).

Resultados

Caracterización inicial de la cascarilla de arroz

La cascarilla muestra un punto de carga cero (pHPZC) de 4,82, lo cual indica que la superficie del material posee sitios ácidos, los cuales podrían permitir procesos de adsorción de cationes que se encuentren en el agua lluvia. La acidez fue de 0,634 meq/g mientras que la basicidad fue de 0,183 meq/g, confirmando el carácter ácido de la superficie. La sumatoria de las dos al ser diferente de uno indica la existencia de superficie electrostáticamente neutra.

Comportamiento de la calidad del agua en función del tiempo de operación

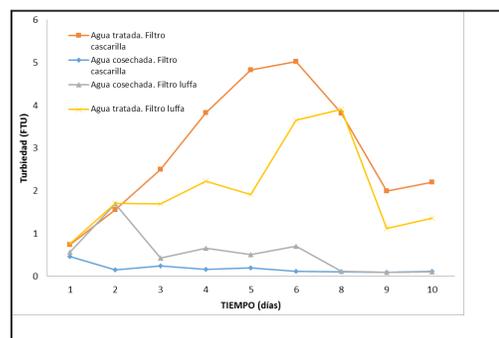


Figura 2. Turbiedad vs. tiempo

Al realizar la determinación de la turbiedad al agua cosechada antes de su paso por las columnas filtrantes, como se observa en la figura 2, se evidenció que estas poseen niveles bajos con tendencia a reducir, pues debido a su almacenamiento se ha producido una sedimentación de sólidos presentes en el agua. En cambio al efectuar la valoración de la turbiedad a las aguas después de los filtros se hizo claro el aporte de elementos causantes de la misma por el material filtrante. En los últimos días de evaluación del filtro se observó una tendencia a la reducción de este parámetro a la salida del filtro, pero siempre obteniendo valores superiores al agua almacenada en los tanques de alimentación.

El comportamiento del pH para los dos filtros es diferente. Mientras el que no posee soporte de *luffa cylindrica* tiende a bajar el pH hasta 0,4 unidades, el que tiene soporte tiene valores similares o incluso tiende a aportar basicidad sobre el final del tratamiento. Cabe considerar que la cascarilla al contar con sitios ácidos puede mediante procesos de adsorción remover las sustancias fuente de la alcalinidad del agua.

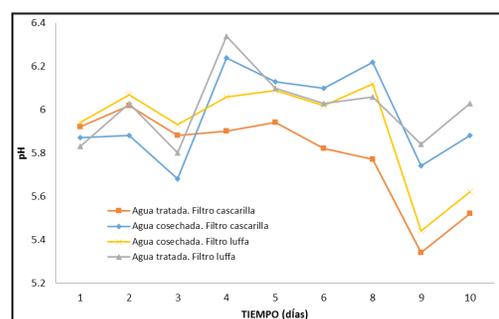


Figura 3. pH vs. tiempo

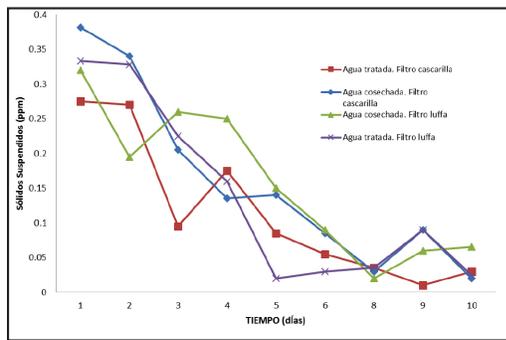


Figura 4. Sólidos suspendidos totales vs. tiempo

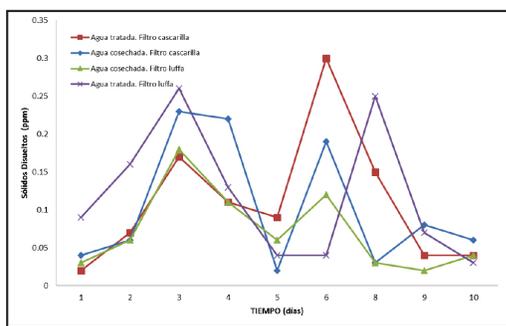


Figura 5. Sólidos disueltos totales vs. tiempo

En cuanto a sólidos suspendidos que se presentan en la figura 4, para el agua lluvia se obtuvieron valores iniciales de 0,32 ppm para el filtro 1 y 0,38 ppm para el filtro 2 con valores finales que están por debajo de 0,1 ppm. Existe una pequeña diferencia entre el agua tratada y sin tratar, sin embargo la remoción de este parámetro está determinada fundamentalmente por procesos de sedimentación dentro de los tanques de almacenamiento. Los sólidos disueltos de la figura 5 no son susceptibles a la remoción por procesos hidrodinámicos, sin embargo tampoco hay una remoción apreciable del mismo, puesto que es posible que los procesos de quimisorción no estén favorecidos por la carga superficial, generalmente negativa de los coloides que integran los sólidos disueltos.

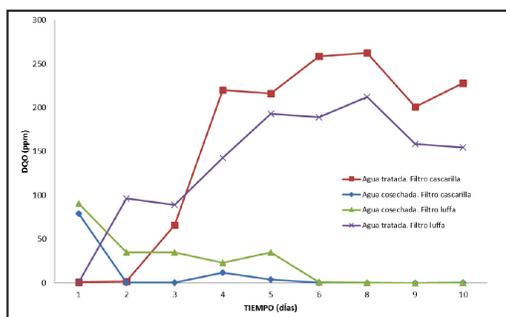


Figura 6. Demanda química de oxígeno vs. tiempo

El parámetro DQO, que permite establecer la carga orgánica presente en el agua, se ve negativamente afectado por el uso del filtro como se observa en la figura 6. Existe un aporte de materia orgánica el cual se ve más marcado en el filtro que tiene solo cascarilla que en el que posee estropajo como soporte. Esto puede deberse a que se presenta descomposición de la cascarilla, liberando materia orgánica, fenómeno que no es tan marcado en materiales como la *luffa cilíndrica*, la cual no presenta procesos de descomposición manifiestos en presencia de agua.

En cuanto a la presencia de microorganismos, en los resultados obtenidos al evaluar las unidades formadoras de colonias para coliformes totales y fecales para el último día de operación del filtro, no se obtuvo presencia de coliformes fecales, pero sí 41 unidades formadoras de colonia para coliformes totales, lo cual no la hace apta para consumo humano según la resolución 2115 del 2007.



Figura 7. Material filtrante del filtro 1 después de 10 días



Figura 8. Material filtrante del filtro 2 después de 10 días

El estado del material filtrante una vez pasado el período de evaluación reveló que hubo compactación del lecho, además de descomposición de la cascarilla al interior del filtro como se puede observar en las figuras 7 y 8.

Finalmente, se realiza una comparación entre los parámetros del decreto 2115 de 2007 y algunos de los parámetros obtenidos en la evaluación de los sistemas de filtración, donde se puede apreciar que en su gran mayoría no cumplen con lo establecido por dicha resolución.

Tabla 1. Comparación de parámetros para agua de consumo y sistemas de filtración estudiados

Parámetro	Resultados filtros	Resolución 2115 de 2007. Valor máximo	Unidades
Turbiedad	3,5	2,0	FTU
pH	5,4 – 6,2	5,5 – 9,0	UN
Nitratos	0,8	10,0	mg/l
Alcalinidad	21,4	200,0	mg/l CaCO ₃
Dureza	0	300	mg/l CaCO ₃

Conclusiones

Al evaluar los resultados físicos, químicos y microbiológicos se encontró que los filtros no generaron una mejora en parámetros como pH, turbidez, SST y DQO. También se pudieron identificar de manera cualitativa cambios en el color del agua, la cual pasó de estar transparente a un color amarillento, y en el olor, donde se presentaron indicios de un proceso de descomposición que se pudo evidenciar en el aumento de carga orgánica en el efluente de los filtros. Debido a las condiciones que presentó el agua tratada por los filtros se evidencia que esta cumple con algunos de los niveles permisibles por la norma, lo cual nos indica que esta agua se puede emplear en actividades comunes como el riego de jardines, lavado de zonas duras o fachadas y emplearse en la descarga de sanitarios con una adecuada estructura hidráulica.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Libre y a la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano por el soporte financiero para la realización de este trabajo.

Referencias

Ballén, J. A., Galarza, M. A., & Ortiz, R. O. (2006). *Historia de los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia en Colombia*. Paper presented at the Seminario Iberoamericano sobre sistemas de abastecimiento urbano de agua.

Eaton, A. D., Franson, M. A. H., Association, A. P. H., Association, A. W. W., & Federation, W. E. (2005). *Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater*: American Public Health Association.

Guozhen, Z., Yuanchao, Y., Xiaodong, L. I. U., & Weina, Z. (2011). Research and Application of harvested rainwater in the villages and towns of China Loess Plateau region. *Energy Procedia*, 5(0), 307-313. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.03.053>

Gwenzi, W., Dunjana, N., Pisa, C., Tauro, T., & Nyamadzawo, G. (2015). Water quality and public health risks associated with roof rainwater harvesting systems for potable supply: Review and perspectives. *Sustainability of Water Quality and Ecology*. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.swaqe.2015.01.006>

Lee, J. Y., Yang, J.-S., Han, M., & Choi, J. (2010). Comparison of the microbiological and chemical characterization of harvested rainwater and reservoir water as alternative water resources. *Science of The Total Environment*, 408(4), 896-905. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.11.001>

Méndez, C. B., Klenzendorf, J. B., Afshar, B. R., Simmons, M. T., Barrett, M. E., Kinney, K. A., & Kirisits, M. J. (2011). The effect of roofing material on the quality of harvested rainwater. *Water Research*, 45(5), 2049-2059. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2010.12.015>

- Moon, S.-H., Lee, J.-Y., Lee, B.-J., Park, K.-H., & Jo, Y.-J. (2012). Quality of harvested rainwater in artificial recharge site on Jeju volcanic island, Korea. *Journal of Hydrology*, 414–415(0), 268-277. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.10.041>
- Rim-Rukeh, A., Ikhifa, G. O., Okokoyo, A. P., & Awatefe, J. K. (2007). Treatment of harvested rainwater in a pilot scale fixed-bed filled with bone char. *Journal of Applied Sciences Research*, 3(8), 690-694.
- Sánchez, A. S., Cohim, E., & Kalid, R. A. (2015). A review on physicochemical and microbiological contamination of roof-harvested rainwater in urban areas. *Sustainability of Water Quality and Ecology*. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.swaqe.2015.04.002>
- Silva, C. M., Sousa, V., & Carvalho, N. V. (2015). Evaluation of rainwater harvesting in Portugal: Application to single-family residences. *Resources, Conservation and Recycling*, 94(0), 21-34. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.11.004>
- Thomas, R. B., Kirisits, M. J., Lye, D. J., & Kinney, K. A. (2014). Rainwater harvesting in the United States: a survey of common system practices. *Journal of Cleaner Production*, 75(0), 166-173. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.073>
- Wisay, A. G. (2011). Rainwater harvesting: Harnessing the elements. *Filtration + Separation*, 48(5), 41-43. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0015-1882\(11\)70213-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0015-1882(11)70213-0)

Análisis preliminar de la estructura primaria y secundaria del ARNt^{Trp} en tortugas marinas

Harvey Infante-Rojas y Javier Hernández-Fernández*

Universidad Jorge Tadeo Lozano, Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería, Departamento de Ciencias Naturales y Ambientales, Laboratorio de Genética, Biología Molecular y Bioinformática. Cra. 4 N° 22-61 Modulo 7 Piso 6. Bogotá D. C., Colombia

*Autor para correspondencia: javier.hernandez@utadeo.edu.co

Resumen

Actualmente existen siete especies de tortugas marinas, todas amenazadas o en riesgo inminente de extinción. Los estudios con ADN mitocondrial han permitido hacer acercamientos sobre filogenia, evolución, rutas migratorias y centros de dispersión, además para la identificación de polimorfismos y haplotipos, siendo base para planes de manejo y conservación. El presente estudio representa la primera descripción comparada de la estructura primaria y secundaria del ARNt^{Trp} mitocondrial en tortugas marinas. Se realizó un alineamiento múltiple de 26 secuencias del gen que codifica para el ARNt^{Trp} y se propuso la estructura secundaria utilizando el programa ARWEN. Se identificaron potenciales interacciones terciarias por homología comparada con el ARNt^{Trp} de mamíferos. Los resultados mostraron una secuencia consenso de 76 bases con siete regiones conservadas que representan el 76 % de la molécula. Se identificaron polimorfismos que representan tres haplotipos para *C. caretta*, dos para *C. mydas* y uno para cada una de las demás especies. Las estructuras secundarias mostraron cambios nucleotídicos puntuales para cada especie y también mostraron que el tallo aceptor, el brazo T ψ C y el bucle anticodón son motivos conservados en el ARNt^{Trp} de las tortugas marinas. Se encontró un enlace no canónico tipo A-A en el tallo DHU que podría considerarse característico de tortugas marinas. Además, se obtuvo una estructura secundaria consenso en donde se identificaron las siete regiones conservadas, seis posibles interacciones terciarias y el bucle DHU como región variable.

Palabras clave: ARNt^{Trp}, enlace canónico, homología, motivos conservados, tortugas marinas.

Editora: Pataquiva-Mateus, A. Y.

Citation: Harvey Infante-Rojas y Javier Hernández-Fernández (2015). Análisis preliminar de la estructura primaria y secundaria del ARNt^{Trp} en tortugas marinas. Revista Mutis 5(1); pp. 28-36.

Received: February 20, 2015; **Accepted:** May 2, 2015; **Published on line:** June 30, 2015

Copyright: ©2015 Infante-Rojas y Hernández-Fernández. This is an open-access article, which permits unrestricted use, distributions and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Competing Interests: The authors have no conflict of interest.

ARNt^{Trp} primary and secondary structure of sea turtle: first approach

Abstract

There are seven species of sea turtles, all threatened or in risk of extinction. Studies with mitochondrial DNA have allowed the understanding of phylogeny, evolution, migration routes, scattering centers, identification of polymorphisms and haplotypes, being the basis for management and conservation plans. In this study we did the first compared description between primary and secondary structures of the mitochondrial ARNt^{Trp} of sea turtles. a multiple



alignment of 26 sequences of the gene coding for ARNt^{Trp} was performed and a secondary structure was proposed using ARWEN. Potential tertiary interactions were identified through compared homology with ARNt^{Trp} present in mammals. The results showed a 76-base consensus sequence with seven conserved regions which represent the 76% of the molecule. We identified three haplotypes for *C. caretta*, two for *C. mydas* and one for each of the other species. The secondary structures showed specific nucleotide changes to each species and also that the acceptor stem, the T Ψ C arm and the anticodon loop are conserved motifs in the ARNt^{Trp} of sea turtles. A non-canonic A-A type link was found in the DHU stem which may be considered a characteristic of sea turtles. Furthermore, a consensus secondary structure was obtained where the seven conserved regions, six possible tertiary interactions and DHU loop as a variable region were identified as well.

Keywords: ARNt^{Trp}, canonic link, homology, conserved motifs, sea turtles.

Introducción

Las tortugas marinas evolucionaron de las tortugas de agua dulce hace más de 100 millones de años (CIT, 2004). Actualmente existen dos familias de tortugas marinas, la Cheloniidae, con seis especies: la tortuga plana (*Natator depressus*), la tortuga golfina (*Lepidochelys olivacea*), la tortuga lora (*Lepidochelys kempii*) la tortuga cabeza (*Caretta caretta*), la tortuga Carey (*Eretmochelys imbricata*) y la tortuga verde (*Chelonia mydas*) (Pritchard *et al.*, 1999); y la familia Dermochelyidae, con una sola especie: la tortuga laúd (*Dermochelys coriacea*) (Trujillo, 2009). Las tortugas marinas se distribuyen ampliamente en océanos tropicales y templados y su papel ecológico va desde mantener sanos los pastos marinos hasta el control de la población de medusas, pero su función principal es trasladar la productividad del ecosistema marino a la costa (Pritchard, 2004). Todas las especies de tortugas marinas se encuentran en riesgo de extinción (UICN, 2015), por lo que en muchos países y organizaciones se adelantan investigaciones tendientes al manejo y conservación, para los cuales, los estudios moleculares en los que se analiza ADN mitocondrial (ADNmt) han tomado mucha importancia. Los mitogenomas de las tortugas marinas se han secuenciado totalmente (Kumazawa y Nishida, 1999; Duchene *et al.*, 2012; Drosopoulou *et al.*, 2012;

Otálora *et al.*, 2015) y los esfuerzos se han dirigido hacia el uso de genes mitocondriales como marcadores moleculares, los cuales han permitido hacer acercamientos sobre filogenia, evolución, rutas migratorias y centros de dispersión, además para la identificación de polimorfismos y haplotipos (Carreras *et al.*, 2011). El 50 % de patologías neurodegenerativas, respiratorias y musculares caracterizadas en humanos está relacionado con mutaciones de los ARNt mitocondriales (MITOMAP, 2015). En tortugas marinas, malformaciones y mortalidad embrionaria podrían deberse a factores genéticos (Azanza *et al.*, 2006), que podrían estar asociados a modificaciones en los ARN de transferencia mitocondriales (ARNt mt), siendo esta un área de interés para la conservación de la especie.

Los ARNt son moléculas adaptadoras entre la información codificada en el ARN mensajero y el aminoácido por lo que son clave en el proceso de síntesis de proteínas (Widmann *et al.*, 2010), además se encuentran entre las moléculas más antiguas y mejor conservadas (Widmann *et al.*, 2010; Florentz *et al.*, 2003). Se sintetizan primero como moléculas lineales monocatenarias de más o menos 76 nucleótidos y adquieren luego la apariencia de hoja de trébol en la cual se distinguen el brazo aceptor del aminoácido, el tallo y el bucle dihidrouridina (DHU), el tallo y el bucle del anticodón, el bucle variable, y el tallo y el bucle ribotimidina-pseudouridina-citosina (T Ψ C) (Lodish *et al.*, 1995; Klug *et al.*, 2006) y gracias a interacciones entre los bucles y las hélices se obtiene una estructura terciaria en forma de "L" plegada (Suzuki *et al.*, 2011). Los ARNt mitocondriales por su parte han mostrado fuertes desviaciones estructurales (Helm *et al.*, 2000) por lo que se los ha considerado extraños, algunos incluso carecen de uno de sus brazos (Laslett y Canbäck, 2008). Los ARNts pueden cambiar su especificidad por mutaciones puntuales que pueden afectar su interacción terciaria (Saks *et al.*, 1998), evidenciando la importancia de analizar los ARNt mitocondriales en las tortugas marinas. La disponibilidad de grandes bases de datos que contienen miles de secuencias de ARNts en cientos de genomas completos, ha impulsado el desarrollo del nuevo campo de la "tRNAomics" (Marck y Grosjean, 2002), pero a pesar de la importancia de los ARNt mt y de los estudios detallados que se han hecho en humanos, es muy poca la información reportada que describa los ARNt mt en tortugas marinas. Otálora (2014) reportó una mutación puntual en el gen que codifica el ARNt^{Trp} en un individuo de *C. caretta* del Caribe colombiano, que podrían causar modificaciones en su estructura 2D y 3D, y que

eventualmente podrían alterar la interacción ARNt-aminoacil sintetasa y ARNt-ribosoma. Este estudio es el primer acercamiento en la descripción de la estructura primaria y secundaria del ARNt^{Trp} de tortugas marinas, con el objetivo de analizar cambios y conformaciones que posiblemente tengan implicaciones evolutivas.

Metodología

Se obtuvieron 26 secuencias del gen que codifica para el ARNt triptófano a partir de genomas mitocondriales completos de siete especies de tortugas marinas, publicados previamente en GenBank (www.ncbi.nlm.nih.gov/genbank/). La tabla 1 presenta los números de acceso y la referencia de los genomas utilizados. Se realizó un alineamiento múlti-

ple de las 26 secuencias usando el algoritmo Clustal W (Thompson *et al.* 1994) para definir el grado de conservación y variabilidad. Se dedujo la estructura secundaria del ARNt^{Trp} para cada una de las especies de tortugas mediante el software en línea ARWEN (Laslett y Canbäck, 2008) con el fin de identificar los dominios de la molécula y las posiciones de los polimorfismos. Se identificaron posibles interacciones terciarias por homología, indicando las bases y posiciones en la molécula respectiva para cada especie de tortuga. Finalmente se infirió una estructura secundaria o 2D consenso, en la cual se identificaron las regiones conservadas, las posibles interacciones terciarias, las regiones variables y la estructura general de la molécula de ARNt^{Trp} en tortugas marinas.

Tabla 1. Números de acceso de los 26 genomas mitocondriales de siete especies de tortugas marinas a partir de los cuales se obtuvieron las secuencias del ARNt triptófano

Especie	Número de Acceso	Referencia
Dermochelys coriacea	JX454969.1	Duchene et al. (2012)
	JX454973.1	Duchene et al. (2012)
	JX454989.1	Duchene et al. (2012)
	JX454992.1	Duchene et al. (2012)
Chelonia mydas	AB012104	Kumazawa y Nishida (1999)
	JX454974.1	Duchene et al. (2012)
	JX454972.1	Duchene et al. (2012)
	JX454971.1	Duchene et al. (2012)
	JX454976.1	Duchene et al. (2012)
Natator depressus	JX454990.1	Duchene et al. (2012)
	JX454975.1	Duchene et al. (2012)
Eretmochelys imbricata	NC_012398	Tandon, Trivedi & Kashyap (en prep)
	JX454970	Duchene et al. (2012)
	JX454980	Duchene et al. (2012)
	JX454986	Duchene et al. (2012)
Caretta caretta	NC_016923.1	Drosopoulou et al. (2012)
	JX454977.1	Duchene et al. (2012)
	JX454983.1	Duchene et al. (2012)
	JX454984.1	Duchene et al. (2012)
	JX454988.1	Duchene et al. (2012)
Lepidochelys kempii	KP256531	Otálora et al. (2015)
	JX454981.1	Duchene et al. (2012)
Lepidochelys olivacea	JX454982.1	Duchene et al. (2012)
	JX454979.1	Duchene et al. (2012)
	JX454987.1	Duchene et al. (2012)
	JX454991.1	Duchene et al. (2012)

Resultados y discusión

Estructura primaria

El gen mitocondrial ARNt^{Trp} exhibió una longitud de 76 bases (b) diferente a las 73 b reportadas para el mismo gen en mamíferos (Helm et al., 2000). Se observó que el gen para ARNt^{Trp} es de codificación exclusiva, es decir, no se solapa con genes adyacentes, presentando en todos los casos una base espaciadora que lo separa del gen que codifica para el ARNt^{Ala} en el extremo 3', y dos o una base como espaciador intergénico con el gen ND2 en el extremo 5', evidenciado el carácter reducido de la molécula mitocondrial al disminuir de dos a una sola base en algunos casos.

