



TECNOLOGÍA
en marcha

Revista trimestral
Abril – Junio 2020
Volumen 33 N° 2
ISSN-E 2215-3241



TEC | Tecnológico
de Costa Rica

Publicación y directorio en catálogos

latindex

Dialnet
DOAJ

SciELO

REDIB
Red Iberoamericana
de Investigación y Conocimiento Científico

Comisión Editorial

Ana Ruth Vílchez Rodríguez. Directora.
Instituto Tecnológico de Costa Rica

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

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

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

Jorge Solano Jiménez
Instituto Costarricense del Cemento
y del Concreto

Edición técnica

Alexa Ramírez Vega

Revisión filológica

Esperanza Buitrago Poveda

Diseño gráfico

Felipe Abarca Fedullo

Diagramación

Asesoría en Ediciones gráficas

Diseño de cubierta

Felipe Abarca Fedullo

Datos de catalogación en publicación

Tecnología en Marcha / Editorial Tecnológica
de Costa Rica. - Vol. 33-2, Abril-Junio (2020)
-Cartago: la Editorial, 2020 – Trimestral
ISSN-E 2215-3241

1. Ciencia y Tecnología –
Publicaciones periódicas CDD:600

**TEC** | Tecnológico
de Costa Rica

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

**TEC** | Tecnológico
de Costa Rica

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

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

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

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

Publicación y directorio en catálogos

www.latindex.unam.mx



<http://www.scielo.org/>





Revista trimestral
Abril – Junio 2020
Volumen 33 N° 2

ISSN 0379-3982 / ISSN-E 2215-3241

TECNOLOGÍA *en marcha*

Contenido

- Calidad del agua para consumo humano en una comunidad rural: caso Corral de Piedra, Guanacaste, Costa Rica
Water quality for human consumption in a rural community: Case of Corral de Piedra, Guanacaste, Costa Rica
Rolando Sánchez-Gutiérrez, Cristina Benavides-Benavides, María Chaves-Villalobos, José Quirós-Vega 3
- Comparación del plan agregado de producción bajo metodologías de autores americanos y europeos
Comparison of the aggregate production plan under methodologies of American and European authors
Felipe Chaves-Aguilar, Juan Carlos Ocampo-Rodríguez, Pamela Araya-Martínez, Marcela Meneses-Guzmán, Rafael Gutiérrez-Brenes..... 17
- Alpha-tubulin promoter from *Chlorella vulgaris* allows genetic transformation of green coccoid microalga
El promotor de la alfa-tubulina de *Chlorella vulgaris* permite la transformación genética de la microalga verde tipo cocoide
Raquel Fernández-Rodríguez, Giovanni Garro-Monge, Maritza Guerrero-Barrantes, Olman Gómez-Espinoza. 27
- Evaluación de sistemas térmicos y fotovoltaicos solares en TRES plantas procesadoras de leche de la región Huetar Norte, Costa Rica
Evaluation of solar thermal and photovoltaic systems in three milk processing plants in the Northern Huetar Region, Costa Rica
Tomás J. Guzmán-Hernández, Javier M. Obando-Ulloa, Xabier Álvarez de Eulate, Raúl Llundain-López, Paola Juan-Pérez, Guillermo Castro-Badilla 37
- Familias térmicas solares para procesamiento de productos agropecuarios y agroindustriales en la región Huetar Norte de Costa Rica: programa local piloto
Solar thermal equipments for the processing of agricultural and agroindustrial products in the Northern Huetar Region of Costa Rica: Local pilot program
Tomás de Jesús Guzmán-Hernández, Javier Mauricio Obando-Ulloa, Freddy Araya-Rodríguez, Guillermo Castro-Badillaro..... 47

Simulación de movimientos vermiformes mediante caminatas aleatorias entre n-símplex vecinos Simulation of vermiform movements through random walks between n-simplex neighbors <i>Jorge Arroyo-Hernández, José Pablo Alvarado-Moya</i>	54
Inventario de gases de efecto invernadero: Distrito central de Puntarenas Inventory of greenhouse gases: Central District of Puntarenas <i>Ariel Porras-Rozas, Irene Medina-Mora, Valeria Castillo-Calderón, Ana Espinoza-Ocampo</i>	67
Homologación de Procedimientos Técnicos para la Evaluación de Fuentes Fijas bajo los Requisitos del punto 5 de la NMX-EC-17025-IMNC-2006 Homologation of Technical Procedures for the Evaluation of Fixed Sources under the Requirements Of Point 5 of the NMX-EC-17025-IMNC-2006 <i>María Concepcion Martínez-Rodríguez, Lorena Elizabeth Campos-Villegas, Jaime Ivan Sánchez-Quiroz</i>	79
Estimación de Heterosis y Heterobeltiosis en Híbridos Interpoblacionales de Tomate de Cáscara (<i>Physalis Ixocarpa Brot.</i>) Estimation of Heterosis and Heterobeltiosis in Interpoblational Hybrids of Husk Tomato (<i>Physalis ixocarpa Brot.</i>) <i>Neymar Camposeco-Montejo, Valentín Robledo-Torres, Antonio Flores-Naveda</i>	91
Producción de siete genotipos de pepino (<i>Cucumis sativus</i> L.) cultivados en ambiente protegido Production of seven cucumber (<i>Cucumis sativus</i> L.) genotypes grown under greenhouse conditions <i>José Aníbal Cruz-Coronado, José Eladio Monge-Pérez</i>	102
Plan de acción para la gestión de las aguas residuales especiales de la ciudad de La Libertad, El Salvador Action plan for the management of special wastewater in the city La Libertad, El Salvador <i>Francisco Rosales-Ayala, Cristian Moreira-Segura, Rooel Campos-Rodríguez</i>	119
Discovery Of Meaningful Rules By Using DTW Based On Cubic Spline Interpolation Descubrimiento de reglas significativas mediante el uso de DTW basado en interpolación spline cúbico <i>Luis-Alexander Calvo-Valverde, David-Eías Alfaro-Barboza</i>	137

Calidad del agua para consumo humano en una comunidad rural: caso Corral de Piedra, Guanacaste, Costa Rica

Water quality for human consumption in a rural community: Case of Corral de Piedra, Guanacaste, Costa Rica

Rolando Sánchez-Gutiérrez¹, Cristina Benavides-Benavides²,
María Chaves-Villalobos³, José Quirós-Vega⁴

Sánchez-Gutiérrez, R; Benavides-Benavides, C; Chaves-Villalobos, M; Quirós-Vega, J. Calidad del agua para consumo humano en una comunidad rural: caso Corral de Piedra, Guanacaste, Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 33-2. Abril-Junio 2020. Pág 3-16.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v33i2.4165>

Fecha de recepción: 23 de abril de 2019
Fecha de aprobación: 6 de agosto de 2019



- 1 Químico industrial, investigador del Laboratorio de Recurso Hídrico de la Universidad Nacional. Costa Rica. Correo electrónico: rolando.sanchez.gutierrez@una.ac.cr. Autor de correspondencia.
 <https://orcid.org/0000-0002-5050-021X>
- 2 Educadora ambiental, investigadora del Laboratorio de Recurso Hídrico de la Universidad Nacional. Costa Rica. Correo electrónico: cristinabenavidesb@gmail.com.
 <https://orcid.org/0000-0003-2149-8082>
- 3 Química industrial, investigadora del Instituto de Estudios Sociales en Población (IDESPO). Costa Rica. Correo electrónico: maria.chaves.villalobos@una.ac.cr.
 <https://orcid.org/0000-0002-5632-4149>
- 4 Biólogo, investigador del Instituto de Estudios Sociales en Población (IDESPO). Costa Rica. Correo electrónico: jose.quiros.vega@una.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-2731-2691>

Palabras clave

Recurso hídrico; calidad de agua; hidrogeoquímica; consumo humano; comunidad rural.

Resumen

El presente trabajo se desarrolló entre los años 2015 y 2018 en la comunidad de Corral de Piedra de Nicoya, en la provincia de Guanacaste. En esta zona existen dos estaciones: seca y lluviosa; no obstante, los embates del cambio climático han propiciado cambios drásticos en los patrones de precipitación y fuertes épocas de sequía. En el estudio se evaluó la calidad del agua para consumo humano que abastece a la comunidad y se determinó que existe alto cumplimiento con lo establecido en el decreto 38924-S en cuanto a los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos. Según los criterios de calidad del agua de pozos y nacientes de Mora-Alvarado *et ál*, los resultados obtenidos para las muestras colectadas en la comunidad de Corral de Piedra, en la mayoría de los sitios de muestreo, indican condiciones de calidad excelente. Además, se realizó una caracterización hidrogeoquímica del agua extraída del pozo mediante el diagrama de Piper, que la identificó como agua de tipo bicarbonatada-cálcica. La aplicación de la matriz de correlación de Kendall arrojó 25 correlaciones significativas, de las cuales pH-nitrato y conductividad-bicarbonato fueron las mayores. Por último, se realizó el análisis de componentes principales, y resultó que 5 componentes principales explican en forma significativa la varianza de los datos (85,6%).

Keywords

Water resources; water quality; hidrogeochemistry; human consumption; rural community.

Abstract

The present work was developed between 2015 and 2018 in the community of Corral de Piedra, Nicoya, Guanacaste. In this area there are two seasons: dry and rainy; however, drastic climate change has led to extreme changes in rainfall patterns and strong periods of drought. In this study, the quality of communal drinking water was assessed, determining it depicts high compliance with decree 38924-S in terms of physicochemical and microbiological parameters. According to Mora-Alvarado *et al* [1] wells and springs' water quality criteria, the results obtained from analysis of most sampling sites in the community of Corral de Piedra showed excellent quality conditions. A hydrogeochemical characterization of the water extracted from the well was carried out using the Piper diagram, resulting in bicarbonated - calcium type water. The application of the Kendall correlation matrix yielded 25 significant correlations, pH - nitrate and conductivity - bicarbonate being the ones with the highest correlation. Finally, the focal components analysis was performed and it showed that 5 main components explained the data variance in a significant way (85,6%).

Introducción

El agua, como parte de un ecosistema dinámico en el que interactúan recursos naturales y seres vivos, es indispensable para la vida, el bienestar de las personas y el desarrollo de las sociedades [2]. El principio fundamental que define el agua como un derecho humano obliga a las naciones a realizar esfuerzos para que los pobladores cuenten con un recurso de calidad y en cantidad necesaria para satisfacer sus necesidades [3]. En Costa Rica, a pesar

de las labores que realiza la instancia rectora de la gestión de los servicios de agua potable y saneamiento, el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillado (AyA), para promover la organización de las Asociaciones Administradoras de Acueductos (las ASADA), en todos los ámbitos de competencia, algunas comunidades rurales como Corral de Piedra, Guanacaste, requieren apoyo de otros entes como la Universidad Nacional, en este caso por medio del Laboratorio de Manejo del Recurso Hídrico (LAMRHI) y del Programa Horizontes Ambientales: Innovación y Cambio, perteneciente al Instituto de Estudios Sociales en Poblaciones (IDESPO), para el monitoreo de la calidad de las aguas para consumo humano y el fortalecimiento de la gestión comunitaria del agua.

Algunos indicadores muestran condiciones que favorecen la gestión del agua en el país, como los siguientes:

- Costa Rica cuenta con aproximadamente 100 000 millones de metros cúbicos de agua dulce disponible, según el Informe XXIV del Estado de la Nación, 2017.
- El 99,5% de la población recibe agua por tubería; el 91,8%, de calidad potable, y el 86,8% la recibe con tratamiento y desinfección [4].
- Existen en el país más de 1400 Asociaciones Administradoras de Acueductos (ASADA) rurales, que abastecen un 29,5 % de la población, lo que equivale a aproximadamente 1 460 321 personas; sin embargo, algunas de estas ASADA no cuentan con agua potable para el abastecimiento.

La calidad del recurso hídrico está definida como la sumatoria de las características organolépticas y sanitarias que permiten que este sea utilizado para distintos fines, que van desde el consumo hasta el riego de campos y la acuicultura. La introducción de sustancias que alteren esta condición inicial en la composición del recurso es lo que se conoce como contaminación del agua. Puede ocurrir como formas de energía o elementos tanto de fuentes antropogénicas como naturales [5]

El agua para consumo humano en las zonas rurales de Costa Rica presenta condiciones de vulnerabilidad debido a los efectos del cambio climático, la presencia de actividades productivas que requieren de insumos agropecuarios utilizados en algunos casos sin control, la disposición inadecuada de desechos sólidos y líquidos, además de la falta de implementación de acciones de saneamiento en el tratamiento de aguas residuales, entre otros [3], por lo que se hace necesario el monitoreo de las aguas tomando como base las directrices emitidas por el Ministerio de Salud en el Reglamento para la Calidad de Agua Potable, n.º 38924-S, donde se establecen los límites máximos permitidos de los diferentes parámetros físicos, químicos y microbiológicos. Este reglamento tiene como propósito ampliar los parámetros mínimos de potabilidad del agua previamente a su consumo, en todos los operadores de sistemas de abastecimiento en Costa Rica [6]

El agua contaminada y la ausencia de condiciones de saneamiento básico han generado, en todo el mundo, aumento en los casos de enfermedades como el cólera, la hepatitis, la diarrea y la disentería, entre otras [7]. Se estima que aproximadamente 842 000 personas mueren cada año de diarrea como consecuencia de la insalubridad del agua, de un saneamiento insuficiente o de una mala higiene de las manos; si se aumentara la potabilidad del agua se evitarían 361 000 muertes de niños menores de 5 años [5]. Por esta razón el objetivo 6 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible tiene como meta reducir la proporción de la población mundial que no tiene acceso al agua potable; para esto se requiere fortalecer la capacidad de los operadores para brindar agua de mejor calidad, en todas las zonas de Costa Rica, siendo prioridad los operadores ubicados en zonas de alta vulnerabilidad en materia de cambio climático, como el sistema de Corral de Piedra.

Metodología

Descripción del área de estudio

Corral de Piedra se localiza en el distrito San Antonio, cantón de Nicoya, de la provincia de Guanacaste, dentro de las coordenadas 10°24'05" N y 85°32'95" O y 10°22'51" N y 85°33'11" O. Tiene una población aproximada de 90 personas. Al este de esta población, se encuentra el cerro Corral de Piedra; al oeste, la comunidad de Caballito, al norte se ubica el humedal tipo lacustre Corral de Piedra y al sur el Cerro Caballito [8].

De acuerdo a Rojas *et ál* [8], en esta zona existen dos estaciones: la seca, en los meses de diciembre a marzo y la lluviosa, de mayo a octubre; la precipitación media anual es de 2000 mm y la temperatura promedio es de 26 °C, sin embargo, esta zona sufre los embates del cambio climático, pues presenta cambios drásticos en los patrones de precipitación y fuertes épocas de sequía. El Instituto Meteorológico Nacional (IMN) previó en esta zona, para finales del 2018, la influencia del fenómeno de El Niño, pronosticando una disminución de las lluvias y aumentos de las temperaturas, esta condición se extendería hasta julio del 2019 [9].

El área incluye planicies y serranías de poca elevación, con lagunas interconectadas, sujetas a inundaciones estacionales de gran magnitud [8]. La comunidad de Corral de Piedra se encuentra sobre terrenos constituidos por depósitos aluviales formados desde el Holoceno y sobre estos los depósitos de arcilla y limo formando el humedal Corral de Piedra, constituidos en la misma era (Holoceno). El Cerro Corral de Piedra surgió de la formación Curú y Barra Honda hace 65 millones de años, en el Paleoceno [10]; este cerro es rico en material calizo.

Las principales actividades económicas de la zona son la ganadería y cultivos de arroz, piña, caña de azúcar y en menor proporción, otros granos como frijol y maíz [8]. Las personas que viven en Corral de Piedra dependen del agua subterránea para satisfacer sus necesidades básicas, por lo que es extraída de un pozo cercano y abastecida por un grupo comunal que administra el acueducto del lugar; esta gestión se realiza de manera paralela a otros esfuerzos por ser oficializado como una asociación administradora del acueducto comunal (ASADA).

Campañas de muestreo y análisis realizados

El monitoreo de la calidad del agua se realizó en 9 puntos de la red de abastecimiento de agua para consumo, incluyendo el pozo de extracción principal, el tanque de almacenamiento y 7 puntos de la red distribuidos en toda la extensión del acueducto. Se realizaron 7 campañas de muestreo, en las estaciones secas y lluviosas, desde abril del 2015 hasta marzo del 2018, y se logró coleccionar 57 muestras en todo el estudio. En la figura 1 se muestra la distribución de los puntos de monitoreo y su nomenclatura.

La recolección de muestras se realizó en botellas de plástico previamente tratadas según las especificaciones del método 1060 del Standard Methods for Examination of Water and Waste Water [11]. Estas se mantuvieron en refrigeración a 6 °C o menos y fueron trasladadas al laboratorio en un periodo menor de 24 horas, donde permanecieron en almacenamiento en las mismas condiciones; las muestras para los análisis microbiológicos fueron tomadas en recipientes de plástico estériles de un solo uso.

Los parámetros de pH y conductividad se midieron *in situ* utilizando un medidor de campo Thermo Orion Star A222 (Chelmsford, MA, USA); en el mismo lugar también se realizaron las mediciones nefelométricas de turbiedad utilizando un medidor de campo Oakton T100 (Vernon Hills, IL, USA). La alcalinidad total se analizó mediante titulación con ácido sulfúrico (2320 B); la dureza total, mediante complejometría con EDTA (2340 C); los aniones y cationes (cloruro, fluoruro, nitrato, sulfato, calcio, magnesio, sodio y potasio) se analizaron mediante cromatografía

de iones (4110), utilizando un cromatógrafo ThermoScientific ICS 5000 + (Sunnyvale, CA, USA). Los análisis microbiológicos se realizaron mediante la técnica de fermentación en tubo múltiple (9221 E), utilizando el reactivo de Fluorocult®.

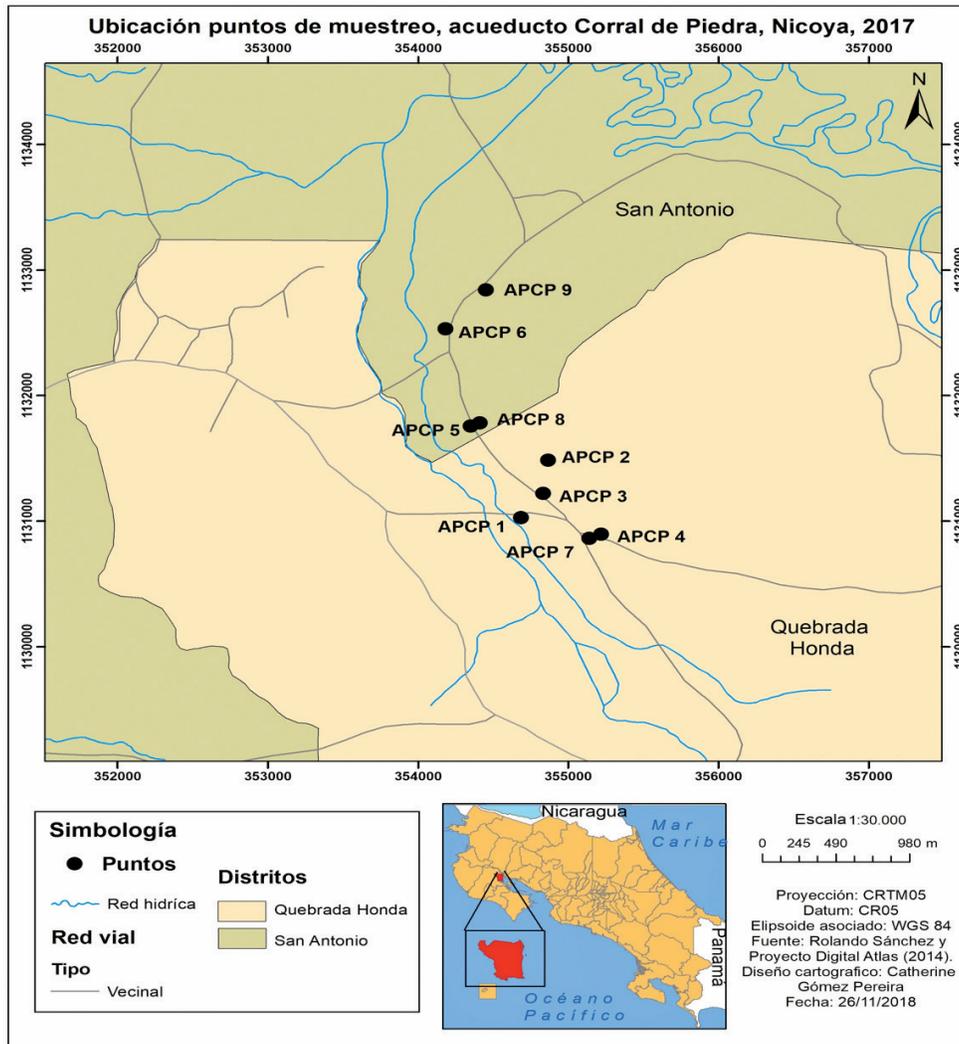


Figura 1. Mapa de ubicación de los puntos de muestreo

Los resultados obtenidos fueron comparados con los parámetros establecidos en el decreto 38924-S Reglamento para la Calidad del Agua Potable y con las Guías para la Calidad del Agua Potable, de la Organización Mundial de la Salud [12]; además se complementó el análisis de calidad utilizando una adaptación de la propuesta publicada por Mora-Alvarado, “Actualización de los criterios para la calidad del agua en pozos y nacientes para potabilización en Costa Rica” [1].

Se realizó un análisis estadístico descriptivo de los datos y se aplicó la técnica de regresión robusta en orden estadístico descrita por Helsel [13] para aquellos datos con valores menores al límite de cuantificación del instrumento o técnica analítica empleada. Los parámetros con más del 80% de los datos con esta característica fueron omitidos de los posteriores análisis estadísticos.

Se calcularon las correlaciones Tau de Kendall y los componentes principales para poder comprender la relación existente entre los parámetros medidos y la calidad del agua en la zona; finalmente, con los resultados obtenidos en el sitio de muestreo correspondiente al pozo de extracción, se realizó el análisis descrito por Piper [14] con el fin de obtener información relevante acerca de la hidrogeoquímica del agua en la zona. Todos los análisis estadísticos, así como la producción de figuras para la presentación de los resultados, se realizaron en R 3.5.1, R Core Team [15], utilizando paquetes como NADA [16] y ggplot2 [17], respectivamente.

Resultados y discusión

Características fisicoquímicas y análisis de calidad

Cuadro 1. Resumen de las características físicas, químicas y microbiológicas del agua de consumo en la comunidad de Corral de Piedra

Parámetro	Unidades	Promedio	DE	Mínimo	Máximo	CR ³	OMS ⁴
pH	-	6,87	0,32	6,05	7,42	6,0-8,0	6,5-9,5
Conductividad		598	107	334	776	400	-
Turbiedad ¹	NTU	1,31	5,01	<0,02	34,1	5,0	5,0
Dureza total	mg/L CaCO ₃	257,6	86,3	63,0	333,6	400	-
Calcio	mg/L	93,8	28,7	19,8	116,0	100	-
Magnesio	mg/L	11,80	0,50	10,50	13,40	50	-
Sodio	mg/L	22,69	6,59	16,00	55,00	200	200
Potasio	mg/L	1,20	1,27	0,42	7,40	10	-
Fluoruro ²	mg/L	-	-	<0,323	1,973	0,7	1,5
Bicarbonato	mg/L	358,7	53,4	268,2	427,2	-	-
Cloruro	mg/L	6,28	0,31	5,39	6,82	250	250
Nitrate ¹	mg/L	3,15	0,92	2,09	6,70	50	50
Sulfato	mg/L	7,95	1,51	6,09	11,28	250	500
Coliformes fecales ²	NMP/100 mL	-	-	ND	23	0	0
Escherichia coli ²	NMP/100 mL	-	-	ND	23	0	0

Notas: 1 Estimación utilizando el método ROS; 2 >80% de los datos son menores al límite de cuantificación de la técnica analítica; 3 Lesgilación de Costa Rica para la calidad del agua potable (Decreto 38924-S); 4 Estándares de la Organización Mundial de la Salud; DE: desviación estándar; NMP: número más probable,

Las características fisicoquímicas del agua de consumo en la comunidad de Corral de Piedra en Nicoya se muestran en el cuadro 1. Estos resultados se compararon con los valores máximos admisibles establecidos en la normativa nacional vigente y con los valores recomendados por las guías para la calidad del agua potable de la OMS. Destaca que los valores de conductividad eléctrica oscilaron de 334 a 776 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con un promedio de 598 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Estos resultados superan los estándares para el consumo humano y a su vez sugieren un contenido importante de minerales disueltos en el agua. No obstante, en algunos índices de calidad aplicados para

el agua de consumo, este parámetro posee un peso relativo menor al 1% [18], debido a que el incumplimiento del parámetro se encuentra relacionado con un posible rechazo por parte del consumidor y no con riesgos para la salud [12]. Para los demás parámetros evaluados, los valores promedio no superan las normativas mencionadas, por lo cual se sugiere que el agua en la red de consumo de la comunidad es apta para el uso que se destina actualmente.