El análisis molecular del gen ARNt^{Trp} de las tortugas marinas se realizó utilizando 78 posiciones nucleotídicas resultado del múltiple alineamiento (figura 1), el cual mostró una secuencia consenso de 76 b, con siete regiones conservadas entre 1 y 18 b, que corresponden a las posiciones 1-13, 25-29, 31, 34-44, 47-50, 52-57, y 59-76 de la estructura secundaria (figura 1, bloques en verde), además de posiciones polimórficas con inserciones, deleciones, transiciones y transversiones.

Se encontró variación en la longitud de las secuencias entre las especies y también a nivel intraespecífico, se

observaron longitudes de 75, 76 y 77 b, explicada por inserciones y deleciones presentes. En el caso de *Caretta caretta*, todas las secuencias mostraron una timina adicional en la posición 25 (figura 1 y figura 2A), sin importar el origen geográfico del individuo, lo que podría indicar que esta mutación está fijada en la especie; además se identificaron transiciones en tres posiciones y una transversión, por lo cual se pudieron identificar 3 haplotipos.

Las seis secuencias del ARNt^{Trp} de *Chelonia mydas*, mostraron una deleción en la posición 14, lo que indicaría también que esta es una mutación puntual propia de la especie, no obstante, las secuencias de los individuos provenientes de Chipre, Costa Rica y océano Atlántico presentaron una adenina adicional en la posición 18, mostrando 2 haplotipos, y demostrando con estos polimorfismos la susceptibilidad a mutaciones puntuales por presiones evolutivas de los genes mitocondriales (Suzuki et al., 2011). Las tortugas *L. olivacea* y *L. kempii* presentaron un único haplotipo que además fue el mismo para ambas especies, definido por la transversión adenina por timina en la posición 20. *D. coriacea*, *E. imbricata* y *N. depressa* mostraron por su parte un solo haplotipo.

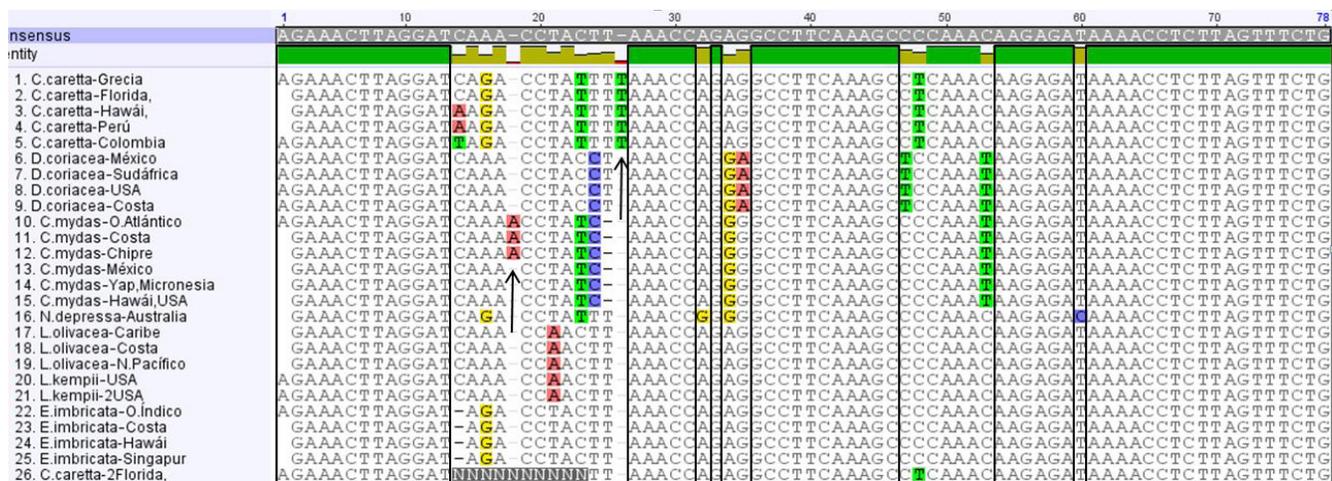


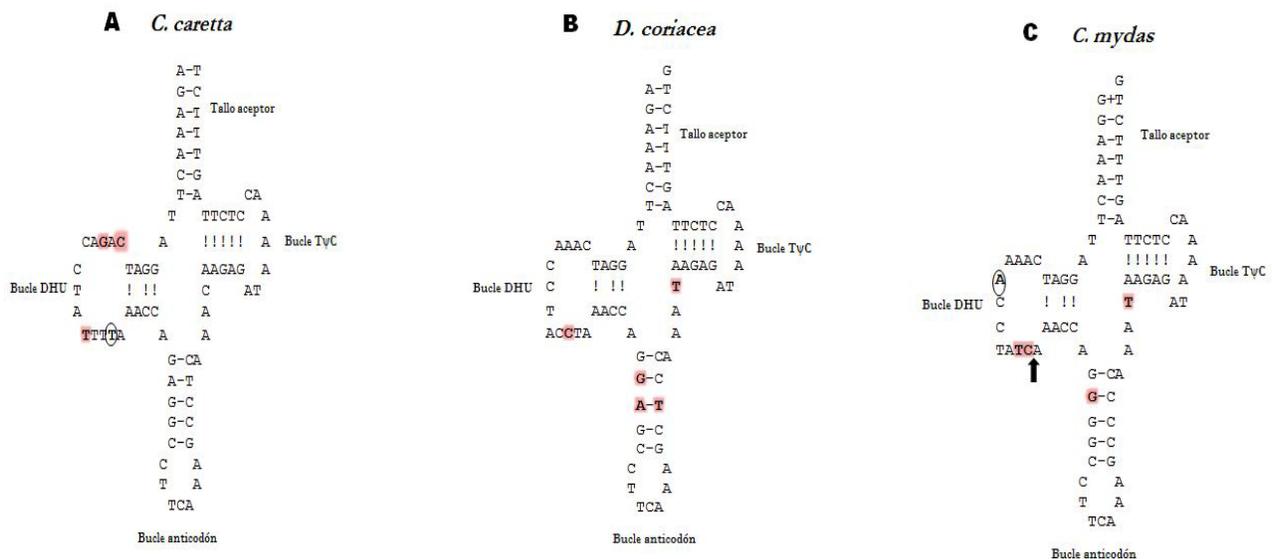
Figura 1. Múltiple alineamiento de 26 secuencias del gen ARNt^{Trp} de 7 especies de tortugas marinas. Se muestran las secuencias en sentido 5'-3'. La secuencia consenso en gris con 76 b, las zonas en los recuadros representan las regiones conservadas, las bases en color representan polimorfismos y las flechas señalan inserciones.

Otra fuente de variación en la longitud de las secuencias es la falta de A en el extremo 5' para algunas especies, mutación que puede estar sujeta a inconsistencias en la delimitación de la secuencia del gen, esta base aparece como espaciador entre el gen ARNt^{Trp} y ND2, lo que evidencia que la base está presente en la secuencia pero no está definida dentro del gen. Esta hipótesis está apoyada en el análisis de la estructura secundaria (figuras 2C y 2F), ya que el programa ARWEN adiciona una G para completar siete enlaces en el tallo aceptor como se reporta para el ARNt^{Trp} mitocondrial en otras especies (Helm *et al.*, 2000).

Estructura secundaria

La estructura secundaria mostró gran conformidad con la estructura canónica. La composición nucleotídica estuvo dominada por adenina y timina, solo entre el 37 y el 45 % correspondió a GC para todas las secuencias, como era de esperarse en un gen mitocondrial (Pérez *et al.*, 2008). Gracias a que el 76 % de la secuencia nucleotídica esta conservada para todas las especies, se pudieron identificar características estructurales comunes para todas ellas. El tallo aceptor fue consistente en todas las especies exhibiendo siete pb Watson-Crick y una G no pareada en el extremo 3'. El brazo TψC también fue consistente en todas la tortugas mostrando 5 apareamientos Watson-Crick for-

mando su tallo y 7 bases conformando su bucle, en donde solo *N. depressa* registró una transición (figura 2F). La presencia de dos bases conectoras entre el tallo aceptor y el tallo del brazo DHU y una base entre este último y el tallo del brazo anticodón, también fueron características compartidas en todas las especies. Se observó también que las siete bases que conforman el bucle del brazo anticodón son comunes en todas las especies y el tallo está constituido en todos los casos por cinco pb, sin embargo, dos de estos pares fueron fuente de variación. En las especies *L. kempii*, *L. olivacea* y *E. imbricata* se evidenciaron enlaces no canónicos tipo A-C en las posiciones 32-46 como se muestra en la figura 2 (ver D y E), lo que podría causar plegamientos extraños de su estructura 3D, ya que estas bases normalmente son determinantes en la formación de la estructura terciaria (Pérez *et al.*, 2008), pues interactúan con el brazo DHU y el bucle variable (Helm *et al.*, 2000). El brazo DHU muestra cuatro pares de bases en su tallo consistentes en todas las tortugas, de las cuales un par no es canónico, con enlace A-A, lo que se podría reconocer como una característica típica de los ARNt mt de tortugas marinas. El bucle del brazo DHU fue la región con mayor número de polimorfismos, presentándose en su secuencia dos inserciones, dos deleciones y una transversión, además de varias transiciones como se muestra en la figura 2, siendo este bucle la única región variable en longitud de la estructura secundaria.



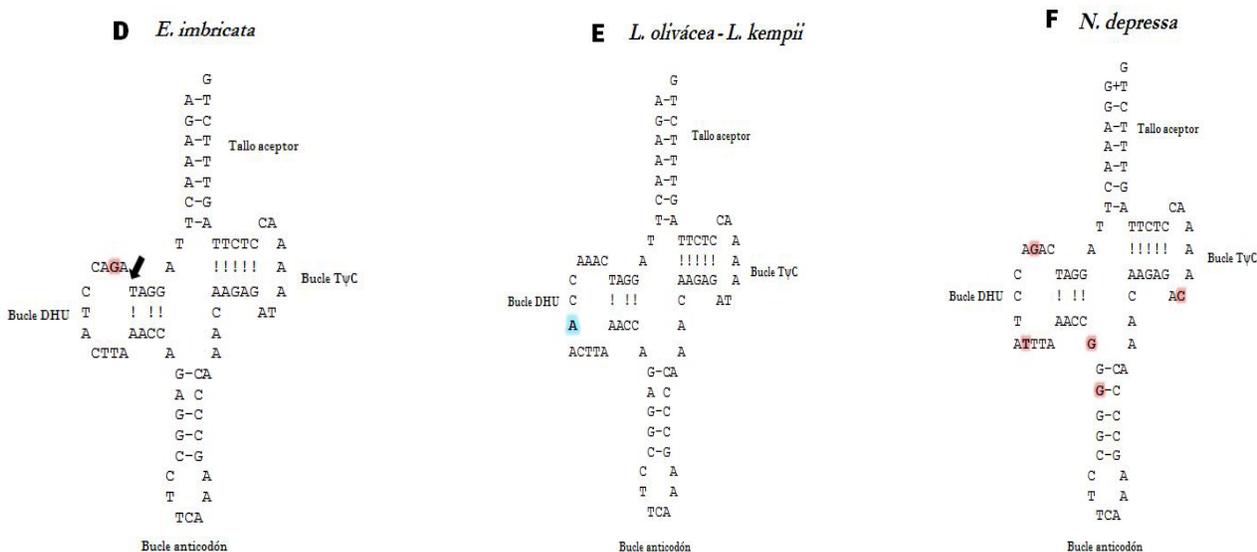


Figura 2. Estructuras secundarias inferidas para siete especies de tortugas marinas: A) *C. caretta*, B) *D. coriácea*, C) *C. mydas*, D) *E. imbricata*, E) *L. olivácea* y *L. kempii*, F) *N. depressus*. Las letras resaltadas en rojo identifican transiciones, las letras en azul denotan transversiones, las elipses indican inserción y las flechas indican la posición de una deleción, de acuerdo con la secuencia consenso.

Potenciales interacciones terciarias

Nueve interacciones terciarias se definieron para ARNt canónicos con base en cristalografía de rayos X en los trabajos de Giegé *et al.* (1993) y Dirheimer *et al.* (1995). Helm *et al.* (2000) realizando estudios de homología y coincidencia de residuos, reportan que seis de estas interacciones pueden ser posibles en el ARNt^{Trp} mt en mamíferos. La tabla 2 y la figura 3 resaltan las posibles interacciones terciarias para el ARNt^{Trp} mt en tortugas marinas basadas en la comparación con las interacciones reportadas por Helm *et al.* Se observó que las seis interacciones son posibles, con coincidencia de las posiciones 8, 9, 10, 12, 13, 14 y 15 que se ubican antes del bucle DHU identificado como la fuente de variación de longitud de las secuencias en este estudio. Las posiciones siguientes al bucle DHU varían de 4 a 5 unidades debido a que este es más amplio en tortugas, también por las inserciones o deleciones y en general a una mayor longitud del gen en tortugas marinas respecto al de mamíferos. En cuanto a la identidad de las bases (tabla 2), se pudo observar que se conservan estrictamente para la interacción 4, y en la interacción 6 solo *N. depressus* cambia una A por G en la posición 30. Las interacciones 1, 2 y 5 muestran

que las bases que las componen coinciden para todas las especies de tortugas en este estudio (excepto *E. imbricata* en la interacción 1) pero varían en una base con respecto a lo reportado para mamíferos. Estas diferencias podrían representar estructuras terciarias con modificaciones propias para tortugas marinas.

Estructura secundaria consenso

Finalmente se realizó una estructura secundaria consenso debido al gran porcentaje de conservación global de secuencias nucleotídicas del gen ARNt^{Trp} entre las especies de tortugas marinas. Las estructuras como el tallo aceptor, el brazo TψC, el bucle anticodón y el tallo del brazo DHU que mostraron conservación nucleotídica y estructural, estarían evidenciando la importancia funcional que estos motivos tienen dentro de la molécula de ARNt^{Trp} de las tortugas marinas.

La alta conservación del gen ARNt^{Trp} se hace visible en la figura 3, donde se evidencia también la conservación de la mayoría de las bases involucradas en interacciones terciarias, lo que explica la gran conformidad con la estructura secundaria canónica clásica.

Sin embargo, se encontró que dos de estas bases cambiaron estrictamente de G a A y es común para todas las tortugas marinas en este estudio. Otro detalle que llama la atención son los enlaces no canónicos en el tallo del brazo anticodón y del brazo DHU. Estos enlaces no canónicos participan en la compleja estructura terciaria de los ARNt, y por lo tanto, en los procesos de reconocimiento molecular (Vivero et al., 2007), sin embargo, se requiere más investigación para determinar la importancia del cambio en las bases que interactúan en la estructura terciaria y de los enlaces no canónicos encontrados.

La mayoría de los polimorfismos ocurren en el bucle DHU, por lo que se puede deducir que esta región es la que goza de mayor libertad para mutar dentro de la molécula de ARNt^{Trp} de las tortugas marinas.

Conclusiones

A pesar de que en las bases de datos moleculares disponibles en línea se encuentran depositadas varias secuencias nucleotídicas de ARNt de tortugas marinas, y que las implicaciones de posibles mutaciones en estas secuencias no se conocen hasta la fecha, no existen estudios sobre la estructura secundaria de los ARNt mitocondriales de este importante grupo taxonómico en peligro de extinción.

El gen ARNt^{Trp} en tortugas marinas presentó alta conservación con un 76 % aproximadamente.

El bucle DHU se identificó como la región más variable, con la mayor cantidad de polimorfismos. El enlace no Watson-Crick tipo A-A presente en el tallo DHU puede considerarse como una interacción secundaria conservada en tortugas marinas, sin embargo no se puede afirmar que sea exclusivo de este grupo porque aún no se cuenta con información en otros grupos emparentados.

Las diferencias entre el ARNt^{Trp} de tortugas y mamíferos podrían representar la divergencia y presión evolutiva sobre la molécula de ADN mitocondrial.

Este estudio preliminar constituye la primera descripción comparada de la estructura secundaria del ARNt^{Trp} de las tortugas marinas.

Referencias

Azanza, J., Ruisanchez, Y., Ibarra, M., Ruiz Urquiola,

A., Luis, C., & Ríos Tamayo. (2006). Indicadores del éxito reproductivo de la tortuga verde (*Chelonia mydas*) en tres playas de la península de Guanahacabibes, Pinar del Río, Cuba. *Rev. Invest. Mar.* 27(1):69-78, 69

Carreras, C., Pascual, M., Cardona, L., Marco, A., Bellido, J. J., Castillo, J. J., ... & Aguilar, A. (2011). Living together but remaining apart: Atlantic and Mediterranean loggerhead sea turtles (*Caretta caretta*) in shared feeding grounds. *Journal of Heredity*, eSR089.

Dirheimer, G., Keith, G., Dumas, P., & Westhof, E. (1995). *Primary, secondary and tertiary structures of tRNAs*. En: Helm, M., Brulé, H. Friede, D. Giegé, R. Pütz, D. & Florentz, C. (2000). Search for characteristic structural features of mammalian mitochondrial tRNAs. *Rna*, 6(10), 1356-1379.

Drosopoulou, E., Tsiamis, G., Mavropoulou, M., Vittas, S., Katselidis, K. A., Schofield, G., ... & Scouras, Z. G. (2012). The complete mitochondrial genome of the loggerhead turtle *Caretta caretta* (Testudines: Cheloniidae): Genome description and phylogenetic considerations. *Mitochondrial DNA*, 23(1), 1-12.

Duchene, S., Frey, A., Alfaro-Núñez, A., Dutton, P. H., Gilbert, M. T. P., & Morin, P. A. (2012). Marine turtle mitogenome phylogenetics and evolution. *Molecular phylogenetics and evolution*, 65(1), 241-250.

Florentz, C., Sohm, B., Tryoen-Toth, P., Pütz, J., & Sissler, M. (2003). Human mitochondrial tRNAs in health and disease. *Cellular and Molecular Life Sciences CMLS*, 60(7), 1356-1375.

Giegé, R., Puglisi, J. D., & Florentz, C. (1993). *tRNA structure and aminoacylation efficiency*. En: Helm, M., Brulé, H. Friede, D. Giegé, R. Pütz, D. & Florentz, C. (2000). Search for characteristic structural features of mammalian mitochondrial tRNAs. *Rna*, 6(10), 1356-1379.

Helm, M., Brulé, H. Friede, D. Giegé, R. Pütz, D. & Florentz, C. (2000). *Search for characteristic structural features of mammalian mitochondrial tRNAs*. *Rna*, 6(10), 1356-1379.

Klug, William S., et al. (2010). *Conceptos de genética*. n.p.: España: Pearson Educacion; Prentice Hall.

- Kumazawa, Y., & Nishida, M. (1999). Complete mitochondrial DNA sequences of the green turtle and blue-tailed mole skink: statistical evidence for archosaurian affinity of turtles. *Molecular Biology and Evolution*, 16(6), 784-792.
- Laslett, D. & Canbäck B. (2008). ARWEN, a program to detect tRNA genes in metazoan mitochondrial nucleotide sequences. *Bioinformatics* 24:172-175.
- Lodish, Harvey, Arnold Berk, Paul Matsudaira, Chris A. Kaiser, Monty Krieger, Matthew P. Scott, and Andrea Méndez. (1995). *Biología celular y molecular*. n.p.: Buenos Aires Argentina: Editorial Médica Panamericana.
- Marck, Christian, and Henri Grosjean. (2002). tRNomics: analysis of tRNA genes from 50 genomes of Eukarya, Archaea, and Bacteria reveals anticodon-sparing strategies and domain-specific features. *Rna* 8, no. 10: 1189-1232.
- Márquez, R. (1990). *Las tortugas marinas y nuestro tiempo*. Fondo de Cultura Económica, Secretaría de Educación Pública. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. México.
- MITOMAP: A Human Mitochondrial Genome Database. (2015). <http://www.mitomap.org>
- NCBI, National Center for Biotechnology Information. Taxonomy Browser. (2015). [En línea] <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/Taxonomy/Browser/>>
- Otálora Acevedo, Katherin Eliana Alejandra. *Obtención y análisis del genoma mitocondrial de la tortuga cabezona Caretta caretta (Testudines: Cheloniidae) anidante del Caribe-colombiano*. Tunja, (2014), 39 h. Trabajo de grado (Bióloga). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Facultad de Ciencias Básicas, Escuela de Biología.
- Pérez, Alveiro, Bejarano Eduar Elías, and Vélez Iván Darío. (2008). Descripción del ARN de transferencia mitocondrial para Serina (UCN) de *Lutzomyia columbiana* (Diptera, Psychodidae) / Description of the mitochondrial serine transfer RNA (UCN) of *Lutzomyia columbiana* (Diptera, Psychodidae). *Revista Brasileira de Entomologia* no. 4: 591.
- Pritchard, P. C. H. & Mortimer J. A. (1999). *Taxonomy External Morphology, and Species Identification*, p. 21-38.
- Pritchard, P.C.H. (2004). *Estado global de las tortugas marinas: un análisis*. Documento INF-001 preparado para la Convención Interamericana para la Protección y Conservación de las Tortugas Marinas, Primera Conferencia de las Partes (COP1CIT)
- Saks, M. E., Sampson, J. R., & Abelson J. (1998). Evolution of a transfer RNA gene through a point mutation in the anticodon. *Science* 279: 1665-1670.
- Secretaría CIT (2004). *Una Introducción a las Especies de Tortugas Marinas del Mundo*. Octubre 2004, San José, Costa Rica.
- Suzuki, Tsutomu, Asutaka Nagao, and Takeo Suzuki. (2011). Human Mitochondrial tRNAs: Biogenesis, Function, Structural Aspects, and Diseases. *Annual Review Of Genetics* 45, 299.
- Thompson, J. D., D. G. Higgins, and T. J. Gibson. (1994). CLUSTAL W: improving the sensitivity of progressive multiple sequence alignment through sequence weighting, position-specific gap penalties and weight matrix choice. *Nucleic Acids*
- Vivero, Rafael José, Contreras-Gutiérrez María Angélica, and Bejarano Eduar Elías. (2007). Análisis de la estructura primaria y secundaria del ARN de transferencia mitocondrial para serina en siete especies de *Lutzomyia* / Analysis of the primary and secondary structure of the mitochondrial serine transfer RNA in seven species of *Lutzomyia*. *Biomédica* no. 3: 429.
- Widmann, Jeremy, J. Kirk Harris, Catherine Lozupone, Alexey Wolfson, and Rob Knight. (2010). Stable tRNA-based phylogenies using only 76 nucleotides. *Rna* 16, no. 8: 1469-1477.