Los valores de pH oscilaron de 6,05 a 7,42, con un valor promedio de 6,87, lo cual indica que el agua es neutra-ligeramente ácida. Esto contrasta con las concentraciones de ion bicarbonato determinadas, las cuales oscilaron entre 268,2 y 427,2 mg/L, con un promedio de 358,2 mg/L, lo cual sugiere un contenido de alcalinidad importante. Según la secuencia de Chevotareb, las aguas con altos contenidos de este ion tienen tiempos de residencia en el suelo muy cortos, que se relacionan con un tipo de recarga en el acuífero directa y rápida [19], [20].

La dureza total osciló de 63,0 a 333,6 mg/L CaCO_3 , con un valor promedio de 257,6 mg/L CaCO_3 , lo que sugiere que el agua en la zona presenta una tendencia a ser dura o muy dura. Estos resultados son congruentes con los estudios realizados por Mora-Alvarado *et ál* [21], que en la zona de Quebrada Honda de Nicoya determinaron un promedio de dureza de 259,6 mg/L CaCO_3 . Este resultado se correlaciona con altas tasas de longevidad, ya que Nicoya posee una de las cinco *zonas azules* que existen en el mundo. Aunada a esto, los resultados pueden sugerir que la naturaleza geológica de la zona de extracción del agua es de un acuífero rico en minerales de calcio y/o magnesio, tipo calizas o dolomitas [22].

La turbidez presentó valores menores al límite de detección del instrumento utilizado y hasta de 34,1 NTU, con un resultado promedio de 1,31 NTU. Algunos resultados obtenidos en el periodo de estudio sobrepasaron los estándares admisibles de las normativas comparadas. La principal fuente de turbidez en el agua es la presencia de partículas en suspensión provenientes de procesos de tratamiento deficientes o bien de la re-suspensión de sólidos en el sistema de distribución. La turbidez es un parámetro de control operativo, ya que además de asegurar la aceptación del recurso por parte del usuario, facilita los procesos de desinfección del agua [12]. En la comunidad de Corral de Piedra, los administradores del acueducto han tenido serios problemas de incrustaciones en las tuberías a causa de los altos niveles de dureza del agua, por lo que se sugiere que estas incrustaciones pueden ser posibles fuentes de la turbidez del agua en la zona.

La concentración de los aniones muestra la siguiente tendencia: $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$. El ion bicarbonato predomina sobre los demás iones, lo que sugiere que existe una recarga rápida del acuífero por influencia del tipo de materiales aluviales no consolidados y la composición del material con contenidos calcáreos [10], [20]. Las concentraciones promedio de sulfato, cloruro y nitrato determinadas fueron de 7,95 mg/L, 6,28 mg/L y 3,15 mg/L, respectivamente; esto indica bajas concentraciones de estos iones [12]. Las fuentes de sulfato y cloruro en aguas subterráneas normalmente se deben a la disolución de minerales de yeso y halita, fuentes antrópicas y deposición atmosférica [23]; mientras que en aguas ya tratadas para el consumo, pueden relacionarse con los productos utilizados para el tratamiento de las aguas [12]. Respecto al ion nitrato, no debe encontrarse de forma natural en aguas subterráneas o de consumo en valores mayores a 10 mg/L, esto debido a que la principal fuente de contribución de esta especie son las actividades antropogénicas, ya sea el uso excesivo de fertilizantes en campos agrícolas o la contaminación con aguas servidas debido a deficientes condiciones de saneamiento [23], [24].

La concentración de los cationes muestra una tendencia en la que $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$. Destaca que la concentración de ion calcio es bastante superior a la de los demás cationes, siendo incluso muy cercana al valor máximo admisible por los estándares comparados, ya que en promedio es de 93,8 mg/L, con valores máximos en el periodo de estudio de 116,0 mg/L.

Este comportamiento es de esperarse cuando se analizan los valores de dureza obtenidos, ya que aguas duras y muy duras suelen contener una cantidad importante de iones calcio [22], [25]. Por su parte, las concentraciones promedio de sodio, magnesio y potasio podrían considerarse bajas si se comparan con el valor máximo admisible de la OMS [12].

La evaluación microbiológica de la calidad se realizó analizando las concentraciones de coliformes fecales y *E.coli*. Los resultados obtenidos muestran que en la mayoría de puntos de monitoreo y campañas realizadas, no se obtuvieron valores detectables según la técnica analítica empleada. No obstante, en 6 de las 57 muestras tomadas (10,5%) se encontraron resultados positivos para coliformes fecales y un único resultado positivo para *E.coli* (1,8%), lo cual indica que en un 89% de las muestras la condición del agua se mantiene dentro de lo establecido en el decreto 38924-S [6].

Para complementar el análisis de calidad del agua sobre los parámetros evaluados, se aplicó la actualización de los criterios para la calidad del líquido en pozos y nacientes, publicada por Mora-Alvarado *et ál* [1]. Esta propuesta establece categorías de calidad según los rangos de concentración de algunos parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua. Los resultados obtenidos para las muestras colectadas en la comunidad de Corral de Piedra aparecen en la figura 2. De manera general, la figura 2a, indica que la mayoría de sitios de muestreo presentaban condiciones de calidad excelente; sin embargo, destaca que hay una porción de aproximadamente 50 muestras de categoría “Mala”. En este sentido, la figura 2b indica que el parámetro de conductividad presenta mayor cantidad de resultados de esta categoría. A su vez, destaca que los análisis de nitratos y cloruros corresponden a la categoría de calidad “Excelente”, esto sugiere que el riesgo de contaminación química por estas sustancias provenientes de materia fecal es bajo. Aunado a esto, en relación con los parámetros microbiológicos, para más de 50 muestras, se determinó una calidad “Excelente”, mientras que para las restantes, una calidad “Buena”.

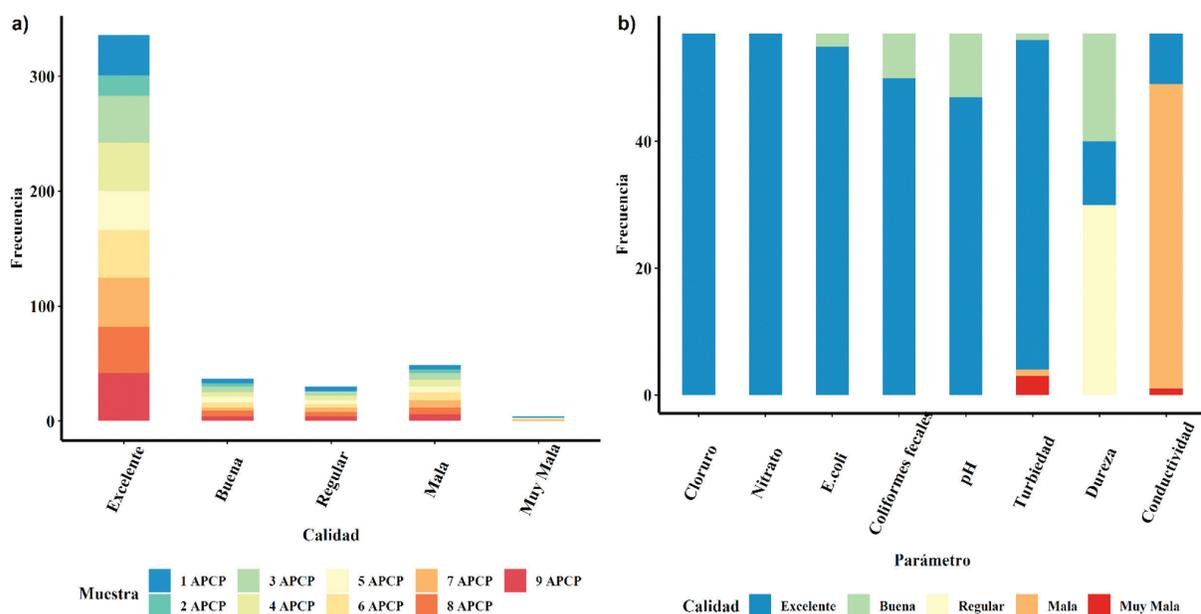


Figura 2. Aplicación de criterios de calidad en el agua de consumo en la comunidad de Corral de Piedra en Nicoya. a) Calidad por punto de muestreo, b) Calidad por parámetro.

Caracterización hidrogeoquímica del agua captada para consumo

La caracterización hidrogeoquímica de las aguas naturales puede ser comprendida por medio del diagrama de Piper [14], donde 7 categorías se definen de acuerdo a las cantidades relativas de aniones y cationes, a través de diagramas triangulares utilizados para demostrar las relaciones más importantes en términos de los constituyentes iónicos predominantes [24], [26]. En la figura 3 se muestra la distribución de los resultados obtenidos en el diagrama Piper de las muestras tomadas en el pozo de extracción. El ión bicarbonato y el ion calcio presentan las mayores concentraciones equivalentes relativas, de lo cual resulta agua del tipo bicarbonatada-cálcica. Esto refuerza la hipótesis de que el tiempo de tránsito del agua por el acuífero es corto ; además es congruente con las características geológicas de la zona y los resultados de dureza encontrados [10], [21].

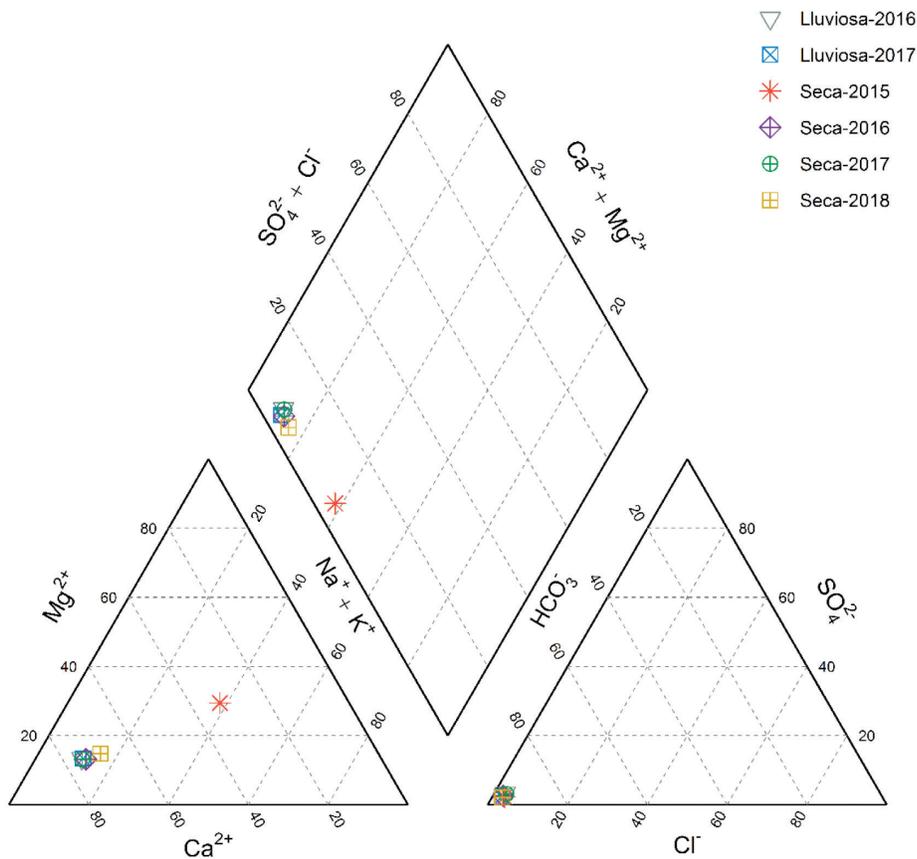


Figura 3. Caracterización hidrogeoquímica del agua extraída para consumo de la comunidad de Corral de Piedra, mediante el diagrama de Piper [14]

Análisis de correlación y de componentes principales

Por medio del coeficiente Tau, que describe la correlación de Kendall, y el análisis de componentes principales, se analizó la asociación que existe entre los parámetros monitoreados en la zona de estudio. En la figura 4 se muestra la matriz de correlaciones, donde destaca una alta cantidad de valores estadísticamente no significativos (41 de 66, $p > 0,05$). Por su parte, las 25 correlaciones significativas, los valores más altos, se deben a la relación de pH-nitrato y conductividad-bicarbonato, ambos con una categoría de correlación moderada; mientras

que para las restantes correlaciones, a pesar de ser significativas, los valores Tau sugieren una baja asociación entre los parámetros [13]. En aguas naturales, principalmente del tipo subterráneas, es común que exista una correlación importante entre iones mayoritarios, esto debido a los procesos naturales de mineralización del agua como a las interacciones agua-roca y otros procesos naturales [22]. Sin embargo, en este caso las muestras provienen de una red de abastecimiento para agua de consumo, lo cual podría favorecer el hecho de que las asociaciones existentes sean menores, debido a los tiempos de residencia del agua en contacto con la tubería y el tanque de almacenamiento, donde además se realizan procesos de cloración, que alteran las correlaciones naturales existentes entre los parámetros.

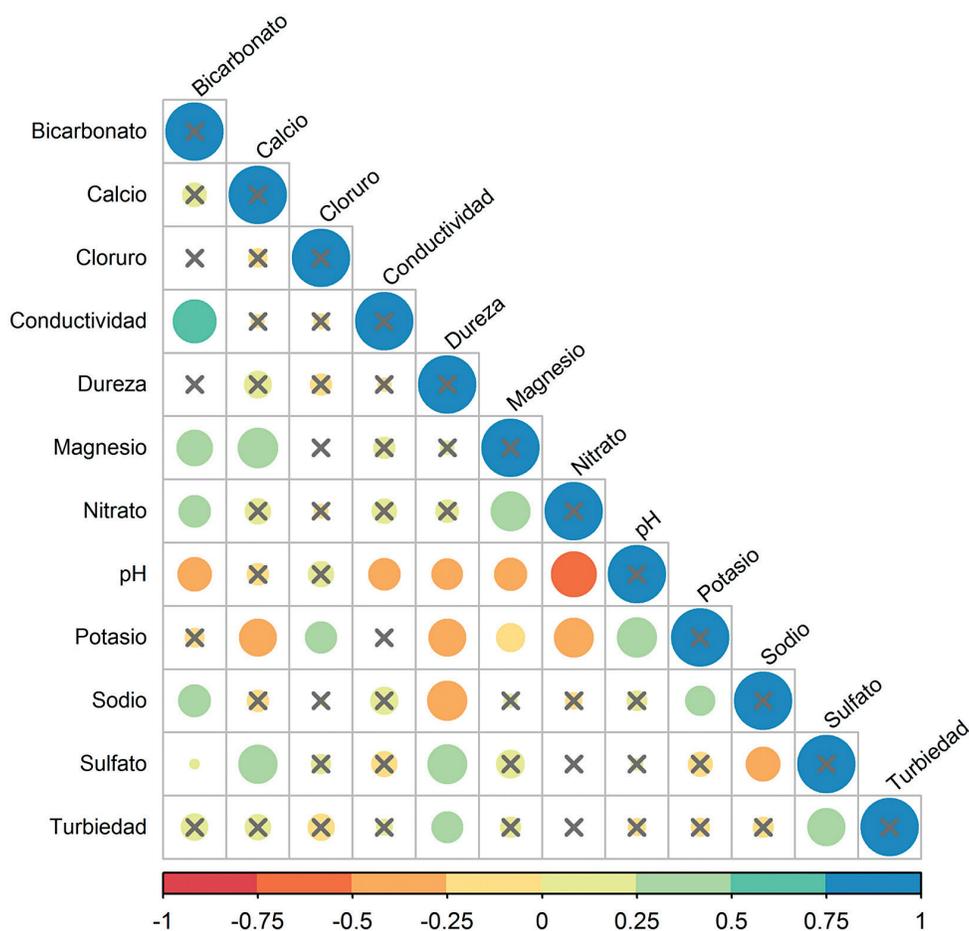


Figura 4. Matriz de correlación de Kendall entre los parámetros analizados en la zona de estudio (la escala inferior describe los valores del coeficiente Tau; las casillas con x indican valores $p > 0,05$).

Se realizó un análisis de componentes principales (PCA) el cual consiste en una prueba de estadística multivariada que permite reducir la amplitud de un conjunto de datos, mediante la generación de componentes que explican, de cierta manera, la variabilidad total de los datos cuando su factor numérico principal (autovector) es mayor a 1. Cada parámetro analizado posee un factor de aporte distinto en cada componente, tomando valores de -1 hasta 1; la mayor contribución relativa a cada componente es la de los valores más cercanos a la unidad, esta técnica ha sido empleada en varios estudios para el análisis de la calidad del agua en pozos de consumo y estudios hidrogeoquímicos [27], [29].

En la figura 5 se muestran los resultados obtenidos del PCA aplicado a los datos de la zona de estudio. Los primeros cinco componentes principales poseen autovectores con valores mayores a 1 (figura 5a), lo que implica que son capaces de explicar en forma significativa la varianza; estos determinan el 85,6% de la variación total de los datos.

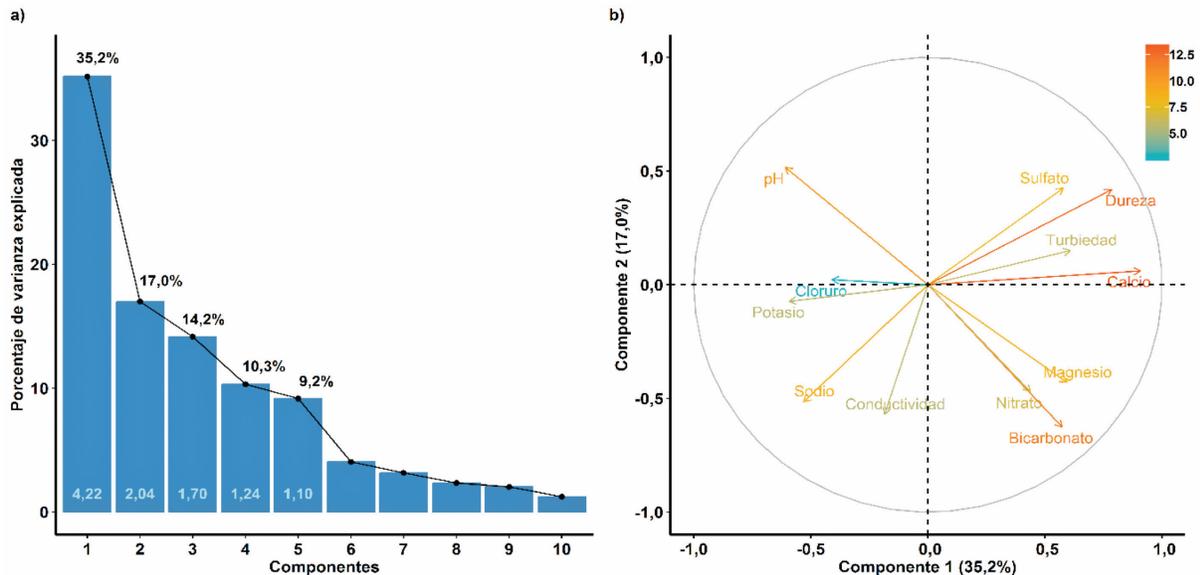


Figura 5. Análisis de los componentes principales en los datos obtenidos en la zona de estudio: a) Porcentaje de varianza explicada por cada componente b) Contribución de cada parámetro en los componentes más significativos

En la figura 5b, se indica el peso relativo de cada parámetro analizado en los componentes 1 y 2, ya que estos explican más del 50% de la variación total; en el componente 1 se identifican la dureza, el calcio, el bicarbonato y el pH como los de mayor contribución; sin embargo, este último posee un valor negativo, lo que sugiere una relación inversa con los primeros; esta puede ser explicada en términos de que los equilibrios de solubilidad que determinan la cantidad de calcio y dureza en el agua, son inversamente proporcionales a la variable de pH. Además, esta relación es congruente con los datos discutidos previamente, ya que el agua en la zona de estudio posee altos niveles de dureza y es del tipo bicarbonatada-cálcica. En el componente 2, nuevamente el bicarbonato y el pH son parámetros cuya contribución relativa es importante; sin embargo, en este caso se suma la conductividad, lo cual también es congruente con lo explicado en el cuadro 1, debido a que el agua en esta zona posee valores altos que superan los máximos admisibles según la normativa nacional; a su vez, se determinó que la correlación existente con los demás parámetros de aporte era del tipo moderada y significativa.

Conclusiones y recomendaciones

Para los parámetros evaluados, los valores promedio no superan lo establecido en el decreto 38924-S del Ministerio de salud, ni lo recomendado por la OMS, por lo que se concluye que el agua es apta para uso y consumo humano.

El valor promedio de pH fue de 6,87, con variaciones que clasifican al agua como neutra - ligeramente ácida, contrastando con las concentraciones de ion bicarbonato determinadas, las cuales sugieren un contenido de alcalinidad importante, con un promedio de 358,2 mg/L.

El valor promedio de dureza total del agua fue de 257,6 mg/L CaCO₃, que es congruente con los estudios realizados por Mora-Alvarado en el 2015, los cuales indicaron que la zona es de agua dura, con un valor de dureza de 259,6 mg/L CaCO₃, correlacionado con las altas tasas de longevidad.

Según los criterios de calidad del agua de pozos y nacientes de Mora-Alvarado *et ál.* (2015), los resultados obtenidos para las muestras colectadas en la comunidad de Corral de Piedra en la mayoría de sitios de muestreo indicaron condiciones de calidad excelente; sin embargo, destaca que hay una porción de aproximadamente 50 muestras en que la calidad es de categoría “Mala”, debido principalmente al parámetro de conductividad.

La caracterización hidrogeoquímica realizada del agua del pozo por medio del diagrama de Piper mostró que el agua en la zona de estudio es del tipo bicarbonatada-cálcica, esto se relaciona con características importantes del acuífero del que se extrae el agua, y sugiere que el tiempo de tránsito en el suelo es corto y la recarga es rápida. Por otra parte, la caracterización también apuntó a que el principal mineral de la formación geológica de la zona de estudio puede ser la caliza, debido a las altas concentraciones de calcio y bicarbonato.

Por medio del análisis estadístico se evaluó la interrelación que existe entre los parámetros fisicoquímicos evaluados, y se encontró una alta proporción de correlaciones de Kendall no significativas; se determinó que esto se debe a que el agua evaluada es de una red de abastecimiento, por lo cual los tiempos de residencia del líquido en las tuberías puede afectar las correlaciones naturales entre los parámetros.

Finalmente, se realizó un análisis de los componentes principales para disminuir la amplitud del conjunto de datos y así poder explicar la variabilidad total de los resultados. Se obtuvieron 5 componentes principales que se relacionan de manera significativa con el 85,6% de la variación total; incluso, se determinó que los componentes 1 y 2 explican más del 50% de esta variabilidad; la dureza, el calcio, el bicarbonato, el pH y la conductividad fueron los parámetros de mayor aporte relativo en estos dos componentes.

Agradecimientos

Nuestro agradecimiento a los miembros de la junta directiva del Comité Comunal Administrador del Agua de Corral de Piedra por el acompañamiento en la toma de las muestras en la comunidad.

A los compañeros Leonardo Mena-Rivera y Viviana Salgado-Silva, quienes participaron durante un periodo importante del proyecto aportando su conocimiento en el diseño, las giras de campo y el análisis de laboratorio.

Al Dr. Juan Carlos Rojas Carrión, director del Centro Médico San Martín, por su apoyo incondicional en la realización de los análisis microbiológicos.

Al M.Sc. Efraín Solís Montiel, coordinador del Laboratorio de Servicios Químicos (LASEQ) de la Universidad Nacional, por su apoyo durante el periodo del estudio.

Declaración de contribuciones

El diseño del estudio fue propuesto por Benavides, las giras de campo fueron realizadas por Benavides, Sánchez, Chaves y Quirós, los análisis de laboratorio y de resultados fueron realizados por Sánchez y colaboración de Chaves; todos los autores contribuyeron a la revisión del manuscrito.