Estabilidad de procesamiento de polímeros: índice de degradación en proceso

Andrés Felipe Rojas González¹ y Laura María Aranzazu Ríos²

¹Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, Departamento de Ingeniería Química, Campus la Nubia, Manizales, Colombia, anfrojasgo@unal.edu.co.

²Industrias Básicas de Caldas, km 18 vía Medellín, Manizales, Colombia, laura.aranzazu@qbasica.com.

Resumen

Se presentan los resultados del análisis de estabilidad en proceso para polietileno de alta densidad grado extrusión (PEAD-GE), polietileno de alta densidad grado inyección (PEAD-GI), polietileno de baja densidad (PEBD), poliácido láctico (PLA), policarbonato (PC), poliestireno (PS), polimetil metacrilato (PMMA) y polipropileno (PP). Estos polímeros se reprocesaron en 5 ciclos de extrusión, inyección y extrusión/inyección. Cada polímero virgen y reprocesado se caracterizó respecto al índice de fluidez y se calculó su estabilidad en proceso mediante el índice de degradación en proceso (IDP). Se encontró que la estabilidad de los polímeros, de mayor a menor, durante la extrusión es: PEBD > PS > PMMA > PEAD-GI > PP > PLA, y en la inyección: PEAD-GI > PP > PLA > PC. Además, se determinó que la velocidad de giro del husillo no afecta la degradación en proceso.

Palabras clave: extrusión, inyección, IDP, reciclaje, reprocesamiento.

Editora: Pataquiva-Mateus, A. Y.

Citation: Andrés Felipe Rojas-González y Laura María Aranzazu-Ríos, 2015. Estabilidad de procesamiento de polímeros: índice de degradación en proceso. Revista Mutis 5(1); pp. 37-45.

Received: May 15, 2015; **accepted:** June 20, 2015; **Published on line:** June 30, 2015

Copyright: ©2014 Suárez *et al.* This is an open-access article, which permits unrestricted use, distributions and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Competing Interests: The authors have no conflict of interest.

Stability of polymer processing: index of degradation in process

Abstract

Results of stability analysis in process for High Density Polyethylene extrusion grade (HDPE-GE), High Density Polyethylene injection grade (HDPE-GI), Low Density Polyethylene (LDPE), Polylactic Acid (PLA),

Polycarbonate (PC), Polystyrene (PS), Polymethyl Methacrylate (PMMA) and Polypropylene (PP) are presented. These polymers are reprocessed in 5 cycles of extrusion, injection and extrusion/injection. Each virgin and reprocessed polymer was characterized respect to melt flow index and stability in process of each polymer by degradation index in process (IDP) was calculated. It was found that the polymers stability, from highest to lowest, during the extrusion is: LDPE > PS > PMMA > HDPE-GI > PP > PLA and during the injection is: HDPE-GI > PP > PLA > PC. Furthermore, it was determined that the rotational speed of screw does not affect the degradation process.

Keywords: extrusión, inyección, IDP, recycling, reprocessing.

Introducción

En la actualidad los polímeros son utilizados principalmente en sectores como agricultura, comercio, in-



dustria de automóviles y de empaques, en los que se aprovechan sus buenas propiedades mecánicas y su bajo costo (Ramis *et al.*, 2004). Para su procesamiento industrial se emplean principalmente tecnologías como las de inyección y extrusión, y en menor proporción soplado, compresión y moldeo por transferencia. En cualquiera de estos procesos se obtienen recortes o sobrantes de polímero considerados residuos de producción, generalmente no biodegradables, los cuales conllevan a un aumento continuo de los desechos (Ramis *et al.*, 2004). Sin embargo, estos residuos se pueden procesar nuevamente, con el fin de disminuir costos en materias primas y reducir el impacto ambiental (Goitisoló *et al.*, 2008). El alimentar nuevamente el polímero al equipo, después de haber sido procesado, se le conoce como ciclo de procesamiento o reprocesamiento. En cada ciclo de procesamiento el material sufre degradación, la cual es irreversible debido a que experimenta cambios térmicos, mecánicos, físicos y químicos, que se reflejan en el detrimento en sus propiedades finales (Goitisoló *et al.*, 2008). Estos cambios se deben principalmente a la exposición del material a la luz, a altas temperaturas, a la presencia de oxígeno (oxidación) y a esfuerzos mecánicos (Pandey *et al.*, 2005).

Algunos estudios reportados en la literatura que analizan la degradación de polímeros sin procesar y reprocesados, lo hacen través de métodos de cambio de color, índice de fluidez, propiedades mecánicas y análisis termogravimétrico (Jančář & Tocháček, 2011; Hamester *et al.*, 2015; Hermanová *et al.*, 2009). Tocháček *et al.* (2011) y Hermanová *et al.* (2009) presentan la variación del índice de fluidez respecto al reprocesamiento de distintos polímeros. Otros investigadores han evaluado el comportamiento de diferentes propiedades mecánicas como resistencia a tracción, módulo de elasticidad, límite elástico, elongación y ruptura, además de la distribución del peso molecular en cada ciclo de procesamiento (Tocháček *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2012). Carrasco *et al.* (2010) emplearon el análisis termogravimétrico para el estudio de la degradación térmica de PLA. Igualmente, se ha establecido el índice de amarillez para el material procesado en varios ciclos como indicador de degradación (Tocháček *et al.*, 2008; Tocháček *et al.*, 2011; Hermanová *et al.*, 2009). Tocháček *et al.* (2012) propusieron cuantificar la estabilidad térmica de polímeros que experimentan reprocesamiento, mediante el índice de degradación en proceso (IDP).

En este trabajo se busca establecer la estabilidad de procesamiento de 8 polímeros termoplásticos, al someterlos a 5 ciclos de reprocesamiento en extrusión, inyección y extrusión/inyección, mediante el cálculo del índice de degradación en proceso. Para ello se evalúa el efecto del tipo de proceso, tipo de polímero y velocidad de giro del husillo en extrusión sobre el IDP.

Materiales y métodos

Caracterización del polímero virgen y reprocesado

Los polímeros fueron suministrados por las empresas Nature Works e IDES Prospector – USA (en sus páginas de internet se pueden consultar las hojas de seguridad de los polímeros aquí estudiados). Para establecer la relación entre el tipo de polímero y su estabilidad térmica al experimentar reprocesamiento, se emplearon los polímeros: polietileno de alta densidad grado extrusión (PEAD-GE), polietileno de alta densidad grado inyección (PEAD-GI), polietileno de baja densidad (PEBD), poliácido láctico (PLA), policarbonato (PC), poliestireno (PS), polimetil metacrilato (PMMA) y polipropileno (PP). Los polímeros vírgenes, llamados también polímeros sin procesar, se caracterizaron respecto a su temperatura de transición vítrea, fusión y cristalización por Calorimetría Diferencial de Barrido, en un calorímetro Netzsch DCS 200-PC, según la ASTM D 3418-08. A estos polímeros y a los reprocesados, se les determinó el índice de fluidez (*IF*) mediante la norma ASTM D1238, en la que se establece la masa que fluye por un capilar en un tiempo de 10 minutos. Para ello se empleó un plastómetro marca Dynisco Polymer Test, modelo D4003.

Procesamiento del polímero

Los polímeros fueron reprocesados mediante los procesos de inyección, extrusión y extrusión/inyección. La inyección se realizó en una inyectora monohusillo marca Boy XS, con diámetro del husillo de 12 mm, una relación L/D de 19.6, una velocidad máxima de inyección de 24 cm³/s y una presión máxima de 3130 bar (45.4 psi). La extrusión se llevó a cabo en una extrusora monohusillo marca EXTRUDEX modelo ED-N 45-30D, con un diámetro de husillo de 45 mm, una relación L/D de 30, y una restricción constante en la zona de dosificación de 10. Esta restricción varía entre 0 (máxima restricción) y 56 (mínima restricción).

El sistema de calefacción de la extrusora está constituido por 8 zonas de calentamiento y la inyectora por 4 zonas de calentamiento. El proceso de extrusión/inyección consiste en pasar el polímero por la extrusora y después por la inyectora, tomando la muestra para análisis al final de cada inyección. Para establecer la relación entre el tipo de proceso y el IDP, los polímeros fueron reprocesados en 5 ciclos de inyección, 5 ciclos de extrusión y para el proceso de extrusión/inyección en 5 ciclos sucesivos solo se utilizó el PEAD-GI. Se tomaron 5 ciclos de reprocesamiento con el propósito de comparar resultados presentados en la literatura, dado que es común encontrar estudios para dicha cantidad de ciclos de reciclaje en proceso. Para determinar el efecto de la velocidad de giro del husillo en la extrusora sobre la estabilidad del polímero por el reprocesamiento, solamente se procesó PEAD grado E a 20 y 80 rpm; mientras que para determinar el efecto del tipo de polímero sobre el IDP, los polímeros fueron extruidos a una velocidad de giro de 30 rpm.

Determinación del índice de degradación en proceso

El índice de degradación en proceso (IDP) propuesto por Tocháček *et al.* (2012), es una forma cuantitativa de evaluar la estabilidad térmica de un polímero después de ser sometidos a múltiples reprocesamientos. La siguiente expresión es una modificación de la ecuación para el cálculo del IDP dada por Tocháček *et al.* (2012):

$$IDP = Abs \left[\frac{(IF_0 + IF_1 + \dots + IF_n) - (n + 1)IF_0}{(n + 1)IF_0} \times 100 \right] \quad (1)$$

Donde IF_0 representa el índice de fluidez para el polímero virgen o polímero sin procesar, IF_1 a IF_n son los índices de fluidez del polímero para los reprocesamientos 1 al n . Abs representa el valor absoluto de la ecuación sugerida por Tocháček *et al.* (2012). Este Abs corresponde a la modificación que se realizó a la ecuación, dado que se encontró que para algunos polímeros el índice de fluidez disminuye con el número de reprocesamientos, dando valores negativos para el IDP, lo cual se debe al tipo de degradación sufrida por estos (Mendes *et al.*, 2011). Para el análisis de resultados, Tocháček *et al.* (2012) establecieron que un IDP de cero representa un polímero que no sufre degradación durante los reprocesamientos, mientras un IDP mayor que cero indica que el polímero se degrada por el procesamiento. Esto también es válido para la

ecuación modificada, puesto que todo polímero experimenta degradación térmica con el reprocesamiento, pero algunos lo hacen mediante diferentes mecanismos de degradación (*Cross linking, chain extension y branching*) (Mendes *et al.*, 2011).

Razón de cambio de degradación en proceso

La razón de cambio de degradación en procesos (RCD) se plantea para establecer qué polímero, entre los que se están evaluando, presenta una mayor degradación entre el primer y quinto ciclo de procesamiento, como se muestra en la siguiente expresión matemática:

$$RCD = \frac{IDP_5 - IDP_1}{IDP_1} \quad (2)$$

Donde IDP_1 representa el IDP del polímero en su primer ciclo de procesamiento, y IDP_5 es el IDP al experimentar 5 ciclos de procesamiento. Al comparar dos polímeros, el polímero que experimenta el mayor cambio de degradación entre el primer y quinto reprocesamiento, es aquel que tiene la mayor RCD; mientras que el polímero que experimenta mayor degradación debido al primer ciclo, reporta el menor valor de RCD.

Resultados y discusión

Caracterización del polímero virgen y reprocesado

Las características de temperatura de transición vítrea, fusión, cristalización, grado y estructura molecular del polímero se presentan en la tabla 1 para los 8 polímeros. En esta tabla se observa que el PC, PS y PMMA son polímeros amorfos (A), por lo tanto no reportan temperatura de cristalización, mientras que los otros materiales son semicristalinos (SC). El PEAD, PC, PS y PP, son polímeros grado inyección (GI), el PEAD y PLA son grado extrusión (GE), mientras que el PEBD y el PMMA son grado extrusión/inyección (EI). También se aprecia que el PEAD grado I y el PC reportan el menor y mayor valor de la temperatura de transición vítrea, respectivamente. En cuanto a la temperatura de fusión, el PMMA tiene el menor valor y el PC el mayor valor de este parámetro.

Tabla 1. Caracterización térmica de los polímeros por DSC

Parámetro	PEAD	PEAD	PEBD	PLA	PC	PS	PMMA	PP
Temperatura de transición vítrea, °C	-113	-111	-105	63	145	98	100	-25
Temperatura de fusión o ablandamiento, °C	129	131	112	210	220	---	102	172
Temperatura de cristalización, °C	113	118	98.3	---	--	---	---	118
Grado del polímero	GI	GE	IE	GE	GI	GI	EI	GI
Grado de cristalinidad	SC	SC	SC	SC	A	A	A	SC

En las tablas 2 y 3 se presentan los valores de índice de fluidez para los polímeros procesados por extrusión y por inyección, respectivamente. Como se observa, el índice de fluidez para los polímeros PLA, PS, PP y PC se incrementa con el grado de reprocesamiento, este comportamiento se debe a la disminución en el peso molecular de los materiales en cada uno de ellos (Carrasco *et al.*, 2010).

Por el contrario, el PEAD-GI, el PEBD y el PMMA presentan reducción en el índice de fluidez como consecuencia de la degradación por entrecruzamiento (*cross linking*), ramificación (*branching*) y extensión de la cadena principal (*chain extension*) durante cada

ciclo de procesamiento (Rex *et al.*, 2005). En la tabla 2 se observa que el índice de fluidez del PEAD-GE no se ve afectado por la velocidad de giro del husillo en la extrusora.

En la última columna de la tabla 3 se presentan los resultados del índice de fluidez para el PEAD grado inyección sometido al proceso combinado de extrusión/inyección. Aquí se observa que este parámetro disminuye con el reprocesamiento. Para el PC no fue posible determinar el índice de fluidez después del tercer ciclo de procesamiento, debido a que su fluidez supera el valor máximo que detecta el equipo.

Tabla 2. Índice de fluidez para los polímeros procesados por extrusión

Ciclo	PEAD-GI	PEBD	PLA	PS	PMMA	PP	PEAD-GE 20 rpm	PEAD-GE 80 rpm
0	36.90	1.97	14.20	3.55	20.50	3.00	0.28	0.28
1	34.30	1.82	17.10	3.85	18.40	3.08	0.36	0.36
2	30.70	1.77	18.50	3.90	17.70	4.50	0.39	0.39
3	25.90	1.73	21.50	3.95	16.80	4.10	0.42	0.43
4	20.50	1.62	22.90	4.10	16.80	3.95	0.43	0.43
5	18.60	1.50	24.70	4.60	16.50	4.70	0.42	0.42

Tabla 3. Índice de fluidez para los polímeros procesados por inyección

Ciclo	PEAD-GI	PP	PLA	PC	PEAD-GI
0	36.9	3.0	14.2	48.5	36.9
1	36.7	3.9	17.3	109.7	25.7
2	33.4	4.1	23.1	331.4	24.2
3	30.4	5.0	31.8	-	19.0
4	28.4	-	39.7	-	14.5
5	26.3	-	60.2	-	13.1

Efecto del tipo de proceso sobre el IDP

El efecto del proceso de extrusión, inyección y extrusión/inyección, sobre el IDP para el PEAD-GI se presenta en la figura 1. Se observa que al analizar la degradación que ocurre entre un ciclo y el siguiente, la menor degradación experimentada por el polímero se da en el primer ciclo de procesamiento por inyección (IDP = 0.27), mientras que la mayor degradación ocurre en el proceso de extrusión/inyección, pero también en el primer ciclo (IDP = 15.18).

En los ciclos 1 a 5 el IDP varía aproximadamente en la misma proporción con una tendencia lineal para los 3 procesos que experimenta el polímero, confirmada por el coeficiente de correlación (R^2) cercano a la unidad, con valores de 0.9972 para extrusión/inyección, 0.9973 para extrusión y 0.9994 en inyección. Esto evidencia un efecto linealmente proporcional del reprocesamiento sobre la degradación del material. También se observa que el proceso de extrusión tiene un efecto de degradación del polímero aproximadamente 2 veces mayor en comparación con el proceso por inyección, esto confirma el hecho de que el proceso de inyección es menos agresivo que el proceso de extrusión.

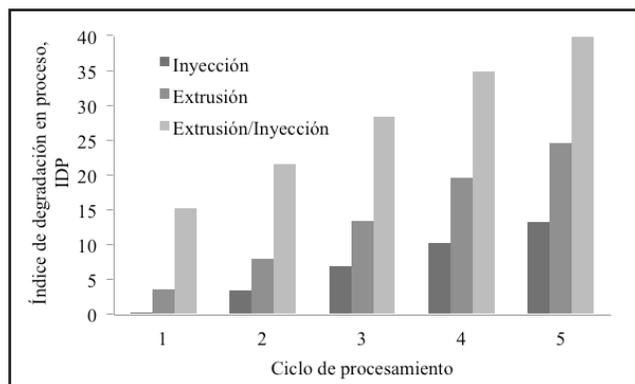


Figura 1. IDP para PEAD-GI procesado por extrusión, inyección y extrusión/inyección

En la figura 2 se compara el IDP para el PLA procesado por extrusión e inyección a través de 5 reprocesamientos. En esta figura se aprecia que el IDP para el PLA presenta la misma tendencia a lo observado para el PEAD-GI (ver figura 1) tanto para extrusión como para inyección. Sin embargo, al comparar la relación del efecto de los dos tipos de procesos, para el PLA se observa que a medida que el material se reprocesa por inyección, su degradación es mayor comparada

con la extrusión, pasando de una degradación similar en los dos procesos para el primer ciclo de procesamiento, a ser tres veces mayor la degradación por inyección, en relación con la extrusión, en el quinto ciclo de procesamiento.

Al comparar las figuras 1 y 2, se aprecia que el IDP tiene valores de entre 0.2 y 40 para el PEAD-GI y entre 10 y 120 para el PLA. Esto confirma que el IDP depende del tipo de polímero, dado que está en función del IF, que es característico de cada polímero. El efecto del tipo de polímero sobre IDP se analiza más adelante. Finalmente, se observa en las dos figuras que, sin importar el tipo de proceso, ambos polímeros sufren mayor degradación a medida que experimentan un mayor número de ciclos de procesamiento.

Efecto de la velocidad de giro sobre el IDP

En la figura 3 se presenta la variación del IDP, para el polímero PEAD-GE, con la velocidad de giro del husillo a 20 y 80 rpm en el proceso de extrusión. En esta figura se observa que a las dos velocidades de giro, en el primer ciclo de procesamiento el polímero experimenta la máxima degradación (IDP de 14.82), esto comparado con la degradación observada entre un ciclo y el siguiente (como por ejemplo entre el ciclo 1 y 2 el IDP se incrementa aproximadamente 8 unidades). Igualmente se ve que la degradación en cada uno de los ciclos respecto al siguiente, disminuye a medida que aumenta el reprocesamiento.

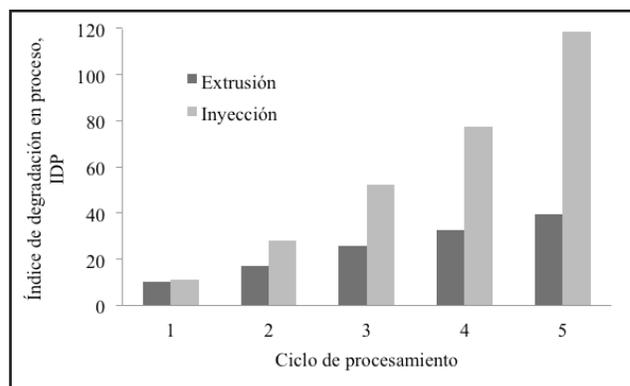


Figura 2. IDP para PLA procesado por extrusión e inyección

También se aprecia que al comparar el IDP a 20 y 80 rpm se obtienen valores similares de este parámetro en cada ciclo para ambos casos. Esto indica que la velocidad de rotación del husillo, en el proceso de extrusión, no afecta apreciablemente la degradación del

polímero. Por lo tanto, los experimentos de extrusión se pueden llevar a cabo a cualquier velocidad de giro del husillo, entre estos dos valores, sin afectar los resultados de degradación del polímero. Es por ello, que a diferencia de estos dos experimentos, los demás ciclos de procesamiento por extrusión se realizaron a una velocidad de giro de 30 rpm.

Efecto del grado del polímero sobre el IDP

Al establecerse que la velocidad de giro del husillo en el proceso de extrusión no afecta considerablemente la degradación del polímero, se puede analizar el efecto del grado del polímero, ya sea grado inyección (figura 1) o grado extrusión (figura 3), sobre el IDP. Al comparar las figuras 1 y 3, se evidencia que el PEAD-GI procesado por extrusión presenta un menor IDP para cada ciclo de procesamiento, comparado con el PEAD-GE; obteniéndose valores de degradación de entre 3 y 25 para el PEAD-GI, y de entre 14 y 38 para el PEAD-GE. Este comportamiento posiblemente se debe al mayor índice de fluidez del PEAD-GI, el cual permite que el polímero fluya sin requerir de un alto esfuerzo mecánico, como se espera que lo requiera el PEAD-GE.