Referencias

- [1] D. A. Mora-Alvarado, A. Mata-Solano, y M. Sequeira-Barquero, "Actualización de los criterios de calidad del agua de pozos y nacientes para potabilización en Costa Rica", *Tecnol. en Marcha*, vol. 29, no. 3, pp. 85–98, 2015.
- [2] D. V. Chapman *et ál.*, "Developments in water quality monitoring and management in large river catchments using the Danube River as an example," *Environ. Sci. Policy*, vol. 64, pp. 141–154, 2016.
- [3] K. M. Bower, "Water supply and sanitation of Costa Rica," *Environ. Earth Sci.*, vol. 71, no. 1, pp. 107–123, 2014.
- [4] J. Herrera-Murillo, "Uso y estado de los recursos: Recurso hídrico", en *Informe Estado de la Nación en Desarrollo Sostenible 2017*, San José, Costa Rica: Programa Estado de la Nación, 2017, pp. 3–31.
- [5] *Agua*, Organización Mundial de la Salud, [Online]. Disponible en <http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water> [recuperado 29-nov.-2018]
- [6] Reglamento para la Calidad del Agua Potable, Decreto n.º 38924-S, 2015
- [7] A. Y. Katukiza, M. Ronteltap, P. van der Steen, J. W. A. Foppen, y P. N. L. Lens, "Quantification of microbial risks to human health caused by waterborne viruses and bacteria in an urban slum," *J. Appl. Microbiol.*, vol. 116, no. 2, pp. 447–463, 2014.
- [8] D. Rojas-Cantillano, J. M. Coto-Campos, C. Benavides-Benavides, V. Salgado-Silva, y J. Jiménez-Torres, "Percepción de los pobladores sobre cambios del entorno en Corral de Piedra, Nicoya, Guanacaste", *Biocenosis*, vol. 29, no. 1–2, pp. 90–96, 2014.
- [9] L.F. Alvarado, Fase actual: transición El Niño", en Boletín del ENOS n.º 115, Instituto Meteorológico Nacional, San José, Costa Rica. Informe 6, 2018.
- [10] P. Denyer T. Aguilar, y W. Montero, Cartografía geológica de la península de Nicoya, Costa Rica: Mapa Geológico de la Hoja Talolinga (1:50000), 29-nov.-2018. [en línea] Disponible en www.geologia.go.cr/paginas/eliminadas/75...75.../memorias_potenciales_percy.pdf
- [11] APHA-AWWA-WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* 22st. ed., American Public Health Association, 2012 [en línea]. Available: <https://www.standardmethods.org/>. [Último acceso: 8-nov.-2018].
- [12] Organización Mundial de la Salud, *Guidelines for Drinking-Water Quality*, 4a ed. Ginebra, 2011.
- [13] D. Helsel y R. Hirsch, "Statistical Methods in Water Resources," en *Hydrologic Analysis and Interpretation*, C. Groat y G. Norton, Eds. Washington, D.C.: U.S. Geological Survey, 2011, pp. 100–218.
- [14] A.M. Piper, "A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses," *Transactions, American Geophysical Union*, vol. 25, no. 6, p 914. doi:10.1029/TR025i006p00914
- [15] R Core Team. *R: Language & Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing 2017.
- [16] L. Lee y D. Helsel, *NADA: Nondetects and Data Analysis for Environmental Data*, R Package Version 1.6-1. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2017.
- [17] H. Wickham. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. New York: Springer-Verlag 2017.
- [18] R. Herojeet, M. S. Rishi, R. Lata, and R. Sharma, "Application of environmetrics statistical models and water quality index for groundwater quality characterization of alluvial aquifer of Nalagarh Valley, Himachal Pradesh, India," *Sustain Water Resour. Manag.*, vol. 2, no. 1, pp. 39–53, 2016.
- [19] H. Khairy and M. R. Janardhana, "Hydrogeochemistry and quality of groundwater of coastal unconfined aquifer in Amol-Ghaemshahr plain, Mazandaran Province, Northern Iran," *Environmental Earth Scs.*, vol. 71, no. 11, pp. 4767–4782, 2014.
- [20] S. M. Yidana, P. Bawoyobie, P. Sakyi, and O. F. Fynn, "Evolutionary analysis of groundwater flow: Application of multivariate statistical analysis to hydrochemical data in the Densu Basin, Ghana," *J. African Earth Scs.*, vol. 138, pp. 167–176, 2018.
- [21] D. A. Mora-Alvarado, C. F. Portuguese-Barquero, N. Alfaro-Herrera, and M. Hernández-Mirault, "Diferencias de dureza del agua y las tasas de longevidad en la península de Nicoya y los otros distritos de Guanacaste," *Rev. Tecnol. en Marcha*, vol. 28, no. 3, pp. 3–14, 2015.
- [22] Y. Zhang *et ál.*, "Hydrochemical characteristics and multivariate statistical analysis of natural water system: A case study in Kangding County, Southwestern China," *Water*, 2018.
- [23] C. Singaraja, S. Chidambaram, M. V Prasanna, C. Thivya, and R. Thilagavathi, "Statistical analysis of the hydrogeochemical evolution of groundwater in hard rock coastal aquifers of Thoothukudi district in Tamil Nadu, India," *Environmental Earth Scs.*, vol. 71, pp. 451–464, 2014.

- [24] N. Chandrasekar, S. Selvakumar, Y. Srinivas, J. S. John Wilson, T. Simon Peter, and N. S. Magesh, "Hydrogeochemical assessment of groundwater quality along the coastal aquifers of southern Tamil Nadu, India," *Environmental Earth Scs.*, vol. 71, no. 11, pp. 4739–4750, 2014.
- [25] I. A. Abboud, "Geochemistry and quality of groundwater of the Yarmouk basin aquifer, North Jordan," *Environmental Geochem. Health*, no. 89, 2018.
- [26] M. El Alfy, A. Lashin, F. Abdalla, and A. Al-Bassam, "Assessing the hydrogeochemical processes affecting groundwater pollution in arid areas using an integration of geochemical equilibrium and multivariate statistical techniques," *Environmental Pollut.*, vol. 229, pp. 760–770, 2017.
- [27] M. Al-harbi, F. M. Al-ruwaih, and A. Alsulaili, "Statistical and Analytical Evaluation of Groundwater Quality in Al-Rawdhatain Field," *Environmental Progress & Sustainable Energy J.*, vol. 33, no. 3, pp. 895–904, 2014.
- [28] H. Saldarriaga-Noreña *et ál.*, "Chemical Evaluation of Groundwater from Supply Wells in the State of Coahuila, México," *J. Water Resource and Protection*, vol. 6, January, pp. 49–54, 2014.
- [29] J. Xu *et ál.*, "Statistical analysis of groundwater chemistry of the Tarim River lower reaches, Northwest China," *Environmental Earth Scs.*, vol. 65, no. 6, pp. 1807–1820, 2012.

Comparación del plan agregado de producción bajo metodologías de autores americanos y europeos

Comparison of the aggregate production plan under methodologies of American and European authors

Felipe Chaves-Aguilar¹, Juan Carlos Ocampo-Rodríguez²,
Pamela Araya-Martínez³, Marcela Meneses-Guzmán⁴,
Rafael Gutiérrez-Brenes⁵

Chaves-Aguilar, F; Ocampo-Rodríguez, J; Araya-Martínez, P; Meneses-Guzmán, M; Gutiérrez-Brenes, R. Comparación del plan agregado de producción bajo metodologías de autores americanos y europeos. *Tecnología en Marcha*. Vol. 33-2. Abril-Junio 2020. Pág 17-26.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v33i2.4201>

Fecha de recepción: 16 de abril de 2019
Fecha de aprobación: 30 de julio de 2019



- 1 Estudiante. Licenciatura en Ingeniería en Producción Industrial. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: fechagui13@hotmail.com.
- 2 Estudiante. Licenciatura en Ingeniería en Producción Industrial. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: juancarlosocampo2@gmail.com
- 3 Estudiante. Licenciatura en Ingeniería en Producción Industrial. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: pamelaam21@gmail.com.
- 4 Profesora e investigadora. Escuela de Producción Industrial. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: mameneses@tec.ac.cr.
- 5 Profesor e investigador. Escuela de Producción Industrial. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: guti@tec.ac.cr.

Palabras clave

Plan agregado de producción; Control de producción; Costo de producción; Fuerza laboral.

Resumen

El objetivo del estudio fue comparar el costo del plan agregado de fabricación de botellas de tereftalato de polietileno (PET) calculado mediante metodologías americana y europea para seis escenarios del plan agregado del proceso, cuya diferencia radica en la modificación de sus variables de decisión. Los pronósticos de la demanda se estimaron mediante el método Winters, los resultados de los planes agregados en la aplicación del caso de estudio se obtuvieron mediante la aplicación del método de la transformada inversa para una distribución uniforme. Se observa que el costo de producción del plan agregado por metodologías de autores europeos es mayor debido a que considera más variables como mano de obra y órdenes atrasadas que el enfoque americano no suma. Sin embargo, no se puede tomar una decisión si existen más o menos variables de costo ya que son los pronósticos los que dictan el rumbo.

Keywords

Aggregate production plan; Production control; Production cost; Labor force.

Abstract

The objective of the study was to compare the cost of the aggregate polyethylene terephthalate (PET) bottle manufacturing plan calculated by American and European methodologies for six scenarios of the aggregate process plan, whose difference lies in the modification of its decision variables. Demand forecasts were estimated using the Winters method, the results of the aggregate plans in the application of the case study were based on the application of the inverse transform method for a uniform distribution. It is observed that the cost of production of the aggregate plan by methodologies of European authors is greater because it considers more variables such as labor and backlogs that the American approach does not add up. Normally you cannot make a decision if there are more or fewer variables of cost since it is the forecasts that dictate the course.

Introducción

Control de producción es planear, coordinar, ejecutar y controlar los recursos productivos para realizar los planes establecidos a nivel estratégico, operativo y táctico [1] [2] [3]; a nivel estratégico contribuye a establecer los objetivos y las metas de las organizaciones [4] [5] a nivel más operativo, contribuye con la planificación de los recursos empresariales y con una de las partes más sensibles de la administración de una organización como es el manejo de pronósticos y sus costos asociados [6], mientras que a nivel táctico se controla en la producción.

Sipper [2] señala que existen dos metodologías utilizadas para llevar a cabo el control de producción, la primera llamada europea e impulsada por Domínguez Machuca y la segunda llamada americana e implementada por Steven Nahmias y Thomas Vollmann. Ambos enfoques se dividen en tres etapas: plan agregado (PA), plan maestro de producción (PMP) y plan de requerimiento de materiales (MRP) [7]. Teniendo en cuenta que la planificación es el paso previo a la ejecución y control de la producción [8], la planeación agregada se encarga del desarrollo del presupuesto de operación y determina los niveles de fuerza laboral e inventario [9].

La planeación agregada desde sus inicios ha otorgado gran ventaja para obtener el análisis de las necesidades de insumos para fabricar y distribuir porque propicia conocer la demanda en un horizonte de tiempo, permitiendo que las organizaciones trabajen a pleno en sus tiempos de producción y despacho de producto terminado, para que su rendimiento y costos se vean reflejados positivamente [10]. A mediados de los años 50 la planeación agregada fue formalizada por Holt, Modigliani, Simon y Muth [11] [12] [13], siendo aplicada en materia de dirección de operaciones [14] [15]. En las últimas décadas, las estrategias para llevar a cabo la planificación agregada han cambiado constantemente [16] generándose principalmente dos corrientes formales de pensamiento: en España impulsada por Machuca en la década de los noventa y en Estados Unidos por Vollmann y Nahmias a inicios de los años 2000. Se identifican otros esfuerzos diferentes de autores provenientes de India, Malasia, México y Brasil [16] [17] [18].

Considerando que ambos enfoques, el americano y europeo, utilizan la planeación agregada para ajustar la capacidad de producción a la demanda de una organización y muestra el costo total de producción [8], el objetivo de este estudio consiste en comparar el manejo de los costos del plan agregado de producción propuesto por cada enfoque.

Entre los insumos para elaborar el plan agregado se encuentran: pronósticos, restricciones, costos, variables de decisión y criterios de evaluación [10] [19] [20].

El objetivo de los pronósticos es revelar previsiones en un tiempo adecuado y contemplando un nivel alto de exactitud [2] [21] [22]. Para ejecutar la planeación agregada se traducen los pronósticos de la demanda en un esquema de planeación que toma en cuenta la fuerza laboral y la producción durante un periodo determinado [23].

Ambos enfoques utilizan métodos de programación lineal para desarrollar el plan agregado el cual es uno de los más importantes y difundidos en la literatura para este objetivo [10] [24]. Adicionalmente, Machuca, desarrolla la planeación agregada transformando los pronósticos en unidades agregadas, donde satisface planes a largo plazo con el menor costo posible.

Los costos empleados por la metodología de autores europeos contemplan los costos de producción (mano de obra y materiales), inventario (almacenaje y faltantes) y capacidad (contratación y capacitación) mientras que la de autores americanos contemplan costos de suavización, faltantes, tiempos normales, tiempos extras y tiempos muertos, costos de despido, contrataciones y mantener unidad en inventario.

Las variables de decisión para ambos enfoques son inventario, nivel de fuerza laboral, nivel de producción, horizonte de planeación [10]. Cabe mencionar que las metodologías de autores americanos y europeos no consideran las restricciones ni criterios de evaluación.

Los planes agregados se pueden llevar a cabo por medio de planes cero inventarios para movilizar la fuerza laboral con la intención de tener un nivel de inventario mínimo almacenado [23] o planes de trabajo de fuerza constante donde se elimina por completo la necesidad de contratar o despedir durante el horizonte de planeación, teniendo la cantidad óptima de fuerza laboral [1] [23].