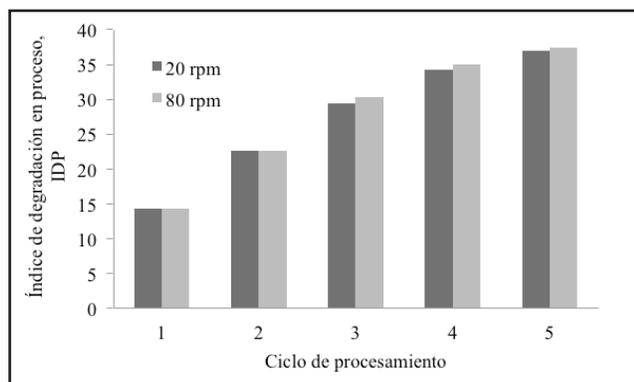


Figura 3. IDP para PEAD-GE procesado por extrusión a dos velocidades de giro de husillo

Efecto del tipo de polímero en el IDP

En las figuras 4 y 5 se muestran los resultados del cálculo del IDP para los polímeros procesados por extrusión (PEBD, PS, PMMA, PEAD-GI, PP y PLA) e inyección (PEAD-GI, PP, PLA y PC), respectivamente. Se puede ver en la figura 4 que en el primer reprocesamiento el PEBD sufrió su mayor degradación, luego descendió hasta el tercer ciclo y posteriormente aumentó levemente hasta el quinto ciclo, esto es al comparar la degradación experimentada por el polí-

mero en un ciclo respecto al siguiente. Este comportamiento indica la existencia simultánea de dos mecanismos de degradación: el rompimiento de la cadena principal (*chain scission*) y el entrecruzamiento (*cross linking*) (Jin *et al.*, 2012). Por lo tanto, se establece que durante los primeros procesamientos el rompimiento en la cadena principal domina sobre el mecanismo de entrecruzamiento. Sin embargo, a medida que aumentan los ciclos de proceso el mecanismo de entrecruzamiento prevalece.

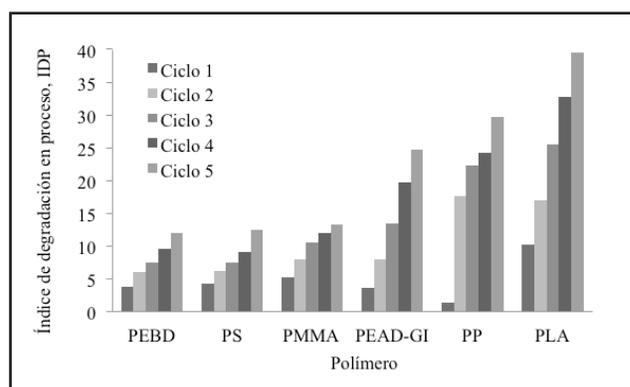


Figura 4. IDP para los polímeros procesados por extrusión

Al igual que el PEBD, el PS sufre su máxima degradación en el primer procesamiento como se observa en la figura 4. Para los ciclos siguientes, el aumento del IDP para el PS es menor que para el PLA y PEAD, esto refleja una mayor estabilidad térmica del PS en comparación con los otros materiales. El PS experimentó incremento en el índice de fluidez con los procesamientos sucesivos (tabla 2), lo cual se relaciona con una disminución en el peso molecular del material causado por mecanismos de rompimiento de la cadena principal (*chain scission*) (Vilplana *et al.*, 2006).

Para el caso del PMMA, se observa una disminución progresiva de la degradación en proceso con cada ciclo de extrusión, siendo así el último reprocesamiento el de menor efecto, respecto a los ciclos anteriores. Lo anterior indica que el efecto degradativo en cada ciclo disminuye con el aumento del reprocesamiento, esto se debe a que el material se vuelve más refractario con el incremento de la temperatura (Badia *et al.*, 2012).

Analizando el PP, se encuentra que su menor degradación la sufre durante el primer ciclo, lo cual indica que este ciclo no afecta considerablemente su estruc-

tura molecular, conservando casi su estabilidad térmica como si fuera virgen. Sin embargo, el segundo ciclo degrada el material en una proporción de casi 8 veces la degradación sufrida en el primer ciclo; siendo esta la mayor degradación sufrida de un ciclo al siguiente por este polímero.

En la figura 4 se observa que, para todos los polímeros, la degradación aumenta con el número de ciclos de procesamiento por extrusión. Sin embargo, unos polímeros se ven más afectados que otros por el proceso de extrusión como es el caso del PP y PLA. Un orden de mayor a menor degradación por extrusión es: PLA > PP > PEAD-GI > PMMA > PS > PEBD.

En la figura 5, para el PP se observa una mayor degradación en comparación con el material procesado por extrusión. Además, se aprecia que para el primer ciclo el IDP del material inyectado es aproximadamente el triple del material extruido (figura 4). Lo anterior posiblemente se debe a la mayor resistencia mecánica que presenta el material durante la inyección, por lo cual el polímero se ve forzado a tener mayor fluidez para ser inyectado. El incremento gradual del índice de fluidez con el reprocesamiento, demuestra que la degradación termomecánica sufrida por este polímero sigue el mecanismo de rompimiento de la cadena principal (*chain scission*) (Wang et al., 2012).

Para el PLA, se encontró que la degradación aumenta progresivamente del primero al último ciclo como se observa en la figura 5. Este incremento, el cual es debido al aumento en el índice de fluidez, refleja la disminución de la viscosidad y la reducción del peso molecular, provocado por la degradación del material en el procesamiento (Carrasco et al., 2010). También se aprecia que el IDP para este polímero, en los dos procesos (extrusión – figura 4, inyección – figura 5) y en cada uno de los reprocesamientos, es mayor en comparación con el IDP del PEAD-GI. Adicionalmente, a excepción del primer ciclo, el PLA presenta mayores valores del IDP respecto al PP inyectado y al PEAD-GI procesado por extrusión/inyección (figura 1). Lo anterior demuestra que el PLA experimenta una mayor degradación en proceso en comparación con otros polímeros. De igual manera se encontró que el incremento del IDP entre cada ciclo de inyección, es aproximadamente el triple que para el obtenido en el procesamiento por extrusión. Esto evidencia una mayor estabilidad en proceso del PLA al ser sometido a extrusión.

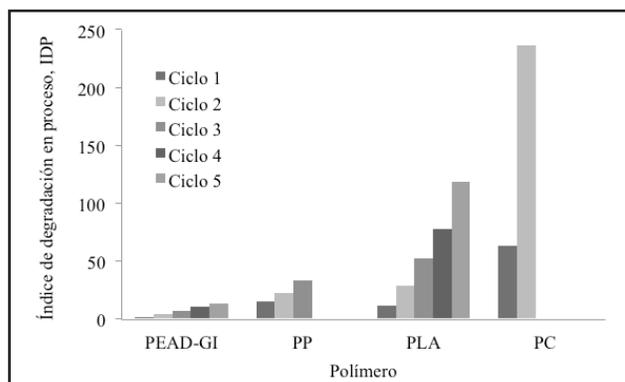


Figura 5. IDP para los polímeros procesados por inyección

El PC únicamente fue procesado en dos ciclos, esto debido al gran incremento en su índice de fluidez en cada proceso. Como se observa en la figura 5, el IDP para PC inyectado en el primer ciclo es mayor que el IDP para el último ciclo de PP y de PEAD-GI extruido e inyectado. Además, se encontró que el IDP del PC en el segundo ciclo es mayor que el IDP del quinto procesamiento del PLA, lo cual indica que el PC se degrada con mayor facilidad que los otros polímeros.

Por lo tanto, en la figura 5 se observa que para todos los polímeros la degradación aumenta con el número de ciclos de procesamiento. Sin embargo, unos polímeros se ven más afectados que otros por el proceso de inyección, como es el caso principalmente del PC, en el que después del segundo ciclo de procesamiento no fue posible medir el índice de fluidez, porque se encontraba por encima del límite superior posible de detección del equipo de análisis. Un orden de menor a mayor degradación por inyección es: PEAD-GI > PP > PLA > PC, esto se explica porque los polímeros PLA y PC son poliésteres que se hidrolizan y despolimerizan fácilmente debido a la presencia de humedad del ambiente, lo cual genera un aumento en la polidispersión que se refleja en un incremento drástico del índice de fluidez.

Razón de cambio de degradación en proceso, RCD

En la figura 6 se presentan los resultados de la razón de cambio de degradación entre el primer y quinto ciclo de procesamiento de los polímeros procesados en extrusión e inyección, dada por la ecuación (2). Como se observa en la figura 6, el PP y el PEAD-GI presentan la mayor razón de cambio de degradación entre los polímeros procesados por extrusión e inyección, respectivamente.

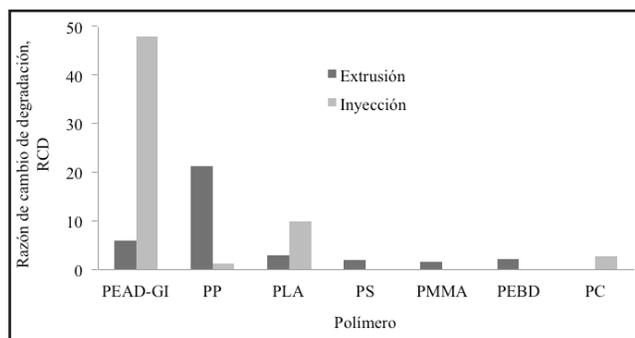


Figura 6. RCD para los polímeros procesados por extrusión e inyección

Este comportamiento refleja la influencia de los ciclos de reprocesamiento en la degradación del polímero. Para el PMMA, el PS y el PEBD procesados por extrusión se tiene un RCD bajo, esto quiere decir que la mayor influencia en la degradación del polímero hasta el ciclo 5, se presenta en el primer reprocesamiento. Para el PC se observa un RCD bajo, a pesar de tener los mayores valores de IDP de todos los polímeros procesados tanto por inyección como por extrusión. Esto muestra que la mayor influencia en la degradación del material se presenta en el primer ciclo de procesamiento. Para el PEAD-GI y el PLA se observa la mayor influencia en la degradación del polímero debido al ciclo 1 en el proceso de extrusión. A diferencia de estos, en el PP se presenta mayor influencia del ciclo 1 en la degradación del polímero durante el proceso de inyección.

Conclusiones

El orden de estabilidad térmica de mayor a menor para los polímeros procesados en cinco ciclos de extrusión es: PEBD>PS> PMMA> PEAD-GI> PP> PLA y para los polímeros procesados por inyección es: PEAD-GI> PP> PLA >PC.

Polímeros como PP y PLA, que presentan mayor degradación térmica en procesos de inyección, son recomendados a ser reprocesamiento por extrusión.

Una velocidad de giro del husillo en la extrusora de entre 20 y 80 rpm no afecta la degradación en proceso del PEAD-GE. Se recomienda hacer lo mismo para otros polímeros y rango mayor de velocidad de giro, para establecer si esta conclusión se puede generalizar.

El PEAD-GI y el PMMA se degradan mediante mecanismos de entrecruzamiento, ramificación y extensión

de la cadena principal. Por el contrario, el PLA, el PS, el PP y el PC se degradan por rompimiento en la cadena principal, mientras que el PEBD sufre degradación debido a mecanismos de rompimiento de cadena y de entrecruzamiento.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de Wisconsin (EE. UU.) por el apoyo en la obtención de las muestras en la extrusora e inyectora, y a la Universidad Nacional de Colombia por el apoyo económico para realizar la pasantía de investigación en la Universidad de Wisconsin.

Referencias

- Badia, J. D., Santonja-Blasco, L., Martínez-Felipe, A., & Ribes-Greus, A. (2012). Reprocessed polylactide: Studies of thermo-oxidative decomposition. *Bio-resource technology*, 114, 622-628.
- Carrasco, F., Pagès, P., Gámez-Pérez, J., Santana, O. O., & MasPOCH, M. L. (2010). Processing of poly (lactic acid): characterization of chemical structure, thermal stability and mechanical properties. *Polymer Degradation and Stability*, 95(2), 116-125.
- Goitisoló, I., Eguiazabal, J. I., & Nazabal, J. (2008). Effects of reprocessing on the structure and properties of polyamide 6 nanocomposites. *Polymer Degradation and Stability*, 93(10), 1747-1752.
- Hamester, L. S., Muñoz, P. A. R., & Canevarolo, S. V. (2015). A new device for in-line colorimetric quantification of polypropylene degradation under multiple extrusions. *Polymer Testing*, 41, 117-123.
- Hermanová, S., Tocháček, J., Jančář, J., & Kalfus, J. (2009). Effect of multiple extrusion on molecular structure of polypropylene impact copolymer. *Polymer Degradation and Stability*, 94(10), 1722-1727.
- Jančář, J., & Tocháček, J. (2011). Effect of thermal history on the mechanical properties of three polypropylene impact-copolymers. *Polymer Degradation and Stability*, 96(9), 1546-1556.
- Jin, H., González-Gutiérrez, J., Oblak, P., Zupančič, B., & Emri, I. (2012). The effect of extensive mecha-

- nical recycling on the properties of low density polyethylene. *Polymer Degradation and Stability*, 97(11), 2262-2272.
- Mendes, A. A., Cunha, A. M., & Bernardo, C. A. (2011). Study of the degradation mechanisms of polyethylene during reprocessing. *Polymer Degradation and Stability*, 96(6), 1125-1133.
- Pandey, J. K., Reddy, K. R., Kumar, A. P., & Singh, R. P. (2005). An overview on the degradability of polymer nanocomposites. *Polymer degradation and stability*, 88(2), 234-250.
- Ramis, X., Cadenato, A., Salla, J. M., Morancho, J. M., Valles, A., Contat, L., & Ribes, A. (2004). Thermal degradation of polypropylene/starch-based materials with enhanced biodegradability. *Polymer degradation and stability*, 86(3), 483-491.
- Ramis, X., Cadenato, A., Salla, J. M., Morancho, J. M., Valles, A., Contat, L., & Ribes, A. (2004). Thermal degradation of polypropylene/starch-based materials with enhanced biodegradability. *Polymer degradation and stability*, 86(3), 483-491.
- Tocháček, J., Jančář, J., Kalfus, J., Zbořilová, P., & Buráň, Z. (2008). Degradation of polypropylene impact-copolymer during processing. *Polymer Degradation and Stability*, 93(4), 770-775.
- Tocháček, J., Jančář, J., Kalfus, J., & Hermanová, S. (2011). Processing stability of polypropylene impact-copolymer during multiple extrusion—Effect of polymerization technology. *Polymer Degradation and Stability*, 96(4), 491-498.
- Tocháček, J., & Jančář, J. (2012). Processing degradation index (PDI)—A quantitative measure of processing stability of polypropylene. *Polymer Testing*, 31(8), 1115-1120.
- Vilaplana, F., Ribes-Greus, A., & Karlsson, S. (2006). Degradation of recycled high-impact polystyrene. Simulation by reprocessing and thermo-oxidation. *Polymer degradation and stability*, 91(9), 2163-2170.
- Wang, K., Addiego, F., Bahlouli, N., Ahzi, S., Rémond, Y., Toniazzo, V., & Muller, R. (2012). Analysis of thermomechanical reprocessing effects on polypropylene/ethylene octene copolymer blends. *Polymer Degradation and Stability*, 97(8), 1475-1484.

Diseño de un sistema alternativo para el tratamiento de aguas residuales urbanas por medio de la técnica de lombrifiltros utilizando la especie *Eisenia foetida*

Jacipt Alexander Ramón,* José Alejandro León y Nelson Castillo

Programa de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Universidad de Pamplona. Ciudad Universitaria, Pamplona.

*Autor para correspondencia: jacipt@unipamplona.edu.co

Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo diseñar y construir un sistema sobre tratamiento de aguas residuales para la ciudad de Pamplona utilizando como base teórica el sistema de tratamiento Tohá creado por el Dr. Jose Tohá de la Universidad de Chile, proponiendo una serie de procesos que permiten el saneamiento de las aguas servidas después de su uso con fines domésticos, industriales o comerciales, para poder ser vertidas finalmente a cuerpos de agua naturales. Este proceso incluye un tratamiento con lombrifiltros (aserrín y *Eisenia foetida*), por donde las aguas residuales pasan seguidamente de una cama de carbón activado filtrando y una cama de grava de piedra, permitiendo oxigenar el agua a partir del goteo que existe entre las camas. Finalmente, el efluente sigue a una cama de piedra de río de gran tamaño y a un decantador para realizar la toma de muestras. De esta manera se obtiene agua tratada con baja carga orgánica dentro de los parámetros que establece la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico CRA en Colombia.

Palabras clave: lombrifiltro, *Eisenia foetida*, tratamiento de aguas, cinética.

Editora: Pataquiva-Mateus, A. Y.

Citation: Ramón, J., León, J. y Castillo, N. (2015). Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Revista Mutis 5(1)*; pag 46-54.

Received: May 10, 2015; **Accepted:** May 25, 2015; **Published on line:** June 30, 2015

Copyright: ©2014 Ramón *et al.* This is an open-access article, which permits unrestricted use, distributions and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Competing Interests: The authors have no conflict of interest.

Design of an alternative system for the treatment of urban waste water by means of the technique of earthworm-filters using the *Eisenia foetida* specie

Abstract

The present research aimed to design and build a system on treatment of wastewater for the city of Pamplona used as a theoretical basis the Tohá treatment system by Dr. José Tohá from the University of Chile, proposing a series of processes that allow the improvement of the wastewater after use



for domestic, industrial or commercial purposes. Wastewater passed through a treatment with earthworm-filters (saw dust and *Eisenia foetida*), followed by a bed of activated carbon and a bed of gravel stone, allowing oxygenation and filtration water due to dripping between beds. Subsequently, wastewater pass through a bed of river stone of large size; and finally, water decants into a collector for sampling. In this way, water treated with low load organic, within the parameters established by the Committee on regulation of drinking water and basic sanitation in Colombia (CRA), was obtained.

Keywords: earthworm-filters, *Eisenia foetida*, water treatment, kinetic.

Introducción

La creciente demanda de los recursos hídricos ha disminuido en las últimas décadas su disponibilidad y deteriorado su calidad, lo que causa un gran impacto en la disminución del acceso a agua segura en la mayoría de las áreas rurales y periféricas urbanas de los países en desarrollo.

Cabe resaltar que cualquier cuerpo de agua es capaz de asimilar cierta cantidad de contaminantes sin ser afectado seriamente debido a los factores de dilución y autopurificación. Hoy en día la presión que reciben las fuentes de agua es creciente, debido al aumento de actividades como agricultura, ganadería, industria, comercio, utilización de agua para regadíos de parques, áreas urbanas, baños sanitarios, etc. Estas actividades producen contaminación por aguas servidas, lo que trae como consecuencia el incremento de enfermedades, principalmente gastrointestinales; y la ausencia del preciado recurso para las actividades de subsistencia como la agricultura y la ganadería.

El sistema Tohá es una alternativa amigable con el medio ambiente (Laws, 2003), que consiste en una serie de procesos que tienen como objetivo eliminar los contaminantes físicos, químicos y biológicos que poseen tanto las aguas servidas como los residuos industriales líquidos. Con el tratamiento se obtiene agua limpia (o efluente tratado) y un residuo sólido denominado lodo o biosólido, que se debe disponer de una manera segura para evitar contaminación y malos olores, contribuyendo a la recuperación del recurso y a disminuir los impactos en la salud y el ambiente (Kusanovic, 2007).

Marco Teórico

Agua contaminada

Se le denomina contaminación natural a la originada por restos animales y vegetales y por minerales y sustancias que se disuelven cuando los cuerpos de agua atraviesan diferentes terrenos. Por otro lado la contaminación artificial es aquella que va apareciendo a medida que el hombre comienza a interactuar con el medio ambiente y surge con la inadecuada aglomeración de las poblaciones y como consecuencia del exponencial aumento del sector industrial (Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York, 2002).

Actividades tales como lavado de automóviles, higiene, limpieza, refrigeración y procesos industriales en general, hacen uso de grandes cantidades de agua con diferentes niveles de contaminación, por lo que es necesario desarrollar nuevos mecanismos para su tratamiento (Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York, 2002).

Aguas residuales

Son llamadas aguas residuales las que resultan después de haber sido utilizadas en domicilios, fábricas o actividades ganaderas, entre otras actividades. Las aguas residuales conllevan grasas, detergentes, materia orgánica, residuos de la industria, además de herbicidas, plaguicida y sustancias tóxicas.

Estas aguas residuales, antes de volver a la naturaleza, deben ser depuradas. Para ello se conducen a las plantas o estaciones depuradoras, donde se realiza el tratamiento más adecuado para devolver el agua a la naturaleza en las mejores condiciones posibles. Todavía existen muchos pueblos y ciudades de nuestro país que vierten sus aguas residuales directamente a los ríos, sin depurarlas. Esta conducta ha provocado que la mayoría de los seres vivos que vivían en esos ríos hayan desaparecido.

Beneficios ambientales del tratamiento de aguas residuales domésticas

Según Freeman (1982), los beneficios ambientales se pueden clasificar en: aquellos que son percibidos por las personas y aquellos que no lo son. Cada categoría mencionada por Freeman puede describir cómo se perciben estos beneficios dentro de un sistema de

mercado, por ejemplo la gran disponibilidad y bajos precios de bienes para el consumidor; o a través del incremento de la disponibilidad de los bienes y servicios que no son normalmente comprados en el mercado; por ejemplo: mejora en las condiciones del ambiente como la visibilidad, alta calidad del agua para la recreación, etc. La primera categoría es llamada “el efecto mercado” y la segunda el “efecto de no mercado”.

Para Freeman (1982), existen tres etapas en la producción de beneficios para el mejoramiento del ambiente, los cuales se producen a través de políticas de control de la contaminación. La primera etapa es casi completamente no económica en naturaleza, porque involucra una variedad de procesos físicos, químicos y biológicos; la segunda etapa involucra las interfaces entre la etapa no económica y la producción de los beneficios; mientras que la tercera etapa es totalmente económica porque involucra teoría de demanda y producción y la teoría de valor económico (Beascochea, 2005).

Materiales Y Métodos

Descripción del lombrifiltro

Es un sistema de tratamiento de aguas servidas basado en la tecnología de lombrices (*Eisenia foetida*), que por sus características físicas o estructurales tiene alta eficiencia en la remoción de materia orgánica y organismos patógenos. Este es un biofiltro compuesto de cuatro estratos o lechos filtrantes de diversos materiales, a través del cual se hace pasar el agua servida. La capa superior consiste en un material orgánico con un gran número de microorganismos y lombrices. Cuando el agua residual pasa a través del lecho filtrante o sustrato, estos organismos absorben y digieren la materia orgánica eliminando su principal contaminante que son los residuos sólidos patógenos presentes en las aguas servidas (Fernandez, 2011).