Para establecer una mejor asignación y ordenamiento de los recursos en el tiempo, se realiza el plan maestro de producción que utiliza la información que proporciona el plan agregado [19] [25]. La idea principal del plan maestro de producción es traducir la información que brinda el plan agregado a unidades específicas, considerando como base los pronósticos obtenidos en este plan. El plan de requerimiento de materiales (MRP) se encarga de transformar, el plan maestro de producción en un programa que detalla las necesidades de materiales y componentes para la fabricación del producto final [19] [26]. El MRP debe determinar el tiempo de producción que considere la cantidad de materiales y componentes necesarios para la

producción [1]. De aquí el impacto que posee el plan agregado de producción en las demás etapas para llevar a cabo el control de producción.

El trabajo se encuentra organizado de la siguiente forma, primero se exponen los modelos empleados por ambos enfoques para determinar el costo de producción. Seguidamente se presenta el caso de estudio y se presentan los enunciados que modifican las variables de decisión. En la sección de resultados se presenta los pronósticos estimados de la demanda y los costos del plan agregado tanto de la aplicación como de los enunciados para cada enfoque. La discusión se realiza comparando los resultados para el plan cero inventarios y para el plan fuerza constante. Al final se presentan las principales conclusiones.

Metodologías para generar el plan agregado

Las variables y costos utilizados por metodologías americana y europea para determinar plan agregado se muestran en cuadro 1; ambas metodologías consideran las mismas variables, excepto que el enfoque europeo, adicionalmente, considera la cantidad de mano de obra y cantidad y costo de órdenes atrasadas.

Cuadro 1. Parámetros utilizados en el plan agregado por ambas metodologías

		Metodología de autores				
		Americanos		Europeos		
Plan		Cero inventarios	Fuerza constante	Cero inventarios	Fuerza constante	
Variables	n_t : Periodo de producción	n_t : Periodo de producción	n_t : Periodo de producción	n_t : Periodo de producción	n_t : Periodo de producción	
	k_t : Unidades por trabajador	k_t : Unidades por trabajador	k_t : Unidades por trabajador	k_t : Unidades por trabajador	k_t : Unidades por trabajador	
	K_t : Unidades Producidas	K_t : Unidades Producidas	K_t : Unidades Producidas	K_t : Unidades Producidas	K_t : Unidades Producidas	
	D_t : Pronósticos	D_t : Pronósticos	D_t : Pronósticos	D_t : Pronósticos	D_t : Pronósticos	
	W_t : Nivel de fuerza laboral	W_{mt} : Nivel de fuerza laboral mayor	W_t : Nivel de fuerza laboral	W_{mt} : Nivel de fuerza laboral mayor	W_t : Nivel de fuerza laboral	W_{mt} : Nivel de fuerza laboral mayor
	I_t : Nivel de inventario	I_t : Nivel de inventario	I_t : Nivel de inventario	I_t : Nivel de inventario	I_t : Nivel de inventario	I_t : Nivel de inventario
	P_t : Nivel de producción	P_t : Nivel de producción	P_t : Nivel de producción	P_t : Nivel de producción	P_t : Nivel de producción	P_t : Nivel de producción
	H_t : Cantidad de contrataciones	H_t : Cantidad de contrataciones	H_t : Cantidad de contrataciones	H_t : Cantidad de contrataciones	H_t : Cantidad de contrataciones	H_t : Cantidad de contrataciones
	F_t : Cantidad de despidos	F_t : Cantidad de despidos	F_t : Cantidad de despidos	F_t : Cantidad de despidos	F_t : Cantidad de despidos	F_t : Cantidad de despidos
					O_t : Cantidad de órdenes atrasadas	O_t : Cantidad de órdenes atrasadas
Costos	C_H : Contrataciones			C_H : Contrataciones		
	C_F : Despidos			C_F : Despidos		
	C_I : Unidad en inventario			C_I : Unidad en inventario		
				C_M : Mano de obra		
				C_O : Órdenes atrasadas		

Parámetros de modelo

$$K_t = n_t * k_t$$

$$W_t = D_t/K_t \quad \text{ó} \quad W_{mt} = \max\{D_t/K_t\}$$

$$P_t = K_t * W_t \quad \text{ó} \quad P_t = K_t * W_{mt}$$

$$I_t = D_t - P_t$$

Costo de producción (CP) del plan agregado cero inventarios y fuerza constante de autores americanos

$$CP = \sum_{t=1}^T (C_H * H_t + C_F * F_t + C_I * I_t) \quad (1)$$

Costo de producción (CP) del plan agregado cero inventarios y fuerza constante de autores europeos

$$CP = \sum_{t=1}^T (C_H * H_t + C_F * F_t + C_M * W_t + C_I * I_t + C_O * O_t) \quad (2)$$

Aplicación en un caso de estudio

El caso de estudio es en una empresa dedicada a la fabricación de botellas de tereftalato de polietileno (PET), en dos líneas de producción en el periodo de octubre 2016 a setiembre 2017. La empresa cuenta con 6 trabajadores para la fabricación, el horizonte de producción es de 26 días y cuenta con una razón de producción de 100.000 botellas por día de tres tipos de botellas. Los valores observados de la demanda en un periodo de tiempo (X_t) fueron obtenidos del informe de producción brindado por el departamento de operaciones. El estudio contempla el impacto del plan agregado de producción para toda la producción

Pronósticos

Se utiliza el método suavizado exponencial de Winters ya que los datos son aleatorios, con tendencia y estacionalidad [2], donde el pronóstico para el periodo t (D_t) se determina por medio de la ecuación 3 utilizando un error medio de 0,05.

$$D_t = (S_t + kB_t) * C_{t+k-gl} \quad (3)$$

Donde:

$$S_t = \alpha \left(\frac{X_t}{C_{t-L}} \right) + (1 - \alpha)(S_{t-1} + B_{t-1})$$

$$B_t = \beta(S_t - S_{t-1}) + (1 - \beta)B_{t-1}$$

$$S_t = \gamma \left(\frac{X_t}{S_t} \right) + (1 - \gamma)C_{t-1}$$

$$\alpha = \left(\frac{2}{n+1} \right)$$

$$\beta \leq \left(\frac{2}{\alpha} - 1 \right) = \sqrt{\left(\frac{2}{\alpha} - 1 \right)^2 - 1}$$

$$\gamma = 0,05$$

X_t : valor observado en el periodo t

S_t : valor estimado aleatorio en periodo t

B_t : valor estimado tendencia en periodo t

C_t : valor estimado estacional en periodo t

k : periodos futuros a pronosticar

L : número de estaciones

t : periodos con datos futuros

g : entero más pequeño mayor/igual que k/L

γ : error medio

Definición de escenarios

Se utiliza el método de la transformada inversa de la distribución uniforme para generar 6 escenarios cada uno de los cuales presenta un escenario de aumento y disminución en cada una de las variables de decisión actuales: nivel de fuerza laboral (6 trabajadores), nivel de producción (100.000), horizonte de planeación (26 días).

Los escenarios son los siguientes:

Escenario 1. Días entre 26-30.

Escenario 2. Días entre 20-26.

Escenario 3. Fuerza laboral de 0 a 6 colaboradores.

Escenario 4. Fuerza laboral de 6 a 10 colaboradores.

Escenario 5. Nivel de producción entre 100.000 y 150.000.

Escenario 6. Nivel de producción entre 50.000 y 100.000.

La figura 1 muestra una esquematización de la forma en que se abordarán los escenarios para cada tipo de metodología y plan.

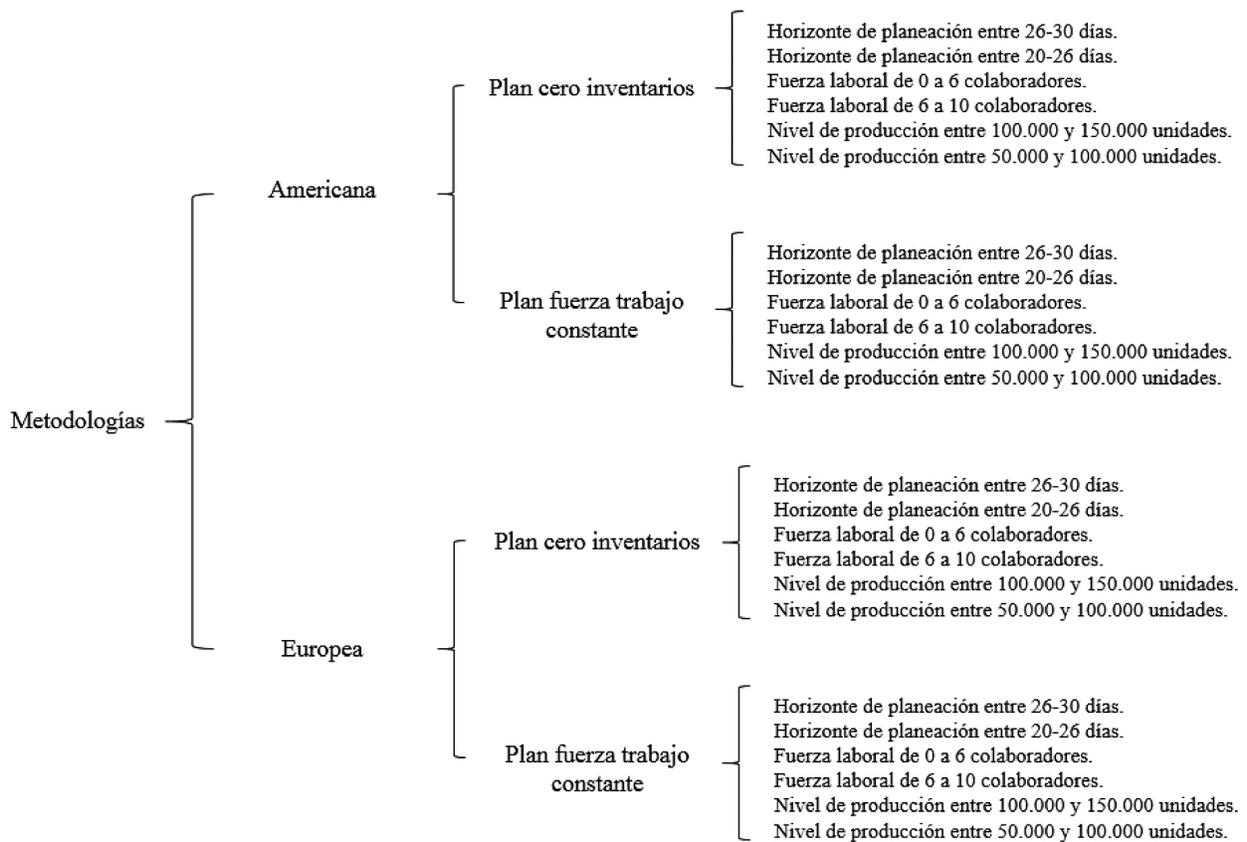


Figura 1. Aplicación de los escenarios para cada metodología y plan.

Resultados

El cuadro 2 muestra los pronósticos, calculados mediante la ecuación (3) para cada período. Estos se mantienen constantes para el desarrollo de todos los escenarios.

Cuadro 2. Pronósticos proyectados

Período	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Pronóstico (unidades)	991.377	1.081.944	664.454	314.303	502.745	1.036.597

Período	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Pronóstico (unidades)	793.292	291.413	451.413	235.850	820.314	1.010.911

Adicionalmente se obtuvieron los siguientes resultados un MAPE (Error Porcentual Absoluto Medio) de 0.201% el cual muestra un buen ajuste.

El cuadro 3 presenta, a partir de las ecuaciones (1) y (2), los resultados del costo total de producción y cantidad de inventario para cada uno de los planes de cero inventario y fuerza constante bajo ambas metodologías.

Cuadro 3. Costo total de producción del plan agregado

	Americano		Europeo	
	Cero Inventario	Fuerza constante	Cero Inventario	Fuerza constante
Costo (en colones)	23.890.845	35.681.303	46.011.922	66.289.947
Inventario (unidades)	605.387	5.005.387	605.387	5.005.387

Se efectuaron 250 réplicas para cada uno de los escenarios, el costo promedio de producción se muestra en el cuadro 4, mientras la cantidad de inventario promedio se muestra en el cuadro 5.

Cuadro 4. Costo total de producción del plan agregado bajo cada escenario

Escenario	Costo de producción (en colones)				Costo de producción (%)			
	Cero Inventario		Fuerza constante		Cero Inventario		Fuerza constante	
	Americano	Europeo	Americano	Europeo	Americano	Europeo	Americano	Europeo
1	24.186.113	42.091.306	31.951.050	67.519.794	1,24%	-8,52%	-10,45%	1,86%
2	28.861.679	49.886.131	31.781.250	74.545.005	20,81%	8,42%	-10,93%	12,45%
3	25.928.815	47.979.528	34.209.565	68.312.281	8,53%	4,28%	-4,12%	3,05%
4	21.938.876	44.059.953	30.305.628	64.343.190	-8,17%	-4,24%	-15,07%	-2,94%
5	22.282.823	38.651.515	31.037.479	62.971.778	-6,73%	-16,00%	-13,01%	-5,01%
6	76.775.649	119.282.569	269.887.217	458.961.935	221,36%	159,24%	656,38%	592,36%

Los porcentajes corresponden al aumento o decremento del costo de producción de cada escenario en comparación al plan original

Cuadro 5. Cantidad de inventario bajo cada escenario

Escenario	Inventario (unidades)				Inventario (%)			
	Cero Inventario		Fuerza constante		Cero Inventario		Fuerza constante	
	Americano	Europeo	Americano	Europeo	Americano	Europeo	Americano	Europeo
1	683.464	690.956	5.017.049	5.669.833	12,90%	14,13%	0,23%	13,27%
2	515.249	507.279	4.804.279	5.519.925	-14,89%	-16,21%	-4,02%	10,28%
3	605.387	605.387	5.005.387	5.005.387	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
4	605.387	605.387	5.005.387	5.005.387	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
5	747.587	750.681	5.041.840	5.533.973	23,49%	24,00%	0,73%	10,56%
6	427.958	425.788	428.783	426.231	-29,31%	-29,67%	-91,43%	-91,48%

Los porcentajes corresponden al aumento o decremento del inventario de cada escenario en comparación al inventario del plan original

Discusión

En general y para todos los escenarios la metodología de autores americanos presenta costos de producción menores en comparación a la metodología empleada por autores europeos. El enfoque de autores europeos contempla costos de mano de obra y de órdenes atrasadas que en la metodología de autores americanos no considera.

Plan cero inventario

Para la metodología de autores americanos en el escenario 1 el costo de producción aumenta en un 1,24% respecto al plan original, ya que al aumentar el horizonte de planeación se crea mayor producción, consecuentemente el inventario que existe crece un 12,90% incrementando el costo de almacenaje. En la metodología de autores europeos el costo de producción disminuye en 8,52% al ocupar menor fuerza laboral, por su parte el inventario aumenta en un 14,13% por mantener una producción constante mayor a lo pronosticado. En el escenario 2 para ambas metodologías, al disminuir el horizonte de planeación, el inventario decrece (14,89% en el enfoque americano y 16,21% para el enfoque europeo) ya que la producción se ajusta a los pronósticos y la fuerza laboral aumenta consecuencia de que hay menor tiempo para cumplir con la producción y un aumento en los costos de contratación y despidos.

Para el escenario 3 en ambos enfoques, al contar con menor fuerza laboral inicial el costo de producción incrementa en un 8,53% bajo la metodología de autores americanos y 4,28% bajo la metodología de autores europeos, esto por el aumento de contrataciones; sin embargo, el escenario 4 para ambos enfoques presenta una disminución en el costo de producción en un 8,17% y 4,24% respectivamente, ya que al contar con mayor fuerza laboral inicial se incurre en menos contrataciones. Al variar solo fuerza laboral inicial los inventarios se mantienen igual debido a que la razón de producción y el horizonte de planeación no varían.

En el escenario 5 para ambos enfoques disminuye el costo de producción en un 6,73% para el enfoque de autores americanos y 16,00% en el enfoque de autores europeos, esto al ser la fuerza laboral necesaria mínima por el aumento de la razón de producción, así los costos de contratación y despidos son mínimos; sin embargo, respectivamente sus inventarios aumentan en un 23,49% y un 24,00%, por el aumento de la producción. Aumenta el costo de producción para ambas metodologías en el escenario 6 en un 221,36% para el enfoque de autores americanos y 159,24% en el enfoque de autores europeos dado que la fuerza laboral debe de incrementarse para satisfacer la demanda, así aumentan los costos de contratación y despidos, pero para este escenario el inventario disminuye para ambos enfoques debido al ajuste de la producción a lo pronosticado.

Plan fuerza constante

En la metodología de autores americanos en el escenario 1 y 2 el costo de producción disminuye, debido al decremento del costo de despidos, sin embargo, al contar con un mayor horizonte de planeación el inventario aumenta en un 0,23% dado que la razón de producción no varía significativamente y disminuye un 4,02% al contar con un menor horizonte de planeación. Para la metodología de autores europeos en ambos escenarios, el costo de producción aumenta, así como las unidades en inventario, ya que la razón de producción no presenta una variación significativa y el aumento del costo se debe al contemplar el costo de mano de obra.

El escenario 3 y 4 bajo la metodología de autores americanos el costo de producción disminuye debido al requerimiento de la fuerza laboral que afecta los costos de contratación y despidos, por el mismo motivo el escenario 4 bajo la metodología de autores europeos el costo disminuye, mientras que bajo este enfoque en el escenario 3 se da un aumento del costo debido al requerimiento de la fuerza laboral que aumenta el costo de mano de obra.

En el escenario 5 para ambos enfoques disminuye el costo de producción esto porque la fuerza laboral necesaria al ser mínima por el aumento de la razón de producción, los costos de contratación y despidos son menores, por el mismo motivo del plan cero inventarios la cantidad de unidades en inventario aumentan para cada enfoque. Aumenta el costo de producción para ambas metodologías en el escenario 6 en un 656,38% para el enfoque americano y 592,36% en el enfoque de autores europeos dado que la fuerza laboral debe de incrementarse para satisfacer la demanda, así aumentan los costos de contratación y despidos, pero para este escenario el inventario disminuye para ambos enfoques debido al ajuste de la producción a lo pronosticado.

Conclusiones

Se han comparado los costos del plan agregado de producción impulsados por autores americanos y europeos. Se han aplicado a seis escenarios en donde se varía el nivel de fuerza laboral, nivel de producción, horizonte de planeación e inventario, en la fabricación de botellas de tereftalato de polietileno (PET).

Ambas metodologías presentan similitudes en sus consideraciones para determinar el costo de producción en el plan agregado, sin embargo, la metodología europea presenta un mayor costo de producción debido a que considera más variables de costo en su determinación que el enfoque americano, como mano de obra y órdenes atrasadas.

Para ambas metodologías el resultado de los costos funciona como una guía para la toma de decisiones, pero normalmente no se puede tomar una decisión si existen más o menos variables de costo ya que son los pronósticos los que dictan el rumbo. Los pronósticos permiten adecuar la producción a la razón de producción y al horizonte de planeación estableciendo los siguientes parámetros para ambos tipos de planes (cero inventarios y fuerza laboral constante): el primero es el costo de producción como guía en la toma de decisiones y el segundo es la determinación de la fuerza laboral necesaria para producir una cantidad de producción, este parámetro aplicado a ambos planes es el que posee el mayor peso para la toma de decisiones.

Referencias

- [1] J. Domínguez Machuca, Á. G. M. M. Domínguez Machuca, S. García González y A. Ruiz Jiménez, Dirección de Operaciones. Aspectos tácticos y operativos en la producción y los servicios, McGraw-Hill, 1995.
- [2] D. Sipper, Planeación y control de la producción, México D.F.: McGraw-Hill, 1998.

- [3] J. Raposo, A. Matos y A. Nunes, «Planning and Control of Production in the Improvement Manufacturing Process of Production Tables Games: A Case Study,» *Book of Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management*, pp. 1060-1068, 2013.
- [4] R. Carro, *El sistema de producción y operaciones. Administración de las operaciones*, 2014.
- [5] M. ValenciA, F. Díaz y J. Correa, «Planeación de inventarios con demanda dinámica. Una revisión del estado del arte,» *Dyna*, vol. 190, n° 82, pp. 183-191, 2015.
- [6] R. del Solar, I. Chacón y M. Ponce, «Plan agregado de producción en barracas madereras. estudio de caso para una pequeña industria.,» *Maderas: Ciencia y Tecnología*, vol. 2, n° 10, pp. 77-92, 2008.
- [7] J. Rojas y S. Escudero, *Reprogramación de operaciones en procesos de producción: Complejidad y alternativas de solución*, México D.F.: Instituto Politécnico Nacional, 2000.
- [8] A. Núñez, L. Guitart y X. Baraza, *Dirección de operaciones: Decisiones tácticas y operativas*, Barcelona : UOC, 2014.
- [9] S. Narasimhan, *Planeación de la producción y control de inventarios*, México: Prentice Hall Hispanoamericana, 1996.
- [10] O. Dante, A. Corominas, A. Lusa y O. Boiteux, *Estado del arte sobre planificación agregada de la producción*, Cataluña: Instituto de la organización y sistemas industriales: Barcelona, 2007.
- [11] C. C. Holt, F. Modigliani, y H. A. Simon, «Linear decision rule for production and employment scheduling,» *Management Science*, vol. 2, pp. 1-30, 1955.
- [12] C. C. Holt, F. Modigliani, J. F. Muth y H. A. Simon, «Derivation of a linear decision rule for production and employment,» *Management Science*, vol. 2, pp. 159-177, 1956.
- [13] C. C. Holt, F. Modigliani y J. F. Muth, «Planning production, inventory and workforce,» New York: Prentice Hall,, 1960.
- [14] E. S. Buffa, *Operations management; Problems and models.*, Jhon Wiley & Sons., 1968.
- [15] A. Hax, «Handbook of operations research. Models and applications,» Litton Educational Publishing ed, 1978.
- [16] J. Mula, R. Poler y J. García, «Evaluación de Sistemas para la Planificación y Control de la Producción.,» *Información tecnológica*, vol. 1, n° 17, pp. 19-34, 2006.
- [17] A. Gunasekaran y H. Marri, «Application of aggregate production planning in developing countries,» *International Journal of Computer Applications in Technology*, vol. 4, n° 20, pp. 172-179, 2004.
- [18] G. Buxey, «Aggregate planning for seasonal demand; reconciling theory with practice,» *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 11, n° 25, pp. 1083-1100, 2005.
- [19] T. Vollmann, *Planeación y control de la producción*, México: McGraw Hill, 2005.
- [20] J. Cruelles Ruiz, *Stock, Procesos y Dirección de Operaciones*, Marcombo, 2015.
- [21] R. Pindyck y D. Rubinfeld, *Econometría, modelos y pronósticos*, México: McGraw Hill, 2001.
- [22] J. Heizer y B. Render, *Dirección de la producción-Decisiones tácticas*, Sexta ed., Editorial Prentice-Hall., 2001.
- [23] S. Nahmias, *Análisis de la producción y operaciones*, McGraw Hill., 2014.
- [24] J. Singhal y K. Singhal, Holt, Modigliani, Muth, and Simons work and its role in the renaissance and evolution of operations management, *Journal of Operations Management*, 2006.
- [25] J. Acevedo y G. Mejía, *Programación Reactiva y Robusta de la Producción en un Ambiente Sistema de Manufactura Flexible: Llegada de Nuevas Órdenes y Cambios en la Prioridad de las Órdenes del Trabajo*, Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes, 2006.
- [26] J. Orlicky, *Material Requirements Planning*, Londres: McGraw Hill, 1975.

Alpha-tubulin promoter from *Chlorella vulgaris* allows genetic transformation of green coccoid microalga

El promotor de la alfa-tubulina de *Chlorella vulgaris* permite la transformación genética de la microalga verde tipo cocoide

Raquel Fernández-Rodríguez¹, Giovanni Garro-Monge²,
Maritza Guerrero-Barrantes³, Olman Gómez-Espinoza⁴

Fernández-Rodríguez, R; Garro-Monge, G; Guerrero-Barrantes, M; Gómez-Espinoza, O. Alpha-tubulin promoter from *Chlorella vulgaris* allows genetic transformation of green coccoid microalga. *Tecnología en Marcha*. Vol. 33-2. Abril-Junio 2020. Pág 27-36.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v33i2.4155>

Fecha de recepción: 14 de mayo de 2019
Fecha de aprobación: 3 de setiembre de 2019

- 1 Ingeniera en Biotecnología. Centro de Investigación en Biotecnología, Escuela de Biología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: raquel_fernandezr@hotmail.com.
- 2 Biólogo. Máster en Genética. Centro de Investigación en Biotecnología, Escuela de Biología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: ggarro@tec.ac.cr.
 <https://orcid.org/0000-0001-7578-1938>
- 3 Bióloga. Máster en Ecología. Centro de Investigación en Biotecnología, Escuela de Biología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: mguerrero@tec.ac.cr
- 4 Ingeniero en Biotecnología. Máster en Biología Celular y Molecular Aplicada. Centro de Investigación en Biotecnología, Escuela de Biología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: oespinoza@tec.ac.cr.
 <https://orcid.org/0000-0002-8878-078X>



Palabras clave

Electroporación; kazusa; estreptomycin; transgénico; Caja TATA.