El lombrifiltro fue construido como sigue: se tiene un tanque alimentador de 48 m³, el cual vierte al biofiltro con un volumen de agua de 100 ml/min en un tiempo de media hora, pasando el agua por una tubería de PVC de 12” de diámetro de acueducto, por tres llaves de válvulas de corte conectadas en serie una de la otra, por lo cual una vez el agua pasa por las llaves de corte, esta se dirige al biofiltro, repartiéndose en tres tubos de PVC agujerados para permitir un

caudal continuo y estable, de esa manera podrá ser repartida homogéneamente el agua servida al sustrato del lombrifiltro.

Existe un lecho filtrante de aserrín con lombriz, seguido de un estrato de antracita que permite eliminar las impurezas presentes en el agua, para posteriormente ser filtrada por un lecho de triturado de piedra de río, para que finalmente esta agua servida se siga filtrando por un último lecho de piedra de río. Estas piedras ayudarán a obtener un líquido más limpio y tratado con menos impurezas y más claro para poder ser entregado a las cuencas de los ríos, dentro de los parámetros de la normatividad colombiana (Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico – CRA)

Por consiguiente, una vez el agua es filtrada por cada uno de los lechos del lombrifiltro, puede ser utilizada para el riego de cultivos, siendo esta apta para el consumo humano. De otra manera, estos lechos sin lugar a dudas proveen soporte, aireación y un excelente manejo ambiental al sistema, en el cual el agua pasa a través del biofiltro por gravedad y emerge claramente y sin materia orgánica.



Figura 1. Montaje del lombrifiltro

Toma de muestras y descripción analítica

La metodología utilizada para el proceso de validación de los métodos analíticos DQO, DBO₅, sólidos suspendidos totales (SST) y sólidos suspendidos volátiles (SSV) está basada en el “procedimiento general de validación de metodologías analíticas” propuesto por la guía de laboratorio de química ambiental y bioprocesos de la Universidad de Pamplona.

El punto de muestreo que se escogió para la toma de muestras es el colector que vierte las aguas residuales urbanas, que se encuentra ubicado en las coordenadas del punto X = 1307577; Y = 1158341, frente a la Estación de Policía y al Terminal de Transporte del municipio de Pamplona, Norte de Santander (Colombia).

Se propuso un muestreo simple con el fin de identificar la fuente y evaluar los efectos potenciales en los procesos de tratamiento, determinando las características de descarga instantánea a diferentes horas del día (2:00, 4:00 y 6:00 p. m.) en el punto de muestreo. A las muestras obtenidas de este punto, se les realizó una caracterización de los parámetros fisicoquímicos (DQO, DBO₅, SST, SSV, conductividad eléctrica, pH, temperatura, oxígeno disuelto), y se estableció como hora de recolección para el proyecto las 2:00 p. m., ya que esta hora arrojó en los análisis de laboratorio de control de calidad mayor carga orgánica y se comportó más estable en comparación con las otras horas.

Diseño del lombrifiltro

En el diseño del sistema piloto del lombrifiltro se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros de diseño: caudal, velocidad, tiempo de retención hidráulico, profundidad, ancho y largo de la caja, y altura del sistema; parámetros que intervinieron en el proceso para reducir los índices de contaminación de las aguas residuales urbanas (Orozco, 2014).

Los lechos fueron clasificados de la siguiente forma: aserrín con lombriz (dos lechos), seguidos de un lecho con antracita, pasando luego por un lecho de triturado de piedra, para finalmente colocar un lecho de piedra de río como se observa en la figura 2; permitiendo filtrar y oxigenar este líquido sin llegar a generar malos olores. Debido a que el proceso es aerobio, el agua filtrada por cada uno de los lechos filtrantes se recolecta en el último recipiente, que es usado para la toma de muestras de laboratorio.



Figura 2. Lombrifiltro con cada lecho. De arriba a abajo: aserrín + lombriz (dos primeros cajones), antracita, triturado y bolones de piedra

Diseño del lombrifiltro en bandejas de vidrio

Cada bandeja contiene una capa de 10 cm de alto de cada material (aserrín, antracita y grava), excepto las piedras de río que contienen una altura de 7 cm debido a su gran tamaño y peso, que pueden ocasionar daño a la estructura del lombrifiltro. Inicialmente se alimentó el sistema del lombrifiltro con un caudal mínimo de 0,05 l/min el cual se determinó para poder suministrar al lombrifiltro un caudal continuo durante 12 horas con el fin de obtener una óptima eficiencia en el sistema. Con el propósito de evaluar el grado de remoción de materia orgánica, se caracterizaron los efluentes a través de los siguientes parámetros: demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales y volátiles (SST – SSV), oxígeno disuelto, conductividad, pH y temperatura; de igual manera se realizaron análisis de pH al sustrato de la lombriz manteniéndose este entre 7 y 7,5 sin que llegase a alterar las muestras del agua o algún daño a la lombriz misma.

El sistema se alimentó diariamente con caudal continuo por un período de 90 días, el cual alcanzó el mayor rendimiento en el proceso de remoción de materia orgánica en un 92,06 %; indicando que el proceso ya se encuentra en condiciones estables y de mayor remoción. El rendimiento del lombrifiltro se estipuló por el sustrato de entrada menos el de salida como DQO Y DBO₅ y la producción de biomasa como SSV, después de estar este en estabilidad de los muestreos

cada 0,25, 0,5, 1, 2, 3, 6, 12 y 24 horas; cada diez horas se le agregaba agua sin tratar al recipiente de suministro, de las doce horas que tardaba en agotarse a este sistema por gravedad el agua a filtrar.

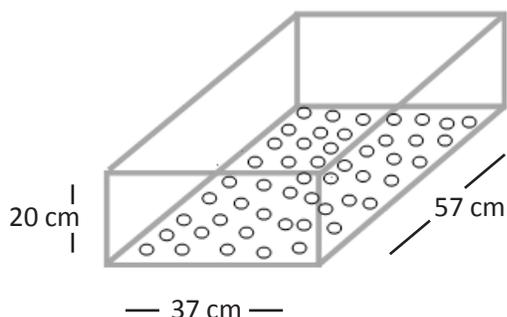


Figura 3. Dimensiones de cada uno de los cajones que conforman el lombrifiltro

La tabla 1 indica el valor del volumen de cada estrato dispuesto en el lombrifiltro, que cuenta con cajones de 42180 ml cada uno.

Tabla 1. Volúmenes ocupados por los estratos que conforman el lombrifiltro construido

ESTRATO	VOLUMEN (ml)
Aserrín	15817,50
Antracita	14235,75
Grava	11335,88
Piedra	8857,80

La selección de los caudales se realizó mediante las diferentes aperturas de la válvula de entrada de agua al lombrifiltro, y se especifican en la tabla 2.

Tabla 2. Tiempo de retención y caudales utilizados en el modelado y simulación en Matlab®

NOMENCLATURA	CAUDAL (l/min)
Q1	0,050
Q2	0,147
Q3	0,450
Q4	0,614
Q5	0,846

Los tiempos de retención hidráulica (TRH) fueron medidos como el tiempo que demora el agua en pasar por el estrato e iniciar su aparición en el fondo de este, empleando cada uno de los caudales seleccionados.

Tabla 3. Tiempos de retención hidráulica para cada uno de caudales seleccionados.

ESTRATO	TIEMPOS DE RETENCIÓN HIDRÁULICA (h)				
	TRH ₁	TRH ₂	TRH ₃	TRH ₄	TRH ₅
Aserrín	8,96	3,05	1,00	0,73	0,53
Antracita	2,28	0,78	0,25	0,19	0,14
Grava	3,25	1,10	0,36	0,26	0,20
Piedra	2,81	0,96	0,31	0,23	0,17

Los datos provenientes de las tablas 1, 2 y 3; se utilizaron para modelar, simular y hallar el rendimiento del lombrifiltro por medio del programa Matlab®.

Constantes cinéticas y estequiométricas

Los modelos utilizados para determinar las constantes cinéticas k y k_s en el lombrifiltro, normalmente están compuestos por el submodelo hidráulico y balances

de masa con términos de generación y remoción de masa afectados por constantes cinéticas, a través de los datos obtenidos en el laboratorio de control y calidad de la Universidad de Pamplona.

A partir, de la ecuación 1, de remoción de sustrato de Lineweaver-Burk que describe la velocidad específica de utilización de sustrato. Se graficó la pendiente recta de regresión que estima k_s/k y la ordenada al origen $1/k$. (McKinney, 1974).

$$\frac{1}{U} = \frac{iX}{S_o - S} = \frac{k_s}{k} = \frac{1}{S} + \frac{1}{k}$$

U= θ tasa neta de remoción de sustrato (días).
 X= biomasa en el reactor (mg SSV/L).
 S_o= Sustrato en el reactor (mg DQO/L).
 KyK_s= Constantes cinéticas. (d⁻¹).

En primer lugar, se obtienen los datos en una tabla de coeficiente cinético y estequiométrico, donde se determina el caudal 1, tiempo de detención respecto al primer caudal (71,429 l/día) y el comportamiento de sustrato y biomasa en los cinco puntos de control.

De acuerdo a la figura 4 y a la tabla de coeficiente cinético y estequiométrico, se determinaron las constantes k_o y k_m de remoción de sustrato por medio de la ecuación de Lineweaver-Burk, obteniendo como dato de partida el coeficiente estequiométrico de remoción Y = 0.0002x

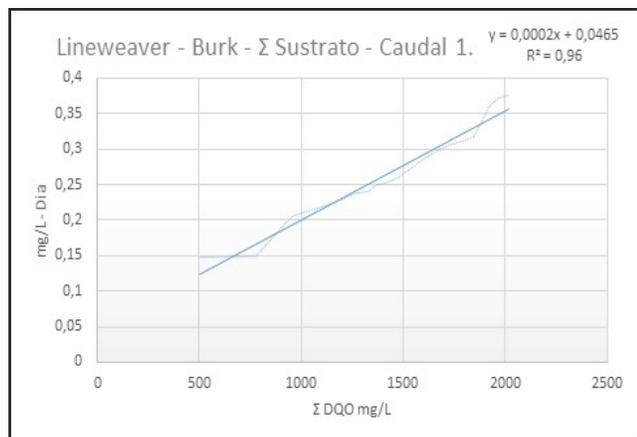


Figura 4. Recta de regresión para hallar K y Ks

Al mismo tiempo, de acuerdo a la figura 5 y la tabla número 4, en el caudal 1 se determinó las constantes Y y 1/θ de crecimiento de biomasa por medio de la ecuación de Lineweaver–Burk, obteniendo como dato de partida el coeficiente estequiométrico de crecimiento Y = 1.9735x

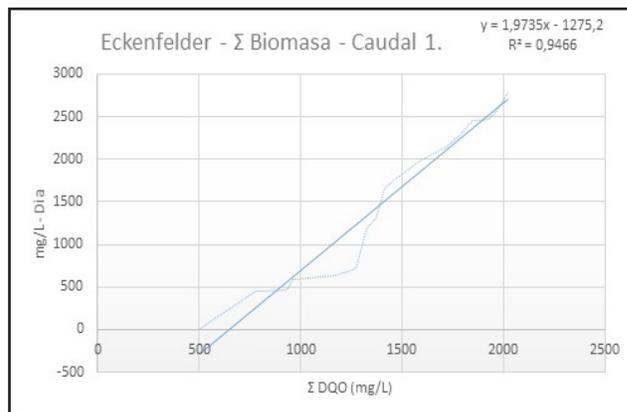


Figura 5. Recta de regresión para hallar Y y 1/θ

Tabla. 5. Constantes de sustrato y biomasa

CAUDAL	CONSTANTES			
	K _o =K _s (d ⁻¹)	K _m =k _e (mg DQO/l) (d ⁻¹)	Y (mg SSV /mg DQO)	1/θ (d ⁻¹)
Q1	21,51	0,043	0,563	1,575
Q2	30,00	0,033	0,498	1,375
Q3	34,28	0,371	0,414	1,272
Q4	37,34	0,060	0,235	1,138
Q5	39,55	0,022	0,218	1,047

Resultados y Discusión

Con la utilización del lombrifiltro, se obtuvieron impactos positivos en la calidad del agua que se vierte a los cuerpos de agua o al subsuelo, en conclusión al tratamiento que es muy eficiente en la remoción de los contaminantes y microorganismos patógenos, presentando reducciones superiores al 90 %. En mención de los análisis de resultados obtenidos en los parámetros fisicoquímicos del laboratorio como son pH, temperatura, oxígeno disuelto, conductividad, demanda química de oxígeno (DQO), demanda biológica de oxígeno (DBO5), sólidos suspendidos totales (SST) y los sólidos suspendidos volátiles (SSV), se determinó la eficiencia del proceso y el buen funcionamiento del lombrifiltro.

La evaluación del rendimiento del sistema de lombrifiltro se determinó a partir del comportamiento de la DQO durante el proceso y los SSV como la de biomasa del sistema.

En la figura 6 se puede observar el rendimiento del sistema de lombrifiltro, indicando un rendimiento máximo del 92,06 % del sistema, por la sumatoria de los tiempos de retención hidráulicos vs. sustrato de salida del lombrifiltro, a comparación de otras tecnologías existentes en la remoción de sustrato como por ejemplo lodos activados, UASB, lagunas de estabilización y oxidación, humedales artificiales de flujo superficial y reactores discontinuos (RAS, 2000).



Figura 6. Rendimiento del lombrifiltro

Por otra parte, en la figura 7 se demuestra cómo disminuye la carga orgánica que ingresa al sistema del lombrifiltro, obteniéndose como resultado la remoción de DQO en porcentajes con respecto a los tiempos de retención hidráulicos (TRH) trabajados anteriormente. Se puede observar cómo el lombrifiltro consume casi en su totalidad la DQO de entrada dependiendo del TRH.

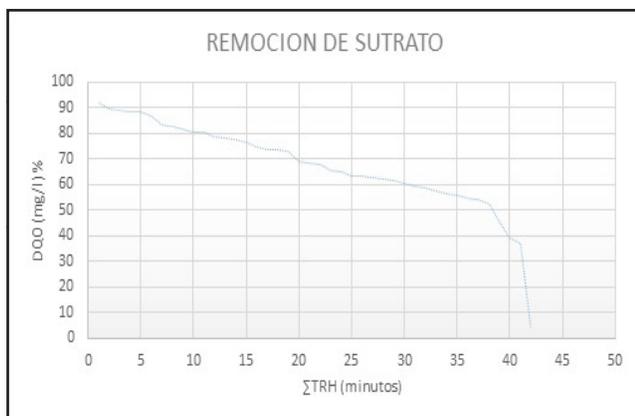


Figura 7. Remoción de sustrato

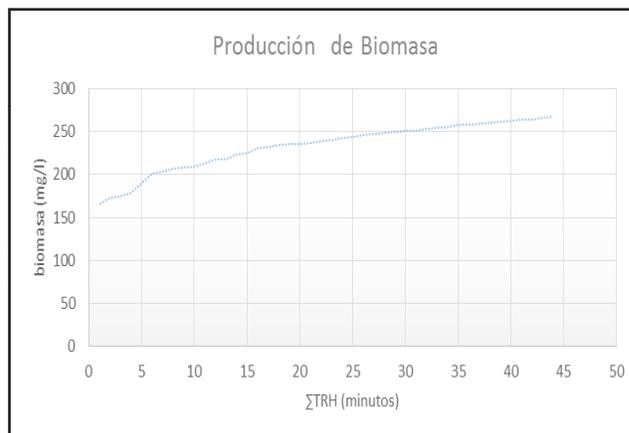


Figura 8. Producción de biomasa

Para evaluar la eficiencia del lombrifiltro, esta se determinó por medio de análisis de laboratorio de las muestras de agua residual urbana obtenidas a través del colector principal del municipio de Pamplona, midiéndose los parámetros fisicoquímicos (DQO, DBO₅, SST, SSV), y la remoción de coliformes totales y fecales; y obteniéndose como resultado un sistema que cumple con más del 92 % de eficiencia en la disminución de carga orgánica del efluente del lombrifiltro como se puede observar en la tabla 8.

Tabla 8. Porcentaje de DQO

DQO ENTRADA (mg/L)	DQO SALIDA (mg/L)	DQO REMOVIDA (%)
542	43	92,066
771	81	89,494

El tiempo de proceso para obtener el 92,066 % fue de 182 días después del arranque del lombrifiltro, a una temperatura de entre 17 y 20 °C, pH entre 6,6 y 8, oxígeno disuelto 0,3-0,95 mg/L, conductividad eléctrica entre 722-895 µs/cm, DQO entre 542-771 mg/L, SSV entre 162-245 mg/L, y SST entre 234-330 mg .

La eficiencia obtenida de 89,5% tardó un tiempo de 33 días empleando las condiciones antes mencionadas. Los métodos utilizados para el análisis fisicoquímico del agua residual urbana fueron realizados en el

laboratorio de control de calidad y utilizando la guía de laboratorio química ambiental y bioprocesos. El lombrifiltro obtuvo una eficiencia del 92,1 % de remoción de materia orgánica a partir de la DQO.

Por consiguiente, la técnica de tratamiento de aguas residuales urbanas utilizando el lombrifiltro es una alternativa viable y estable. Cabe resaltar que el efluente obtenido en el lombrifiltro presenta unas propiedades libres de sólidos suspendidos dando cumplimiento a la normativa actual (Decreto 3930 de 2010 y Ley 373 de 1997) sin sólidos suspendidos apreciables (< 20 mg/l), lo que facilita su manejo con fines de reuso.

Obtención de las ecuaciones para lombrifiltro de biomasa y sustrato derivadas de la fórmula de Runge-Kutta para modelación y simulación en Matlab®

En las ecuaciones 2 y 3 derivadas de la fórmula de Runge-Kutta según autor (Romero, 2008), se observan los valores de las constantes cinéticas obtenidas de biomasa (SSV) y sustrato (DQO) para los caudales tratados, citando las constantes cinéticas de mayor remoción de sustrato en esta investigación, para el tratamiento de las aguas residuales urbanas por medio del lombrifiltro.

$$\frac{dx}{dt} = \frac{Q_0 \left(\frac{l}{\min} \right)}{V(\text{cm}^3)} X_0 \left(\frac{mg}{l} \right) - \frac{Q_0 \left(\frac{l}{\min} \right)}{V(\text{cm}^3)} X_e \left(\frac{mg}{l} \right) + \left(Y \left(\frac{mg}{mg} \right) \frac{SSV}{DQO} \right) * \frac{ds}{dt} \left(\frac{mg}{dias} \right) - K_e (d^{-1}) * X_e \left(\frac{mg}{l} \right) \quad (2)$$

2. Ecuación de sustrato

$$\frac{ds}{dt} = \frac{Q \left(\frac{l}{\min} \right)}{V(\text{cm}^3)} S_0 \left(\frac{mg}{l} \right) - \frac{Q \left(\frac{l}{\min} \right)}{V(\text{cm}^3)} S_e \left(\frac{mg}{l} \right) - \frac{KS}{K_e (mgDQO/L * d - 1) + S \left(\frac{mg}{l} \right) / X \left(\frac{mg}{l} \right)} \quad (3)$$

Conclusiones

Se estudió el comportamiento del lombrifiltro por medio de un análisis de laboratorio a los parámetros DQO, DBO₅ – SST – SSV, a la entrada y a la salida del sistema. De igual forma, se verificó que la carga del afluente era bastante alta en comparación con la del efluente, obteniendo una eficiencia del 92,06 % de remoción de carga orgánica en el sistema de lombrifiltro.

El diseño del sistema piloto de tratamiento de aguas residuales con lombrifiltros tuvo como finalidad estudiar todos los factores que intervienen directamente en el sistema como son: temperatura, pH, caudal, tiempo de retención hidráulico, constantes de remoción de sustrato y producción de biomasa, concentración de la carga orgánica, y la cantidad de lombrices ingresadas al estrato de aserrín, que permitieron altas eficiencias y rendimientos en el sistema.

De igual forma, la variedad de los lechos utilizados permitió obtener buenos resultados a nivel de laboratorio en la etapa de aserrín + lombriz, como también en la de antracita, que posibilitaron remover alta carga orgánica y sólidos en el agua residual urbana; determinando altas eficiencias al pasar por cada lecho del sistema, obteniéndose un agua más clara, sin olor y oxigenada. Cabe resaltar también que el triturado utilizado seguido de piedra de río, intervienen mucho en la remoción y oxigenación del agua filtrada.

El modelado y la simulación del sistema de lombrifiltros permitieron verificar, de acuerdo a las fórmulas de ecuaciones diferenciales de Runge-Kutta y halladas las constantes K de sustrato y biomasa a partir de las figuras, una tendencia decreciente (Orozco, 1974 y McKinney, 1974). Se determinó el comportamiento del sustrato al ser removido, mediante una cinética de orden variable en reactores de mezcla completa, consumiendo la DQO contraria a la de biomasa. De igual forma se utilizaron las ecuaciones de Orozco (1974) mostrando una figura creciente determinando que la biomasa genera SSV. A partir de estas constantes cinéticas se diseñó un software a través de la aplicación *Guide* de Matlab® 2012 utilizando ecuaciones universales de balance materia.

Referencias

- Banks, Ch. (1979). *Algunos factores microbiológicos, bioquímicos, ecológicos y su aplicación al diseño y operación de procesos biológicos*. ACISA, Cali.
- Barnard, J. L., et al. (1972). "Design Optimization for Activated Sludge and Extended Aeration Plant", 6th Int. Conf. of the IAWPR, Israel.
- Beascochea, Eduardo de Miguel; Curt F., María Dolores y Fernández González, Jesús. (2005). *Reportaje sobre la depuración de aguas mediante filtros verdes en el medio rural*. Madrid, España.

- Brey W. S. (1978). *Physical chemistry and its biological applications*, Academic Press.
- Celis Hidalgo, José, Junod Montano, Julio y Sandoval Estrada, Marco. (2008). Recientes aplicaciones de la depuración de aguas residuales. *Revista Theoria, Ciencia, Arte y Humanidades*. 14(1), 17-25.
- Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York. (2002). *Manual de tratamiento de aguas negras*. México: Editorial Limusa, Noriega Editores.
- Fernández, P, Raúl (2011), *Sistema de aguas residuales a través de "Sistema Tohá"*. Recuperado de: www.sistematoha.cl
- Freeman, Myrick. (1982). Air and water pollution control a benefit-cost assessment. New York: Wiley. 186 p.
- Kusanovic, M. (2007). Proyecto construcción de planta de tratamiento de riles del Matadero Magallanes Ltda. Postulado por AVF Ingeniería Ltda. Aprobada por Conama con resolución exenta N° 150 con fecha de diciembre del 2007. Punta Arenas, Chile.
- Laws, J. E. A. (2003). Evaluación ambiental del sistema Tohá en la remoción de salmonella en aguas servidas domésticas. *Magíster en Gestión y Planificación Ambiental*. Universidad de Chile, Santiago. 92 p.
- Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York. (2002). Manual de tratamiento de aguas negras. México: Editorial Limusa, Noriega Editores.
- McKinney, R. E. (1974). Design and Operational Model for Complete Mixing Activated Sludge System, *Biotechnology and Bioengineering*, Vol. 14.
- Martínez, S. Rodríguez M. (2005). *Tratamiento de aguas residuales con Matlab®*. Universidad Autónoma Metropolitana, México: Editorial Reverté S. A.
- Orozco, A. (1977). Teoría de la remoción de sustrato soluble en plantas de lodos activados Bogotá: *Revista Acodal*.
- Orozco, A. (2014). *Bioingeniería de aguas residuales*. Segunda edición, Bogotá: Editorial Acodal.
- RAS. (2000). *Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico Título E*. Minvivienda, Colombia.
- Romero, Jairo Alberto. (2008). *Tratamiento de aguas residuales teoría y principios de diseño*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Universidad Austral de Chile. (2004). *Estudio de factibilidad de la aplicación del sistema Tohá en la planta de tratamiento de aguas servidas de Valdivia*. Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil en Obras Civiles. U. Austral de Chile, Valdivia.

Diseño de sistemas de energía solar fotovoltaica para usuarios residenciales en Chía, Cundinamarca

Ana Katherine Rodríguez Manrique,¹ Ángela Inés Cadena Monroy²
y Andrés Julián Aristizábal Cardona^{3*}

¹Universidad de los Andes, Ingeniería Eléctrica, kath-rod@uniandes.edu.co

² Universidad de los Andes, acadena@uniandes.edu.co.

³Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Departamento de Ingeniería, Bogotá, Colombia

*Autor para correspondencia: andresj.aristizabal@utadeo.edu.co

Resumen

En este documento presentamos un análisis técnico y económico para el uso residencial de sistemas fotovoltaicos interconectados a la red eléctrica (BIPVS por sus siglas en inglés) para usuarios estrato 6 en el municipio de Chía, Cundinamarca.

Los estudios fueron realizados para tres tipos de vivienda de una constructora para cubrir el 100 %, 70 % y 40 % de los perfiles de carga de las viviendas.

Los resultados indican que, gracias a las nuevas políticas gubernamentales (Ley 1715 de 2014) para incentivar tecnologías de generación no convencional, la recuperación de la inversión inicial del proyecto con las condiciones actuales puede llevarse a cabo en alrededor de 7 años y medio para el 100 % de la demanda residencial analizada.

Palabras clave: sistemas fotovoltaicos, energía solar, generación distribuida.

Editora: Pataquiva-Mateus, A. Y.

Citation: Rodríguez, A., Cadena, A., y Aristizábal, J. (2015). Diseño de sistema de energía solar fotovoltaica para usuarios residenciales en Chía, Cundinamarca. *Revista Mutis 5(1)*; pag 55-65.

Received: April 20, 2015; **Accepted:** May 20, 2015; **Published on line:** June 30, 2015

Copyright: ©2015 Rodríguez *et al.* This is an open-access article, which permits unrestricted use, distributions and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Competing Interests: The authors have no conflict of interest.

Design of photovoltaic solar energy systems for residential users in Chía, Cundinamarca

Abstract

Summary In this paper we present a technical and economic analysis for residential PV systems interconnected to the grid (BIPVS - for its acronym in English) for users layer 6 in the town of Chia, Cundinamarca.

The studies were carried out for three types of housing construction to cover 100%, 70% and 40% load profiles of homes.



The results indicate that thanks to new government policies (Law 1715 of 2014) to encourage non-conventional generation technologies; the recovery of the initial investment of the project with the current conditions can be carried out at about 7 and a half years for 100% of the analyzed residential demand.

Keywords: photovoltaic systems, solar energy, distributed generation.

Introducción

Con el creciente uso de la generación de electricidad distribuida a nivel mundial, se hacen necesarios estudios que contemplen la viabilidad tanto técnica como económica de la instalación y uso de fuentes de energía renovable a nivel residencial.

Con el fin de apoyar e incentivar el uso de este tipo de generación de energía, diversos países han implantado estrategias económicas que contemplan la financiación inicial de los proyectos, así como también la compra del kWh generado de forma distribuida, a precios que alcanzan a triplicar el costo del kWh generado térmica o hidráulicamente.

La energía fotovoltaica es una tecnología que ha tomado fuerza a nivel mundial en los últimos años. Los países desarrollados se están preocupando por el cuidado del medio ambiente y se han focalizado en generar energía con fuentes renovables. La energía solar fotovoltaica no emite ruido, emisiones dañinas o gases contaminantes, no necesita mantenimiento después de instalada y se puede conectar directamente a la red de forma descentralizada. Esta tecnología se ha venido difundiendo en muchos países que tienen metas de reducción de gases efecto invernadero (GEI) y se espera que los costos de inversión e instalación –su principal barrera de entrada–, desciendan rápidamente.

En este trabajo se pretende, en primer lugar, evaluar la viabilidad técnica y económica de implementar sistemas fotovoltaicos integrados en proyectos de vivienda (BIPV por sus siglas en inglés – Building Integrated Photovoltaic System); y en segundo lugar sensibilizar a los constructores y operadores de red sobre la posibilidad de adelantar proyectos demostrativos de introducción de energía fotovoltaica en el mercado colombiano.

Colombia cuenta con niveles importantes de radiación solar, el promedio multianual de la radiación solar global es de 4,5 kWh/m², destacándose la península de la Guajira con un valor promedio de 6,0 kWh/m² y la Orinoquía con un valor un poco menor. En la sabana de Bogotá la radiación global está entre 3,57 kWh/m² y 4 kWh/m², lo que significa que las horas de sol estándar son superiores a 3,57.

En el caso colombiano, además del alto costo de la inversión, habría que eliminar otra barrera, regulatoria, para posibilitar la venta de electricidad a la red por parte de los consumidores. Hay un mercado mayorista y un mercado minorista de electricidad en el país. El mercado de generación eléctrica en Colombia tiene 4 formas de transar la energía: un mercado *spot*, un mercado de contratos bilaterales, un mercado de confiabilidad y un mercado de reservas. La producción se realiza mediante un despacho de generación centralizado, en el que participan plantas en su mayoría hidráulicas y térmicas (gas y carbón) mayores de 10 o 20 MW, que hacen sus ofertas de disponibilidad y precio y producen según su mérito o competitividad. Las energías alternativas tienen dificultades para competir por sus mayores costos de inversión, como se dijo; y las intermitentes no podrían contar con un cargo por confiabilidad, la señal que busca garantizar la expansión en el país. El mercado minorista está muy poco desarrollado, y se anticipa que la masificación de medidores inteligentes, muy avanzada en otros países, facilite la participación de la demanda y operaciones de compraventa de energía.

En este trabajo se evalúan distintos escenarios para identificar la viabilidad y factibilidad técnica y económica de una instalación fotovoltaica que supla energía eléctrica para una urbanización en la sabana de Bogotá, más específicamente en un conjunto residencial en Chía. Para comenzar se evalúan diferentes tecnologías y proyectos existentes, así como los incentivos a nivel internacional y nacional. Los resultados indican que los aún altos costos de inversión no facilitan una penetración amplia de estos sistemas y se propone la realización de proyectos demostrativos impulsados por constructores y operadores de red como mecanismo para introducir la energía fotovoltaica al mercado colombiano y mostrar su factibilidad para alimentar consumos residenciales e intercambiar energía con la red de distribución eléctrica.

El artículo se encuentra organizado de la siguiente forma: en el capítulo 2 se realiza la selección del punto de ubicación de los sistemas fotovoltaicos, así como también el diseño técnico de los mismos. En el capítulo 3 se evalúa la viabilidad técnica y económica del proyecto y en el capítulo 4 se presentan las conclusiones del estudio.

Selección de la ubicación y dimensionamiento del proyecto

Con el fin de cumplir con los objetivos propuestos en el proyecto, fue necesario seleccionar una ubicación específica para el desarrollo del mismo. El lugar escogido para tal fin fue el municipio de Chía, aprovechando su cercanía a uno de los proyectos piloto de Colombia para así facilitar las investigaciones relacionadas con las mediciones de radiación solar en la zona. La urbanización en la que se realizaron los estudios está ubicada vía a Cajicá, km 2 al norte de Centro Chía.

Para el desarrollo de este proyecto fue necesario identificar previamente las etapas en las que este estaría dividido. Las primeras etapas identificadas a estudiar fueron las siguientes:

- Disponibilidad del recurso energético en la sabana de Bogotá.
- Dimensionamiento técnico e instalación del sistema fotovoltaico interconectado para varios casos (base y escenarios).
- Comportamiento de la red eléctrica frente a la instalación de un sistema fotovoltaico interconectado.

Disponibilidad del recurso energético

En esta primera etapa se investigó el recurso energético solar disponible en la sabana de Bogotá. Para esto fue necesario acudir al Atlas de Radiación Solar de la UPME en donde se evidencia que el promedio multianual de la radiación solar global en la sabana de Bogotá es de 4 kWh/m² (ver figura 1). Adicionalmente a este dato, el Grupo de Materiales Semiconductores y Energía Solar de la Universidad Nacional de Colombia ha realizado investigaciones para un proyecto piloto ubicado en la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, en el que encontraron que la radiación solar en la sabana de Bogotá es de 3,57 kWh/m². Lo que significa que las horas de sol estándar en Chía son 3,57 HSS.

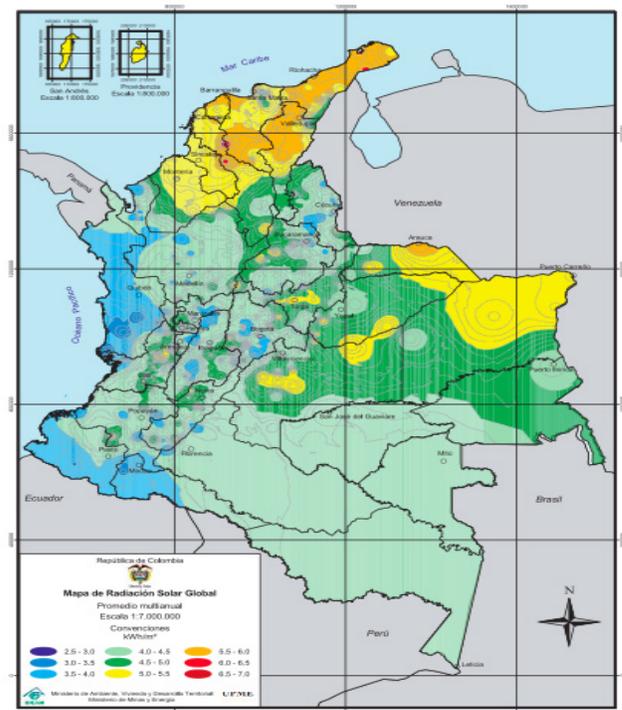


Figura 1. Mapa de radiación solar global

Para estudiar la disponibilidad del recurso energético en la sabana de Bogotá y el dimensionamiento técnico del sistema, se utilizaron los datos analizados por el Grupo de Materiales Semiconductores y Energía Solar de la Universidad Nacional de Colombia. Posteriormente fue estudiada la viabilidad de instalación en la urbanización gracias a la información entregada por parte de la constructora.

Dimensionamiento técnico y diseño del sistema fotovoltaico para un caso base

Esta es una de las etapas más importantes del proyecto, pues en esta se definen la carga del sistema y los elementos a instalar. También se analiza el impacto que tiene la instalación fotovoltaica sobre la construcción.

Dimensionamiento técnico

Existen dos maneras de dimensionar el sistema fotovoltaico: la primera, partiendo de la disponibilidad económica para determinar la capacidad de potencia de la planta y la otra partiendo de la demanda de energía para conocer el costo total de la instalación. Para llevar a cabo el dimensionamiento técnico de este proyecto, se partió de la demanda energética promedio de una casa de estrato 6 ubicada en Chía.

Tabla 1. Consumo mensual promedio y valor facturado por unidad de consumo de los últimos tres años para el sector residencial de estrato 6 en Chía

Año	Estrato	Nº de usuarios	Consumo promedio anual (kWh)	Valor facturado por unidad de consumo (\$)
2012	6	936	5148	338,64
2013		987	5547	346,45
2014		1036	5636	361,27

La tabla 1 muestra los consumos promedio mensuales de los últimos tres años para una casa de estrato 6 en Chía, los cuales promedian un valor aproximadamente de 453,64 kWh-mes. Con este dato se puede encontrar la potencia que debe generar el generador fotovoltaico (módulos fotovoltaicos) para suplir la carga de una casa estrato 6 en Chía.

$$P_{GFV} = \frac{E}{HSS * N * PR}$$

Ecuación 1. Potencia a la salida del generador fotovoltaico

Con la ecuación 1 se puede encontrar la potencia que deberá suplir el generador fotovoltaico a partir del consumo promedio mensual investigado anteriormente, donde:

E: energía consumida mensualmente (kWh-mes).

HSS: horas de sol estándar de la zona (para este caso 3,57h).

N: número de días en el que consume la energía E (30 días).

PR: factor de rendimiento del sistema (0,7 a 0,8).

Inversor

Según la ecuación 1, la potencia que debe producir el generador fotovoltaico es de 5,3 kW, es decir, esta es la potencia que debe haber a la salida del inversor. Conociendo esta potencia, se puede iniciar la búsqueda del inversor en el mercado. Una vez se ha seleccionado un inversor, los parámetros de más importancia a tener en cuenta son la potencia de entrada del mismo y su punto máximo de potencia (MPP).

Para este proyecto se realizó el dimensionamiento con un inversor Sunny Boy 5000US 208Vac, el cual necesita a la entrada una potencia máxima de 6,2 kW y tiene un punto máximo de potencia de 250 a 480 V (tabla 2).

Tabla 2. Parámetros eléctricos Inversor Sunny Boy 5000US a 208V

Sunny Boy 5000US 208V Información técnica	
Máxima potencia PV recomendada	6250 W
Máximo voltaje DC	600 V
Punto de máxima potencia	250-480 V
Corriente máxima de entrada DC	21 A
Potencia nominal AC	5000 W
Máxima potencia de salida AC	5000 W
Máxima corriente de salida	24 A
Rango voltaje nominal AC	183-229 V
Frecuencia AC	60 Hz

Módulos fotovoltaicos

La potencia a la entrada del inversor será la potencia necesaria a la salida de los módulos fotovoltaicos, es decir, deben instalarse un número de paneles tal que generen 6,2 kW.

El módulo fotovoltaico seleccionado para este proyecto fue el FE180M, el cual genera una potencia de 180 W, tiene un voltaje máximo de 35,25 V y una corriente máxima de 5,11 A (tabla 3).

Tabla 3. Información técnica panel solar monocristalino FE180M-180W

Panel solar monocristalino FE180M-180W Información técnica	
Máxima potencia	180 W
Tolerancia	+/-3 %
Corriente de máxima potencia (A)	5,11 A
Tensión de máxima potencia (V)	35,25 V

Generador fotovoltaico

El número de paneles de 180 W necesarios para alcanzar una potencia de 7,5 kW es de 35 paneles (se usarán 36 por conexiones eléctricas). Una vez se halla el número de paneles a instalar se prosigue a configurarlos en serie (sumando voltaje) o en paralelo (sumando corriente). Estos 36 paneles se configuraron de tal manera que el voltaje de salida (V_{mp}) estuviera dentro del rango del punto máximo de potencia del inversor, encontrándose que se deben instalar 4 configuraciones en paralelo de 9 paneles en serie para tener un voltaje máximo pico a la salida de la configuración fotovoltaica de 317,25 V.

Con esta configuración los 36 paneles generan una potencia de 6,4 kW, potencia suficiente para entregar al inversor.

Tablero general:

El tablero general representa el punto de acople común (PCC) donde se realiza la conexión en paralelo entre el sistema fotovoltaico a la red, las protecciones de corriente y los medidores de energía.

Según la norma NTC 2050, la capacidad de los conductores y la corriente nominal o ajuste de disparo de los dispositivos de protección contra sobrecorriente en el punto en que estará ubicada la protección, no debe ser menor al 125 % de la corriente nominal a la salida del inversor. Si la máxima corriente de salida del inversor Sunny Boy 6000US 208Vac es 29 A, es indispensable utilizar una protección de 36 A mínimo.

Sistema de puesta a tierra

Según la norma NTC 2050, en todas las fuentes fotovoltaicas debe haber un conductor de un sistema bifilar de más de 50 V nominales y el conductor neutro de un sistema trifilar que estén sólidamente puestos a tierra. Se debe colocar un punto de conexión de puesta a tierra lo más cercano posible de la fuente fotovoltaica, así el sistema quedará mejor protegido contra las posibles subidas de tensión producidas por los rayos. Las estructuras metálicas de los equipos que componen el sistema también deberán estar aterrizadas a tierra.

Diseño del sistema fotovoltaico

Cuando se habla en el proyecto del diseño del sistema fotovoltaico, se pretende estudiar el impacto que podría tener la instalación de los paneles solares y demás elementos en las casas de la constructora analizada. Para esto se debe tener en cuenta que el sistema que trata el proyecto es un sistema fotovoltaico integrado a una construcción (BIPVS), por lo que es ideal instalar los paneles en un techo plano.

Se escogieron tres modelos de casas en esta urbanización, con el fin de hacer simulaciones de la instalación de los paneles fotovoltaicos.

- C- Cedro: tiene un área de 57,95 m² de techo plano.
- Sauce C: tiene un área de 45,39 m² de techo plano.
- Alcaparro: tiene un área de 28,5 m² de techo plano.

El área cuadrada de los techos planos es el criterio del proyecto para instalar una capacidad igual o menor que la demanda total de una casa, pues si el área en las casas no es lo suficientemente grande para instalar la cantidad de paneles necesarios para cubrir toda la demanda de la residencia, se tiene que contemplar la posibilidad de instalar un generador de menor capacidad.

En cuanto a la inclinación de los paneles fotovoltaicos, esta se definió de acuerdo a estudios realizados en los que se encontró que la inclinación óptima de los paneles fotovoltaicos en zonas ubicadas en el hemisferio norte y cercanas a la línea del ecuador es la misma que la latitud de la zona. De lo anterior, se concluye según la latitud geográfica de Chía ($4^{\circ}51'N$), que la inclinación óptima de los paneles solares es de 4° orientados hacia el sur.

Para observar el diseño de los paneles fotovoltaicos instalados en una casa, se utilizó el programa SketchUp, el cual permite ubicar la construcción diseñada en Google Earth y hacer simulaciones de sombras para la estructura según su localización.

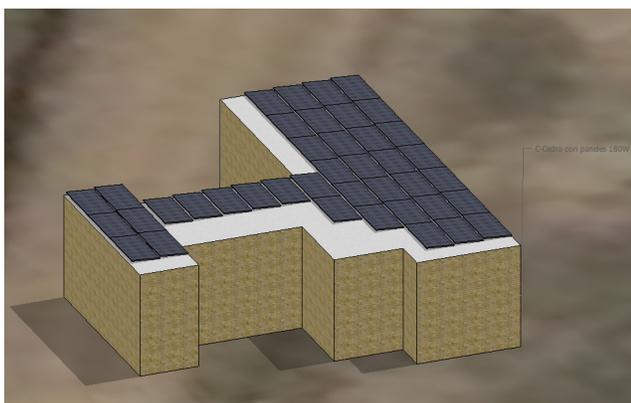


Figura 3. Diseño de la instalación con paneles fotovoltaicos en el techo plano de la casa C-Cedro

Dimensionamiento técnico y diseño de sistemas fotovoltaicos para otros casos

Se realizaron dos dimensionamientos técnicos más, teniendo en cuenta el caso base. En la sección del diseño del sistema fotovoltaico para el caso base, se estableció como criterio de la capacidad a instalar en una casa, el área disponible para la instalación de los paneles fotovoltaicos; por lo cual se llevaron a cabo los dimensionamientos para las casas Sauce C y Alcaparro que cuentan con $45,39 \text{ m}^2$ y $28,5 \text{ m}^2$ respectivamente.

Tabla 4. Dimensionamientos para los 3 modelos de casas a estudiar

Casa	Consumo (Wh)	Pin-Inversor (W)	Tipo de Panel	Num. Paneles	Area total (m ²)	Precio Aproximado
C-Cedro	453640	5000	FE180M-180W	36	51,065	\$ 22,848,720
Sauce C	317548	3700	FE180M-180W	20	42,014	\$ 14,680,400
Alcaparro	181456	2500	FE180M-180W	12	22,979	\$ 9,096,240

Los datos mostrados en la tabla 4 se hallaron teniendo en cuenta las condiciones de dimensionamiento para cada uno de los equipos tal como se explicó en el caso base. Esta tabla muestra el número de paneles solares necesarios para suplir el 100 % (453,64 kWh), el 70 % (317,548 kWh) y el 40 % (181,456 kWh) de la carga total promedio de una casa de estrato 6 en Chía, en donde las áreas que ocupan los paneles solares son de 51, 42 y 23 m^2 respectivamente.

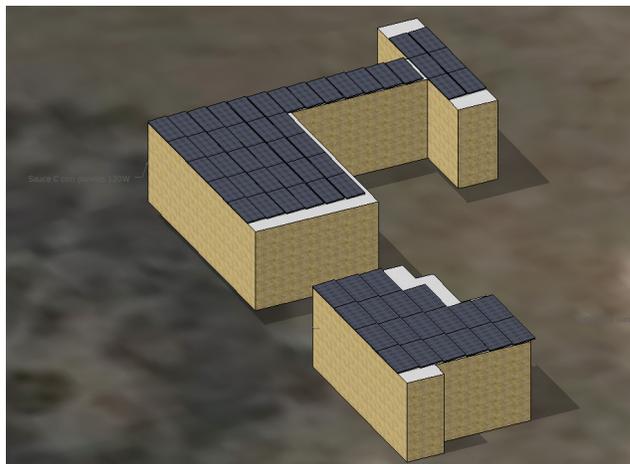


Figura 4. Diseño de las instalaciones de los paneles fotovoltaicos.

Arriba: techo plano de casa Sauce C. Abajo: techo plano de casa Alcaparro

Comportamiento de la red eléctrica frente a la instalación de un sistema fotovoltaico

En el caso del sistema de mayor capacidad (6,4 kW), el cual proporciona el 100 % del consumo promedio mensual para un usuario residencial de estrato 6 en Chía, suponiendo que se instalarían 30 sistemas fotovoltaicos con esta capacidad, se le estaría entregando a la red una potencia de 192 kW. Esta potencia es pequeña dentro del marco de referencia de la red de media tensión (11,4 kV). Por lo tanto, al instalar los 30

sistemas, los niveles de cargabilidad y de voltaje no se modifican de manera significativa y continúan cumpliendo el lineamiento de código de redes establecido en la resolución de la CREG 025 de 1995.

Viabilidad económica y regulatoria del sistema fotovoltaico

Después de realizar el estudio de disponibilidad de recurso y estudiar el dimensionamiento técnico para tres de las casas de la constructora, se procede a realizar las siguientes dos etapas.

- Estudio de viabilidad económica del sistema.
- Estudio de la viabilidad regulatoria para la instalación.

Estudio de viabilidad económica del sistema

Asumiendo que el costo de un vatio fotovoltaico puesto en Bogotá es de 1 USD/W con TRM de \$2489 (22 de agosto de 2015), con una tasa de retorno del 10 % y que la vida útil de los paneles solares a implementar es de 25 años, se puede encontrar el valor del kWh fotovoltaico mensual, el cual es de \$759 COP/kWh-mes. Si se compara este valor con el valor facturado por unidad de consumo de los últimos tres años para las casas de estrato 6 en Chía (\$348/kWh-mes), se puede observar que el costo de la energía fotovoltaica es 2,2 veces mayor al costo de la energía entregada por la red.

Los flujos de caja, entonces, dependerían de las FIT o GT entregadas al generador, las ganancias por costos evitados, los gastos de operación y mantenimiento, etc.

Todos esos factores pueden trasladarse a un flujo de caja C_t^* por medio de la ecuación 2 sumando algebraicamente todos los costos C_i y todos los beneficios P_i de un año genérico.

$$C_t^* = \sum_i P_{i,t} - \sum_i C_{i,t}$$

$$C_t^* = F \cdot E_t + c_{kwh,t} \cdot E_t - u \cdot C_o$$

Ecuación 2. Flujo de caja total.

Donde:

F: FIT o GT

$C_{kWh,t}$: precio de electricidad en un n-ésimo año.

u: coeficiente utilizado para evaluar los costos de operación y mantenimiento, usualmente iguales a 0,01 para sistemas fotovoltaicos.

co: costo de la inversión inicial.

Con el fin de hacer un análisis realista, los flujos de caja se anualizan utilizando la ecuación 3.

$$C_t = \frac{C_t^*}{(1+i)^t}$$

Ecuación 3. Flujo de caja anualizado

Con esta ecuación ya se puede encontrar el Valor Presente Neto que está dado por:

$$VNP = \sum_{t=1}^N C_t - C_o$$

Ecuación 4. VPN del flujo de caja

Con las ecuaciones presentadas anteriormente se mostrarán los cálculos de VPN para el caso en que se quiere alimentar la carga total de la casa y en el caso en el que se quiere suministrar solamente el 40 % de la residencia.

Caso carga completa

Aplicando la ecuación 2 y asumiendo la variable $F=0$, el precio de la energía es de \$360/kWh-mes, el consumo mensual es de 453,64 kWh-mes y la inversión inicial de \$22'848.720. El flujo de caja C_t^* tiene un valor de \$352.934.

Teniendo en cuenta los incentivos aplicados para generación de electricidad no convencional de la Ley

1715 de 2014 y que se presentan en la tabla 5, la inversión inicial de \$22'848.720 tendría los siguientes descuentos:

- Exoneración del pago del IVA (16 %): \$3'655.795.
- Exoneración del pago de derechos arancelarios: \$4'568.744.

De esta manera, la inversión inicial actualizada será de: \$14'623.181.

La inversión para instalar un sistema que supla la energía total de una casa se recupera en su totalidad durante los primeros siete años y medio de operación del sistema.

Caso 40 % de la carga

Ahora, asumiendo que se quiere instalar el sistema de 181,45 kWh-mes, el precio de la energía es de \$360/kWh-mes y la inversión inicial es de \$9'096.240.

Aplicando los incentivos, tenemos:

- Exoneración del pago del IVA (16 %): \$1'444.198.
- Exoneración del pago de derechos arancelarios: \$1'819.248.

De esta manera, la inversión inicial actualizada será de: \$5'832.794.

Observando los resultados para un sistema que quiere suplir el 40 % de la energía que demanda la casa, se puede concluir que la inversión se recupera en el lapso de los primeros siete años de operación del sistema.

Estudio de la viabilidad regulatoria para la instalación

En el estudio de viabilidad económica mostrado anteriormente, se puede observar que la inversión inicial de la instalación del sistema fotovoltaico es muy alta en comparación con la suma de costos evitados anuales durante la vida útil de mismo, por esta razón es de gran importancia ofrecer incentivos al generador de energía, así se suman los beneficios de este a los costos evitados y aumentaría el Valor Presente Neto. Este generador se puede clasificar como generador distri-

buido, por lo cual se beneficia de estudios realizados en Colombia para introducir la generación distribuida (GD) en el mercado energético colombiano.

Incentivos para el generador se están aplicando actualmente en países de la Unión Europea, entre los que están los Feed-inTariff (FiT) y los Green Tags(GT). Sin embargo, se considera que los FiT no son viables en Colombia.

Algunos de los incentivos para el país para implementar la energía fotovoltaica como generador distribuido son: el ahorro de costos de transporte (transmisión y distribución), la reducción en los niveles de pérdidas y la confiabilidad del sistema.

La Universidad de los Andes, la Universidad Nacional, Isagen y Colciencias trabajaron en el proyecto de investigación: "Regulación para incentivar las energías alternas y la generación distribuida en Colombia", en el cual se concluye que la regulación del mercado energético actual no limita la implementación de generadores a partir de energías alternativas. Esta regulación tampoco establece remuneración para el generador por la instalación de estas energías, considerando la participación de generación distribuida en las redes. Igualmente, es indispensable contar con esquemas de financiación, de tal manera que los inversionistas sean conscientes de los beneficios generados para el país relacionados con la reducción de emisiones y el desarrollo tecnológico del mismo.

La CREG, por su parte, contrató un estudio realizado por el consultor Alberto Rodríguez Hernández en noviembre del 2009 llamado: "La generación distribuida y su posible integración al sistema interconectado nacional", en el cual se exponen algunas recomendaciones y conclusiones dirigidas a la CREG acerca de las Redes Inteligentes y la Generación Distribuida. Dentro del estudio se incluyeron gráficas que muestran la participación de la energía solar en el 2030 para abastecer la demanda energética mundial y la disponibilidad de este recurso para el mismo año. El recurso solar disponible es de 580 TW, esta es una cantidad mucho mayor al recurso de agua disponible, el cual es de 2 TW.

Las recomendaciones de este estudio fueron:

- Es conveniente incluir el concepto de generación distribuida dentro de la normatividad.

- Al tiempo se recomienda revisar el actual concepto de plantas menores.
- Se recomienda revisar las definiciones de productor marginal, productor independiente y productor para uso propio, promoviendo ajustes legales o regulatorios según corresponda.
- Se recomienda crear la actividad de generación distribuida.
- Se recomienda permitir la venta de excedentes de los autogeneradores.
- Se recomienda introducir la medición dual y las tarifas diferenciales para la energía en horas punta y horas valle.
- Desarrollar planes piloto para nuevos complejos habitacionales, nuevos edificios y nuevos centros comerciales, que se basen en los conceptos de generación distribuida, redes inteligentes y arquitectura sostenible.

Además de las recomendaciones, en este estudio Alberto Rodríguez Hernández insiste en que se requieran incentivos para desarrollar la GD, especialmente con fuentes nuevas y renovables.

El Congreso de la República expidió la Ley 697 de octubre 3 de 2001, por medio de la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones.

En el año 2014, se promulga la Ley 1715 del 13 de mayo del mismo año; mediante la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional (SIN).

En la tabla 5 se presenta una comparación de ambas leyes en materia de incentivos.

Los incentivos que promulga la Ley 1715 de 2014 representan un avance significativo que permitirá redundar en la promoción de nuevas tecnologías energéticas no convencionales interconectadas con el SIN. También serían interesantes nuevos modelos de apoyo para este tipo de proyectos relacionados con la compra por parte de la empresa prestadora del servicio eléctrico del kW, generado con estas nuevas fuentes, a precios que incluso duplican el costos del kWh

generado convencionalmente (hidráulico o térmico) y la financiación de hasta el 70 % de la inversión inicial del proyecto; tal como ocurre en la actualidad en países como Alemania, Japón y Estados Unidos.

Conclusiones

La viabilidad técnica depende directamente del área disponible para la instalación del sistema. Debido a la relación proporcional entre el área disponible para instalar el sistema fotovoltaico y la potencia generada por el sistema, se concretó como criterio para determinar la capacidad del generador fotovoltaico el área de techo plano en una casa.

Las Universidades de los Andes y Nacional (Minas), Isagen, Colciencias, y la CREG examinaron posibles medidas regulatorias que se podrían imponer en el país mediante estudios y análisis del mercado energético actual. En estos estudios se recomienda introducir el concepto de Generación Distribuida a la normatividad colombiana y autorizar la compraventa de energía para estos medios de generación o medición neta.

La regulación actual no limita la implementación de energías renovables pero tampoco muestra incentivos para que estas se efectúen. La UPME por su parte está desarrollando la formulación de un plan de desarrollo energético para las fuentes no convencionales de energía en Colombia (PDFNCE).

Los dimensionamientos realizados y analizados a la luz de la Ley 1715 de 2014, permiten recuperar la inversión inicial en períodos de hasta 7 años y medio de operación de los sistemas solares fotovoltaicos, convirtiendo esta tecnología en una opción viable y óptima para ser usada en generación distribuida a nivel urbano.

Tabla 5. Comparación de los incentivos otorgados según la Ley 697 de 2001 y la Ley 1715 de 2014

Aspecto	Ley 697 de 2001	Ley 1715 de 2014
Incentivos	Para la investigación: el gobierno nacional propenderá por la creación de programas de investigación en el uso racional y eficiente de la energía a través de Colciencias.	Incentivos a la generación de energías no convencionales: fomento a la investigación, desarrollo e inversión en el ámbito de la producción y utilización de energía a partir de FNCE, la gestión eficiente de la energía. Los obligados a declarar renta que realicen directamente inversiones en este sentido, tendrán derecho a reducir anualmente de su renta por los 5 años siguientes al año gravable en que hayan realizado la inversión, el 50 % del valor total de la inversión realizada.
	Para la educación: el Icetex beneficiará con el otorgamiento de préstamos a los estudiantes que quieran estudiar carreras o especializaciones orientados en forma específica a aplicación en el campo URE.	
Incentivos	Incentivo tributario IVA: los equipos, elementos, maquinaria y servicios nacionales o importados que se destinen a la preinversión o inversión para la producción y utilización de energía a partir de las fuentes no convencionales, así como para la medición y evaluación de los potenciales recursos estarán excluidos de IVA.	
	Reconocimiento público: el gobierno nacional creará distinciones para personas naturales o jurídicas, que se destaquen en el ámbito nacional en aplicación del URE, las cuales se otorgarán anualmente. El Ministerio de Minas y Energía dará amplio despliegue a los galardonados en los medios de comunicación más importantes del país.	Incentivo arancelario: las personas naturales o jurídicas que a partir de la vigencia de esta ley sean titulares de nuevas inversiones en nuevos proyectos de FNCE, gozarán de exención del pago de los derechos arancelarios de importación de maquinaria, equipos materiales e insumos que no sean producidos por la industria nacional y su único medio de adquisición esté sujeto a la importación de los mismos.
	Generales: el gobierno nacional establecerá los incentivos e impondrá las sanciones de acuerdo con el programa de uso racional y eficiente de la energía y demás formas de energía no convencionales, de acuerdo a las normas legales vigentes.	Incentivo contable: depreciación acelerada de activos. La actividad de generación de electricidad a partir de FNCE, gozará del régimen de depreciación acelerada.

Referencias

- Aristizábal, A., Botero, M., & Gordillo, G. (2010). *Evaluación del desempeño energético de un sistema BIPVS de 3,4kW y Dimensionamiento de un sistema BIPVS para un usuario doméstico típico en Bogotá, Colombia*. Segunda Conferencia Iberoamericana de Ingeniería e Innovación Tecnológica, Orlando, USA.
- Ayompe, L. M., Duffy, A., McCormack, S. J., & Conlon, M. (2010). Projected costs of a grid-connected domestic PV system under different scenarios in Ireland, using measured data from a trial installation. *Energy Policy*, 38(7): 3731-3743.
- Bayod-Rújula, A. A., Ortego-Bielsa, A., & Martínez-Gracia, A. (2011). Photovoltaics on flat roofs: energy considerations. *Energy*, 36(4): 1996-2010.
- Cadena, A. (2010). *Viabilidad de Energías Renovables en la Generación Eléctrica en Colombia*. Universidad de los Andes y Ministerio de Minas y Energía, Bogotá.
- Campoccia, A., Dusonchet, L., Telaretti, E., & Zizzo, G. (2009). Comparative analysis of different supporting measures for the production of electrical energy by solar PV and Wind systems: Four representative European cases. *Solar Energy*, 83(3): 287-297.
- Cheng, C. L., Jiménez, C. S. S., & Lee, M. C. (2009). Research of BIPV optimal tilted angle, use of latitude concept for south orientated plans. *Renewable Energy*, 34(6): 1644-1650.
- Du H., Li N., Brown M. A., Peng Y., & Shuai Y. (2014). A bibliographic analysis of recent solar energy literatures: the expansion and evolution of a research field. *Renewable Energy*, 66: 696-706.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (1998). Código Eléctrico Colombiano NTC 2050.
- Quiceno, G. (2014). Cuadro comparativo entre la Ley 697 de 2001 y la Ley 1715 de 2014", Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- Sistema Único de Información de Servicios Públicos Retrieved 06/05, (2015), from <http://www.sui.gov.co/SUIAuth/logon.jsp>
- Universidad de los Andes y Grupo Endesa, (2010). *Cambio climático, Diagnostico, perspectivas y lineamientos para definir estrategias posibles ante el cambio climático*, Bogotá.
- UPME Retrieved 15/09, (2010), from http://institucional.ideam.gov.co/jsp/info/institucional/media/descargas/atlas_radiacions/1-Preliminares.pdf
- UPME Retrieved 15/09, (2010), from http://www.upme.gov.co/Docs/Atlas_Radiacion_Solar/1-Atlas_Radiacion_Solar.pdf

Modelo y simulación de una intersección vial usando el software Arena[®]

**Sebastian Puerto Hernández, Sergio Forero Forero,
Eliasib Rivera Aya y Jorge Herrera Cuartas***

Departamento de Ingeniería, Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Bogotá D. C., Colombia.

*Autor para correspondencia: jorgea.herrerac@utadeo.edu.co

Resumen

En este artículo se presenta el modelo y la simulación de una intersección vial. Para modelar las dinámicas fue seleccionado el software Arena[®], por su gran versatilidad y amplitud en herramientas a la hora de diseñar y modelar sistemas estocásticos. Las simulaciones en eventos discretos de la intersección validarán el modelo. Con el modelo obtenido se podrá realizar el cambio en la programación de los semáforos, la inclusión de paraderos en sitios específicos de las vías, y además la demostración de la relación entre la forma de conducción y estos problemas de movilidad. Se busca disminuir el tamaño de las colas que se generan, además de una reducción en los tiempos de recorridos de los usuarios en estos tramos y un mejoramiento notable en el funcionamiento vial en general de la ciudad.

Palabras clave: tráfico vehicular, intersección vial, simulación.

Editora: Pataquiva-Mateus, A. Y.

Citation: Puerto, S., Forero, S., Rivera, E. y Herrera, J. (2015). Modelo y simulación de una intersección vial usando el software Arena[®]. *Revista Mutis* 5(1); pag 66-73.

Received: April 1, 2015; **Accepted:** May 20, 2015; **Published on line:** July 30 2015

Copyright: ©2015 Puerto *et al.* This is an open-access article, which permits unrestricted use, distributions and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Competing Interests: The authors have no conflict of interest.

Model and simulation of a road intersection using the software Arena[®]

Abstract

This article presents the model and simulation of a road intersection. For modeling the dynamics was selected the Arena[®] software by its versatility and spaciousness in tools for designing and modeling stochastic systems. Discrete event simulations of the intersection validate the model. With the model obtained, the programming of the traffic lights can be changed, include stops at specific sites of the tracks, and also show the relationship between driving behavior and the problems of mobility. It seeks to reduce the size of the queues that are generated, and a reduction in travel time users in this sections and a



significant improvement in road general functioning of the city.

Keywords: vehicular traffic, road intersection, simulation.

Introducción

La deficiente movilidad vehicular es uno de los principales problemas que presenta Bogotá. El flujo vehicular se ve afectado especialmente en horas pico y se debe a distintos factores, entre los que podemos mencionar: el incremento de vehículos, la poca cultura de conducción de la sociedad colombiana y la carencia de una adecuada infraestructura. Para mejorar el flujo vehicular en Bogotá se han implementado diversas estrategias como: modificación del funcionamiento de los semáforos, políticas de restricción de tránsito tanto por zonas como por horas (pico y placa) y concientización de la cultura de conducción, medidas que en muchas ocasiones son insuficientes.

La movilidad vehicular se puede mejorar con un conocimiento adecuado de su funcionamiento. En este sentido, el flujo vehicular se puede tomar como una función de distribución cambiante con el tiempo, el cual se puede modelar con la teoría de líneas de espera. De esta manera, se puede obtener un modelo de tráfico vehicular.

El modelado es una descripción matemática (relaciones matemáticas o lógicas) de un sistema dinámico. El modelo se obtiene por medio de la abstracción del problema y de una posterior simplificación de los elementos que lo conforman e intervienen en él (Hollmann, Cristía, & Frydman, 2014). Una vez que se obtiene un modelo, este se puede evaluar tanto a través de una solución analítica o mediante simulaciones.

La solución analítica se puede llevar a cabo cuando las relaciones matemáticas que conforman el modelo son sencillas. En caso contrario, es decir, cuando las relaciones matemáticas que conforman el modelo presentan una alta complejidad, se deben utilizar técnicas de simulación para obtener una respuesta adecuada. Las simulaciones permiten observar la respuesta del modelo ante diferentes condiciones de entrada, como también, ante diferentes perturbaciones.

De esta manera, se pueden tomar decisiones sin poner en riesgo un sistema dinámico real, o en el mejor de los casos tener datos *a priori* de la respuesta de un sistema que se pretende implementar.

Gracias a la potencia y capacidad de los computadores actuales, la simulación es un campo que se ha extendido fuertemente durante la última década. A modo de ejemplo la simulación se ha utilizado extensivamente en los siguientes campos:

- Sistemas de producción (Albrecht, Kleine, & Abele, 2014; Kim & Choi, 2014).
- Sistemas de tráfico vehicular (Ros, Martínez, & Ruiz, 2014; Dolfín, 2014).
- Aplicación de las redes de Petri (Liu, Blätke, Heiner, & Yang, 2014; Demongodina & Giua, 2014).
- Sistemas de tráfico vehicular con redes de Petri (Dezani, Bassi, Marranghello, Gomes, Damiani, & Nunes da Silva, 2014; Ahmane, *et al.*, 2013).

En este artículo se presenta un modelo de una intersección vial controlada mediante un semáforo. El modelo representa el funcionamiento de un semáforo con tres estados (rojo, amarillo y verde) los cuales son activados por señales generadas por un subsistema; además se presenta la generación de colas que se producen por un subproceso. Finalmente, el modelo representa los recorridos que realizan los vehículos antes y después del semáforo.

El artículo está organizado de la siguiente manera. En la sección 1 se presenta el modelo de flujo vehicular. Luego, en la sección 2 se presenta la simulación de los procesos básicos. Finalmente, la sección 3 contiene las conclusiones preliminares de esta investigación.

Modelo de flujo vehicular

Los modelos macroscópicos de flujo de tráfico vehicular se pueden clasificar en primero, segundo o *n* orden, dependiendo del orden de la ecuación diferencial que se utilice. En este trabajo, vamos a utilizar un modelo de primer orden conocido como modelo de transmisión de celda (CTM, por sus siglas en inglés) (Daganzo, 1995); (Daganzo, 1995b). Este modelo cumple con la sencillez y requerimientos necesarios en esta etapa de la investigación.

El modelo de tráfico vehicular mostrado en la figura 1. se caracteriza principalmente por:

- Discretización del tiempo en intervalos iguales T .
- Segmentaciones numeradas (células) de longitud L_i .
- Tiempo discretizado kT con $k = 0, 1, \dots, k$ (horizonte de tiempo).
- Variable de estado $\rho_i(k)$. Numero de vehículos en la sección i en el instante de tiempo kT .
- Número de carriles λ_i .

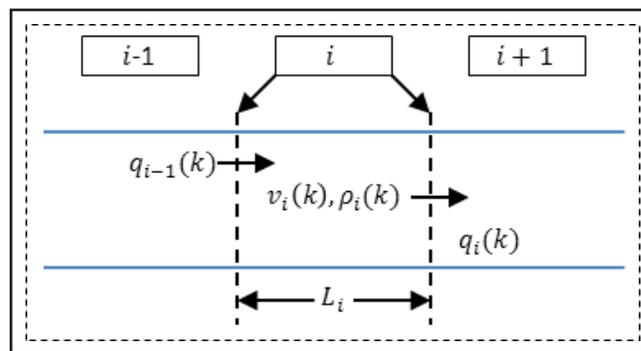


Figura 1. modelo de transmisión de celda

Para calcular el número de vehículos en la sección i en el tiempo $k + 1$ se usa la siguiente ecuación:

$$\rho_i(k + 1) = \rho_i(k) + \frac{T}{L_i \lambda_i} [q_{i-1}(k) - q_i(k)] \quad (1) \quad \rho_i(k + 1) = \rho_i(k) + \frac{T}{L_i \lambda_i} [q_{i-1}(k) - q_i(k)] \quad (1)$$

Donde:

- $q_i(k)$ es el flujo vehicular que cruza el límite entre las secciones i e $i + 1$ en el tiempo K . Este flujo se calcula de la siguiente forma:

$$q(k) = \min(v_{fi} \rho_i(k) \lambda_i; Q; w_{i+1} \{\rho_{Max\ i+1} - \rho_{i+1}(k)\} \lambda_{i+1}) \quad (2)$$

- Q : Capacidad flujo en las secciones i y $i + 1$.
- $Q = \min(Q_i, Q_{i+1})$
- ρ_{Max} densidad máxima en la sección $i + 1$.
- v_{fi} y w_{i+1} son las pendientes de las proporciones de flujo y congestiones libres, respectivamente. Como se muestra en la figura 2.

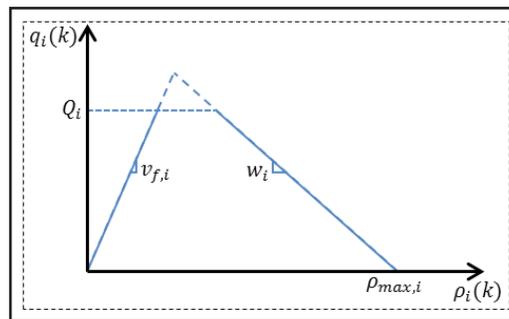


Figura 2. Proporciones de flujo y congestiones libres

Además el flujo $q_i(k)$ se calcula Veh/h y no por Veh/T

- Velocidad media
- $v_i(k) = \frac{q_i(k)}{\rho_i(k)\lambda_i}$
- Bifurcación en las vías: Se toma como variable la tasa de inflexión $\beta_j(k)$: $j = 1, \dots, j = 1, \dots, j$.
- $q_i(k) = \min \left\{ S_i(k), \frac{R_1(k)}{\beta_1(k)}, \frac{R_2(k)}{\beta_2(k)}, \frac{R_j(k)}{\beta_j(k)} \right\} \quad (3)$

Donde:

$S_i(k)$ es el flujo que puede ser enviado desde la sección i :

$$S_i(k) = \min \{ Q_i, v_{f,i}, \rho_i(k)\lambda_i \}$$

$R_j(k)$ es el flujo que cada rama (división) puede recibir:

$$R_j(k) = \min \{ Q_i, w_j[\rho_{Max,j}(k) - \rho_i(k)]\lambda_j \}$$

Simulación de los procesos básicos

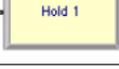
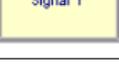
El modelo que se emplea en la investigación está basado en el estudio por medio de modelamiento numérico, una herramienta que permite simular procesos de tal forma que estos se acerquen a la realidad tomando datos estadísticos para su estudio, con la posibilidad de modificarlos y obtener un modelo óptimo y eficiente.

Por su gran versatilidad y amplitud en herramientas a la hora de diseñar y modelar sistemas estocásticos, fue seleccionado el software Arena®, desarrollado y

distribuido por Rockwell Automation Technologies, Inc. El software Arena® es una herramienta que permite modelar y simular procesos que se pueden observar en la industria, actividades comerciales o en este caso intersecciones viales; se realizó una investigación previa sobre todas las herramientas que el software presenta, de tal forma que fuera sencillo su manejo. Se realizaron modelos de procesos simples para entender el funcionamiento de esta herramienta.

Los elementos del software que se usarán en esta primera etapa se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Elementos del software Arena® utilizados en el sistema

Elemento	Imagen	Descripción
Create module		Punto de partida de toda simulación. Permite crear entidades en base a un tiempo definido de llegada/salida.
Dispose module		Punto final de la simulación del sistema. En este punto se depositan las entidades al final de la simulación.
Process		Representa un proceso, incauta, procesa y libera las entidades.
Decide		Toma de decisiones de las entidades las cuales pueden estar basadas en una o más condiciones.
Assign		Este módulo se utiliza para asignar nuevos atributos a las entidades entrantes.
Hold		Genera una cola hasta que una condición específica se cumpla.
Signal		Este módulo envía un valor de señal a cada módulo de retención para liberar un número específico de entidades.
Route		El módulo Route transfiere una entidad a una estación específica en un tiempo determinado.
Station		Define una estación o conjunto de estaciones que corresponde a una ubicación física o lógica donde se produce el procesamiento.

Modelo semáforo y giro inicial

La simulación del semáforo tiene un tiempo de duración de 45 segundos (2 segundos en amarillo y 43 en verde/rojo). La señal del semáforo está separada del modelo del recorrido vehicular. El modelo está dividido en tres subsistemas. El bloque, mostrado en la figura 3, es el encargado de enviar los estados del semáforo (rojo, amarillo y verde) a la interfaz gráfica del sistema.

El funcionamiento del semáforo descrito en la figura 4 utiliza 5 contadores. En este caso, los dos primeros muestran el tiempo de 45 segundos utilizado para la señal del semáforo. El último contador muestra el cambio de estado, es decir, cuando el semáforo cambia de rojo a verde utilizando el formato binario.

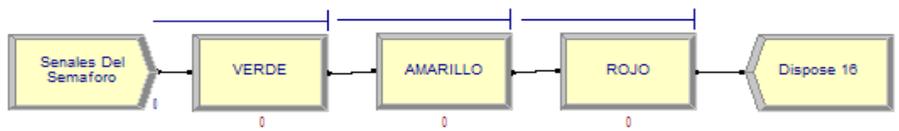


Figura 3. Señales de semaforización

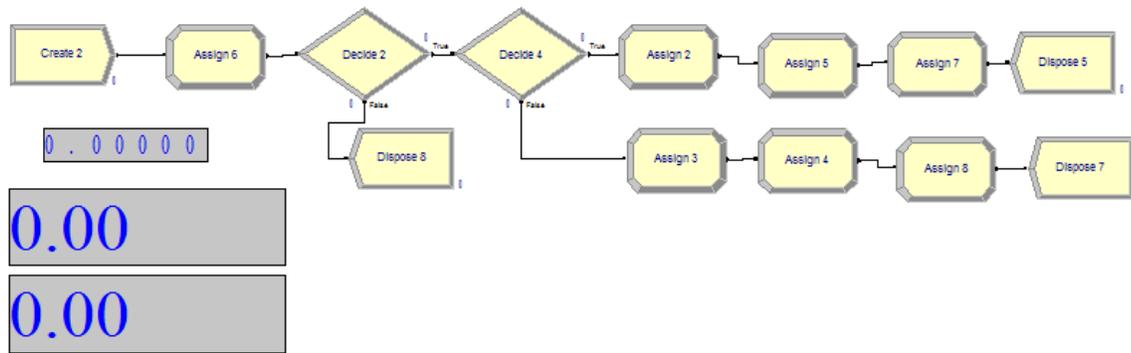


Figura 4. Funcionamiento del semáforo

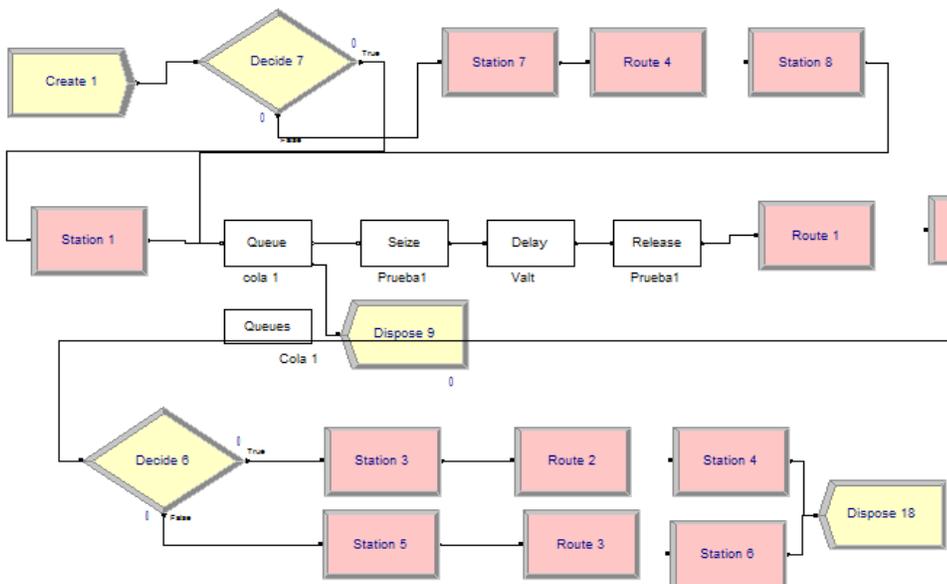


Figura 5. Generación de cola e intersección vehicular

La cola vehicular que se genera en el momento en que el semáforo se encuentra en rojo se puede evidenciar en el bloque 2 de la figura 5. En este bloque existe un subproceso (Queue, Seize, Delay, Release) controlado por señales provenientes del modelo presentado en

la figura 3, controlando el paso de vehículos, los cuales posteriormente tomarán la decisión de realizar un giro, según sea el caso. El giro mencionado se describe en el bloque 3 de la figura 5 y este se representa mediante trayectos (Station y Route).

Visualización 2D del modelo

Para la visualización en 2D del modelo se emplea la herramienta 'Route'. De esta manera, se determina el recorrido que hace el vehículo en la vía desde una estación a otra. Se crea un diseño básico de la carretera, un semáforo, y se expresa gráficamente el funcionamiento del sistema de tránsito, como se puede ver en la figura 6.

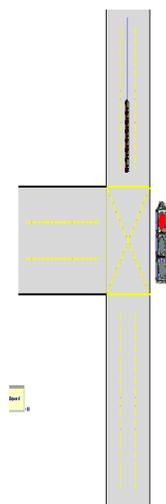


Figura 6. Visualización 2D modelo de simulación vehicular

3. Conclusiones

En este trabajo se modeló y simuló el funcionamiento de una intersección vial, teniendo en cuenta variables básicas tales como: un solo sentido vehicular, dos carriles, giros en un solo sentido y la existencia de un solo semáforo.

En la siguiente etapa de esta investigación se pretende describir y analizar la variable velocidad con la que el vehículo recorre las vías. Este es un factor importante en el estudio del comportamiento de las colas vehiculares ya que por ejemplo el manejo a muy bajas velocidades ocasiona que el flujo vehicular sea más lento en esos trayectos. De igual manera, se realizará un modelo en el que se incluyan diferentes tipos de vehículos. Esto le dará un entorno más realista al proyecto al incluir más variables reales en la simulación final.

Agradecimientos

El presente documento ha sido soportado por el proyecto de investigación con código 644-11-14 financiado por la Universidad Jorge Tadeo Lozano.

Referencias

- Ahmane, M., Abbas-Turki, A., Perronnet, F., Wu, J., El Moudni, A., Buisson, J., & Zeo, R. (2013). Modeling and controlling an isolated urban intersection based on cooperative vehicles. *Transportation Research Part C*, 44-62.
- Albrecht, F., Kleine, O., & Abele, E. (2014). Planning and optimization of changeable production systems by applying an integrated system dynamic and discrete event simulation approach. *Variety Management in Manufacturing*, 386-391.
- Daganzo, C. (1995). A finite difference approximation of the kinematic wave model of traffic flow. *Transport. Res. Part B*, 29(4), 261-276.
- Daganzo, C. (1995b). The cell transmission model. Part II: Network traffic. *Transport. Res. Part B*, 29(2), 79-93.
- Demongodina, I., & Giua, A. (2014). Dynamics and steady state analysis of controlled Generalized Batches Petri Nets. *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*, 33-49.
- Dezani, H., Bassi, R. D., Marranghello, N., Gomes, L., Damiani, F., & Nunes da Silva, I. (2014). Optimizing urban traffic flow using Genetic Algorithm with Petri net analysis as fitness function. *Neurocomputing*, 162-167.
- Dolfin, M. (2014). Boundary conditions for first order macroscopic models of vehicular traffic in the presence of tollgates. *Boundary conditions for first order macroscopic models*, 260-266.
- Hollmann, D. A., Cristía, M., & Frydman, C. (2014). A family of simulation criteria to guide DEVS models validation rigorously, systematically and semi-automatically. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 1-26.

- Kim, T., & Choi, B. K. (2014). Production system-based simulation for backward on-line job change scheduling. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 12-27.
- Liu, F., Blätke, M.-A., Heiner, M., & Yang, M. (2014). Modelling and simulating reaction-diffusion systems using coloured Petri nets. *Computers in Biology and Medicine*, 297-308.
- Ros, F. J., Martínez, J. A., & Ruiz, P. M. (2014). A survey on modeling and simulation of vehicular networks: Communications, mobility, and tools. *Computer Communications*, 1-15.

MUTIS

REVISTA DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD JORGE TADEO LOZANO

Instrucciones para autores

ENVÍO DE ARTÍCULOS

La revista MUTIS acepta permanentemente los siguientes tipos de artículos:

1. Artículo de investigación científica y tecnológica: documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos terminados de investigación.
2. Artículo de métodos: documento que presenta la invención o estandarización de un método experimental, computacional o educativo, entre otros.
3. Artículo de revisión (estado del arte): es una revisión bibliográfica de por lo menos 50 referencias, con el fin de dar cuenta sobre los avances y las tendencias de desarrollo de un campo particular de las ciencias naturales e ingeniería.
4. Comunicación corta: documento que presenta resultados parciales de una investigación en desarrollo cuya publicación sea de gran importancia.

Los trabajos que se presentan a consideración de la revista MUTIS, se deben enviar vía correo electrónico a alisy.pataquivam@utadeo.edu.co con copia a javier.hernandez@utadeo.edu.co (asunto: artículo revista MUTIS) en formato de procesador de texto habilitado para modificaciones (Microsoft Word). El artículo debe estar escrito en español o inglés, con una extensión máxima de 25 páginas (incluyendo tablas, figuras y referencias), con márgenes simétricas de 2 cm, sin columnas, con títulos y subtítulos alineados a la izquierda, en letra Times New Roman, tamaño 12 y en espacio 1,5. Para facilitar el proceso de evaluación, se deben numerar todos los renglones del trabajo. Los trabajos deben tener la siguiente estructura y cumplir con los siguientes requisitos:

Tipo de artículo. El tipo de artículo (*Short communication, Research article o Review article*) debe ser colocado en mayúscula, negrilla y alineado a la derecha en la parte superior.

Título. El título debe representar con precisión y de manera concisa el contenido del trabajo sin exceder 15 palabras. Se debe escribir con letras tamaño de fuente 16, en altas y bajas (minúsculas y mayúsculas), en negrilla y alineado a la izquierda.

Título corto. Debe sugerirse un título corto de no más de 5 palabras que resuma el título original, el cual se colocará en las páginas impares del texto publicado.

Autores. Debe escribirse el nombre completo de los autores, separados por comas y tamaño de fuente 12. El autor para correspondencia debe marcarse con un asterisco como superíndice al final del apellido. Cada afiliación debe estar precedida por el número que se insertó como superíndice al final del apellido de cada autor. No se deben incluir títulos académicos ni las posiciones o cargos que los autores ocupan. Las afiliaciones se deben escribir en este orden: Universidad, Facultad, Programa, Laboratorio o Grupo (si aplica), dirección, ciudad, país, *correo electrónico del autor para correspondencia. Ejemplo:

Yvonne Sarmiento Rangel,¹ Ariadna Hazel Vergel^{2*}

1 Universidad Jorge Tadeo Lozano, Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería, Departamento de Ciencias Naturales y Ambientales. Grupo de Investigación Genética, Biología Molecular y Bioinformática – GENBIMOL, Carrera 4 N° 22-61, Bogotá D. C., Colombia. CP 011110

2 Instituto de Investigaciones de Viandas Tropicales (INIVIT), Apartado 6, Santo Domingo, Villa Clara, Cuba. CP 53000. Correo electrónico: arhazel@inivit.cu

Resumen. Debe tener un máximo de 250 palabras. El texto del resumen debe ir en tamaño de fuente 12 Times New Roman. El resumen debe incluir objetivo, métodos, resultados concretos de la investigación y una conclusión general.

Palabras clave. Debe escogerse un máximo de 5 palabras clave, palabras diferentes incluidas en el título.

Abstract. Debe ser una traducción correcta y precisa al idioma inglés del resumen que aparece en español. Se usa el mismo estilo ya descrito para el resumen en español.

Keywords. Debe ser una traducción correcta y precisa al idioma inglés de las palabras clave que aparecen en español. Se usa el mismo estilo ya descrito para las palabras clave en español.

Introducción. Donde se habla sobre el origen de la investigación, interés y visión general del tema a tratar.

Materiales y métodos. No aplica para artículo de revisión. Descripción detallada de técnicas, equipos y reactivos utilizados en el desarrollo de la investigación.

Resultados. No aplica para artículo de revisión. Donde se hace una presentación clara de los resultados de investigación.

Discusión. Donde se realiza la interpretación y análisis de los resultados de investigación comparándolo con resultados previamente publicados. Pueden presentarse tablas o figuras para sintetizar los resultados. Si se han realizado análisis estadísticos se deberá describir la procedencia de los datos y el método estadístico empleado.

Conclusiones. Deben basarse en los resultados obtenidos y estar relacionadas con la hipótesis o planteamiento del problema descrito en la introducción.

Agradecimientos. Los autores agradecerán de manera corta y concisa a instituciones o personas que hayan aportado de manera relevante a la investigación. Es de carácter opcional.

Ecuaciones. Las ecuaciones se deben escribir centradas con respecto al texto principal y se deben numerar continuamente a lo largo del texto. Cada ecuación debe estar enumerada con un número entre paréntesis ubicado en el margen derecho del texto. El significado

y las unidades deben explicarse inmediatamente después de la ecuación en que se utilicen por primera vez.

Cantidades y unidades. Para todas las cantidades numéricas, se debe utilizar un punto para separar los miles y una coma para indicar las cifras decimales. Se recomienda utilizar el Sistema Internacional de Unidades.

Tablas. Las tablas se deben numerar continuamente a lo largo del texto. El encabezado de cada tabla debe incluir la palabra **Tabla** (en negrilla) seguida del número arábigo consecutivo correspondiente, y de una breve descripción del contenido de la misma. Tanto el encabezado como el contenido de la tabla se deben escribir en tamaño de fuente 10. Solo deben usarse líneas horizontales para separar las entradas de la tabla. No deben usarse líneas verticales para separar las columnas. En el caso de necesitarse algún pie de tabla, este debe estar escrito con tamaño de fuente 8. Las tablas no deben duplicar la información dada en las figuras.

Figuras. Las figuras (o fotografías) se deben numerar de manera consecutiva a lo largo del texto. El rótulo de cada figura debe estar en la parte inferior de la figura y debe incluir la palabra **Figura** (en negrilla) seguida del número arábigo correspondiente, y de una breve descripción del contenido de la figura. El rótulo de la figura se debe escribir en tamaño de fuente 10. Las figuras deben incluirse como imágenes originales importadas o copiadas al archivo del trabajo desde una herramienta gráfica (por ejemplo, de *Microsoft Excel*) con una resolución de 300 dpi de tal manera que la legibilidad no se sacrifique cuando el tamaño de las figuras se ajuste durante el proceso de edición. No se publicarán por ningún motivo fotografías descargadas por internet sin el permiso expreso del autor.

Referencias bibliográficas. Se debe utilizar a lo largo del texto el sistema de citación APA que utiliza los apellidos de autores seguidos del año de publicación entre paréntesis. La lista de las referencias se debe dar al final del documento después de la sección de *Conclusiones* y debe estar organizada en orden alfabético de acuerdo a la inicial del primer apellido del primer autor. En esta lista solamente se deben colocar las referencias citadas en el texto. Todas las referencias se deben escribir en tamaño de fuente 12 Times New Roman.

EJEMPLOS:

ARTÍCULO

Giraldo, G., Talens, P., Fito, P., & Chiralt, A. (2003). Influence of sucrose solution concentration on kinetics and yield during osmotic dehydration of mango. *Journal of food Engineering*, 58(1), 33-43.

LIBRO

Shames, I. H., & Shames, I. H. (1982). *Mechanics of fluids* (pp. 8-36). New York: McGraw-Hill.

CAPÍTULO DE LIBRO

Bertucco, A. &. (2002). Micronization of a polysaccharide by a supercritical antisolvent technique. En J. &. Williams (Ed.), *Supercritical Fluids Methods and Protocols*. (págs. 335-412). New Jersey: Humana Press, Inc.

DOCUMENTO DE INTERNET

Benson, T. (Nov. 17, 2005). *Forces on a Rocket*. Consultado en octubre 2, 2008, desde <http://exploration.grc.nasa.gov/education/rocket/rktfor.html>

TESIS DE GRADO

Yépez, B. (2009). Glicerólisis e hidrólisis de triglicéridos saturados, en dióxido de carbono supercrítico. Tesis Doctoral, Escuela de Ingeniería Química, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

En caso de dudas comunicarse con los editores (alisy.pataquivam@utadeo.edu.co, javier.hernandez@utadeo.edu.co). Estas instrucciones quedan supeditadas a los cambios que el Comité Editorial disponga.53



Comité Evaluador

La Revista Mutis agradece a los profesores e investigadores que colaboraron en el presente número como árbitros de los artículos aprobados y publicados.

ÁNGELA GARCÍA PRIETO
Universidad Jorge Tadeo Lozano

JUAN CAMILO ORDOÑEZ
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

ANDRÉS JULIÁN ARISTIZÁBAL CÓRDOBA
Universidad Jorge Tadeo Lozano

LUIS CARLOS SÁNCHEZ ACEVEDO
Universidad de América

LAURA ROSA CONDE RIVERA
Universidad Jorge Tadeo Lozano

ANDRÉS FELIPE SUÁREZ
Universidad Jorge Tadeo Lozano

YINA PATRICIA SALAMANCA BLANCO
Universidad del Bosque

GINNA PAOLA TRUJILLO PÉREZ
Universidad Nacional de Colombia

ANDRÉS CABRERA OROZCO
Consultor

ALEJANDRO LÓPEZ PAZOS
Universidad Colegio Mayor

EDGAR MAURICIO VARGAS SOLANO
Universidad Jorge Tadeo Lozano

JORGE AURELIO HERRERA CUARTAS
Universidad Jorge Tadeo Lozano