Resumen

Las microalgas se han convertido en una plataforma viable para la producción de proteínas recombinantes de alto valor. Aunque se han desarrollado diversos conjuntos de herramientas genéticas para la transformación de microalgas, algunos elementos críticos, como los promotores endógenos, deben mejorarse para aumentar los niveles de expresión génica posterior al proceso de transformación. Para contribuir a ello, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar una secuencia de la región 5' del gen alfa-tubulina de *Chlorella vulgaris*, como promotor para la expresión de un gen resistencia a antibiótico en *Chlorella sorokiniana*. Mediante análisis *in silico* se logró identificar un promotor proximal correspondiente a 281 nucleótidos corriente arriba del codón de inicio ATG, el cual poseía 9 potenciales elementos reguladores en cis, incluyendo Caja TATA y Caja CAAT. La secuencia promotora proximal se usó para dirigir la expresión de un gen de resistencia a la estreptomycin (*aada*), previa optimización de su uso de codones. La optimización de codones de la secuencia *aada* permitió obtener un contenido de GC del 69,8% (en comparación con el 53% del gen original), lo que aumenta su similitud con los genomas de *Chlorella sp.* (67,2%). Ambos elementos genéticos se clonaron en el vector pUC57-Kan y se transformaron en células de *C. sorokiniana* mediante electroporación. Las colonias de microalgas transgénicas fueron identificadas a través de cultivo en medio selectivo y PCR. Nuestros resultados demostraron la capacidad del promotor alfa-tubulina de *Chlorella vulgaris* para expresar un gen heterólogo de resistencia a antibiótico en células de *C. sorokiniana*. La investigación de secuencias promotoras endógenas es esencial para lograr una expresión génica heteróloga eficiente, especialmente en microalgas utilizadas para la producción industrial como las del género *Chlorella*.

Keywords

Electroporation; kazusa; streptomycin; transgenic; TATA-box.

Abstract

Microalgae have become a feasible platform for high-value recombinant protein production. Although diverse sets of genetic tools for microalgae transformation have been developed, some critical elements, such as endogenous promoters, need to be improved for increasing transgenic expression levels after genetic transformation. This work aimed to evaluate a sequence from the 5' upstream region of the alpha-tubulin gene from *Chlorella vulgaris* as a promoter for the expression of an antibiotic resistant gene in *Chlorella sorokiniana*. Using *in silico* analysis it was possible to identify a proximal promoter corresponding to 281 nucleotides upstream of the ATG start codon, which possessed 9 potential cis-regulatory elements, including TATA Box and CAAT Box. The proximal promoter sequence was used to drive the expression of a streptomycin-resistance gene (*aada*), previous optimization of its codon usage. The codon optimization of the *aada* sequence allowed investigators to obtain a GC content of 69,8% (compared to 53% of the original sequence), which increases its similarity with *Chlorella sp.* genomes (67,2%). Both genetic elements were cloned into the pUC57-Kan vector and transformed into *C. sorokiniana* cells by electroporation. The microalgae transgenic colonies were identified through culture in selective medium and PCR. Our results proved the capacity of the *Chlorella vulgaris* alpha-tubulin promoter to express a foreign antibiotic-resistance gene in *C. sorokiniana* cells. Research of endogenous promoting sequences is essential in order to accomplish an efficient heterologous gene expression, especially in microalgae used for industrial production like those from *Chlorella* genus.

Introduction

Microalgae are a diverse and polyphyletic group of single-cell photosynthetic organisms, both eukaryotes and prokaryotes, which can easily grow in a wide range of habitats under photoautotrophic conditions [1]. To date, microalgae have gained considerable attention as a low cost model for the production of a wide range of commercial goods, such as food and animal feed additives, ingredients in cosmetics, or as value-added compounds (pigments, therapeutic proteins, fatty acids) [2]. More recently, microalgae have been also the object of an increasing interest as alternative host for recombinant protein production because of their economic benefits and ecofriendly characteristics [3], [4].

Despite their inherent advantages as biological factories for the large-scale production of recombinant molecules [5], [6]; the number of microalgae species that have been genetically modified has increased slowly and it is still scarce [7]. One of the main obstacles which limits the development of microalgae genetic engineering is the lack of plasmid vectors with all the essential elements for their transformation [8]. Among the critical elements for an efficient expression of the biomolecules, the use of specific promoters for microalgae stands out; however, the lack of endogenous promoters is one of the main drawbacks to achieving an efficient transformation [9], [10].

The promoters are cis-acting regulatory regions that direct the transcription of a gene. Functionally, a promoter is a DNA sequence located upstream (towards the 5' end of the coding region of a gene) that includes the binding regions for transcription factors [11]. In microalgae, some heterologous promoters, including the cauliflower mosaic virus (CaMV35S), ubiquitin promoter, and NOS, have been used for the expression of reporter genes [12]. Nevertheless, due to the unique nuclear characteristics of the microalgae, the gene expression under heterologous promoter control has been inefficient, exhibiting relatively low and fluctuating levels [13].

In contrast, the most effective promoters have derived from highly expressed microalgae genes; for instance, in the transformation of *Chlamydomonas reinhardtii*, the non-coding 5' region of the small RuBisCO (RBCS2) subunit gene and the heat shock protein 70A (HSP70A) have been widely used [8], [14]. While the use of endogenous promoters is almost optimized in model algal strains, only heterologous promoters from plant systems have been used in industrial microalgae strains like *Chlorella sp.* [2].

For species of the *Chlorella* genus, which represent a specialized group of green microalgae that can produce high protein levels, genetic transformation development has been slow and research on promoters derived from *Chlorella* is still in its early stage [15]. Therefore, the identification and isolation of new and effective endogenous promoters is highly required to achieve an efficient expression of foreign genes in *Chlorella sp.* [16]. In this study, we predicted an endogenous *Chlorella* promoter sequence in the 5' upstream region of the alpha-tubulin gene from *Chlorella vulgaris*. The function of this promoter was confirmed through the expression of an antibiotic resistant gene in *Chlorella sorokiniana*.

Materials and methods

Chlorella strain and culture conditions

Chlorella sorokiniana used in this study came from the microalgae culture collection of the Costa Rican Institute of Technology Biotechnology Research Center. Cells were routinely grown and maintained at 25°C in BG-11 medium [17] under 12/12 h light and dark cycle and 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ light intensity.

Antibiotic sensitivity test

The tolerance of *C. sorokiniana* to streptomycin and spectinomycin antibiotics was evaluated through a sensitivity assay, streaking the plate with 50 μL of the microalgae culture (10^6 cells mL^{-1}) in BG-11 agar supplemented with different concentrations of streptomycin and spectinomycin (0, 25, 50, 75, 100, 125, and 150 mg L^{-1}). The plates were incubated inverted in darkness for two days, at room temperature, before being exposed to light conditions ($200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), and the microalgae growth was determined 8 days later.

Vector design and codon optimization

The alpha-tubulin gene (*tua1*) of *Chlorella vulgaris* microalgae (GenBank accession: D16504.1) was identified through a BLAST search [18]. Using the information provided in the 5' non-coding region, exons, and introns of the DNA sequence [19], a minimal promoter region (proximal promoter) was identified; this sequence was named " α -1 tubulin promoter". The location and distribution of putative cis-acting elements in α -1 tubulin promoter was analyzed using PlantCARE [20].

The α -1 tubulin promoter was used to drive the expression of the *aadA* gene, which codifies the streptomycin-3'-adenylyltransferase enzyme and provides resistance to the streptomycin antibiotic. The nucleotide sequence of the *aadA* gene was obtained from the pAPR52 plastid transformation vector (GenBank accession: EU497669.1). To achieve an efficient translation of the enzyme, an optimization in the use of the codons was performed, in order to adapt the sequence of the *aadA* gene to the *C. sorokiniana* genome following the codon table for *C. sorokiniana* microalgae, obtained from *Kazuza* database [21].

Afterwards, the sequence optimization was performed using *Optimizer* [22]. The promoter sequence and the streptomycin resistance gene were synthesized along with the *rep* (pMB) and *ntpII* (Kn^{R}) gene sequences (resistance to the kanamycin antibiotic) of the pUC57-Kan vector for their replication in *E. coli*, through General Biosystems Inc.. The new vector was identified as *pChlorella_1*.

Electrotransformation

C. sorokiniana was transformed with *pChlorella_1* vector through electroporation. Briefly, 30 mL of the *C. sorokiniana* culture ($\text{OD}_{750} = 0,3-0,5$) were centrifuged at 4000 rpm for 15 min and the supernatant was discarded. Then, the pellet was resuspended in 5 mL of *GeneArt*[®] *MAX Efficiency Transformation Reagent* (Thermo Fisher Scientific Inc., USA), and after its incubation for 30 min at room temperature, it was centrifuged once again and the supernatant discarded.

The cells were resuspended in 1250 μL of the same reagent, and 4 μg of previously *XbaI* linearized *pChlorella_1* plasmid were added and incubated at 4°C for 5 min. A volume of 250 μL of the cell-DNA mix was transferred to a cold electroporation bucket (in an ice bath) and the electroporation was performed using an Eppendorf Eporator[®] (Eppendorf AG, Germany), with 1 pulse at 1000 V (~ 30 ms).

After the electroporation process, the cells were transferred to a well plate with 5 mL of BG-11 medium with 40 mM sucrose and they were incubated for 2 days at 120 rpm and light conditions ($200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). After the incubation period, the cells were harvested through a centrifugation at 2500 rpm for 5 min, resuspended in 100 μL of BG-11 medium and streaked in Petri dishes with BG-11-agar supplemented with 125 mg L^{-1} of streptomycin (selective medium). The Petri dishes were incubated for 2 days at room temperature in the dark, and then they were exposed to continuous light conditions.

PCR analysis of transformants

To confirm that *C. sorokiniana* was transformed, a “colony-PCR” of resistant colonies was performed, using specific primers for the streptomycin resistance gene: *pchlorella_1_Forward* 5'-TGTCTCTGGTTTGGTGGTCA-3' and *pchlorella_1_Reverse* 5'-CAGCAGGTCGTTGATCAGG-3'. The amplified product was expected to be of 385 pb. The PCR reaction was carried in a total volume of 25 µL, containing 2,5 µL of Dream Taq 10X Buffer, 1 µL dNTPs (2 mM), 1 µL of each primer (10 µM), 0,25 µL of DreamTaq DNA Polymerase (5U mL⁻¹), 14,25 µL of nuclease-free water and 5 µL of colony lysate.

A thermal cycler (Applied Biosystems Veriti®) was used for all reactions and the following thermal profile was applied: 30 cycles of denaturation at 94 °C for 30 sec, alignment at 55 °C for 30 sec, and extension at 72 °C for 1 min, with a final extension for 10 min at 72 °C. The PCR products were analyzed through a 1,5% agarose gel electrophoresis.

Results and discussion

Antibiotic sensitivity test

The growth of *C. sorokiniana* was complete inhibited at a 125 mg L⁻¹ streptomycin concentration, while the minimum spectinomycin concentration that allowed the complete inhibition of the microalgae growth was 150 mg L⁻¹ (table 1). Therefore, 125 mg L⁻¹ of streptomycin was the concentration chosen for the posterior selection of the transformed colonies. It is known that streptomycin affects the growth and the photosynthetic activity of *C. vulgaris* through the inhibition of the synthesis of chloroplast proteins [23] and that a 40 mg L⁻¹ concentration is enough to completely inhibit its growth [24]. However, *C. sorokiniana* presents a certain level of tolerance to aminoglycoside antibiotics [25], which relates to the high antibiotic concentration that was required to suppress the algae culture, when compared to reports from other species.

Table 1. Sensitivity of *C. sorokiniana* to different concentrations of streptomycin and spectinomycin

mg/L	Streptomycin	Spectinomycin
0	-	-
25	-	-
50	-	-
75	-	-
100	++	-
125	+++	+
150	+++	+++

No inhibition (“-”), Inhibition (“+”), Strong inhibition (“++”), Complete inhibition (“+++”)

Vector design and codon optimization

The identified proximal promoter sequence corresponded to 281 nucleotides upstream of the ATG start codon (figure 1). *In silico* analyses revealed the presence of 9 potential cis-acting elements including 1 TATA- and 2 CAAT-boxes (table 2). The eukaryotic consensus TATA-box is considered an essential element in determining the transcription start site (TSS) and also serves as binding site for the components of the basal transcription machinery; it is typically located at the -30 or -31 position, relative to the TSS in metazoans [26]. However, the identified TATA-box was located at -82 nucleotides upstream of the ATG start codon; this kind of motif localization is common in yeasts, where the TATA-box is usually located at the -200 to -50 relative to ATG [26].

1 TGATGCAAA CAATTCTATTGATCATGCTGCATACTT CAATGCCTTGATGC 50

51 ACAAGGTCTCACAACAAGCATGTCCTCCCGCATGCACATCGTTTCCCCCT 101

102 CACAAAATCTGTCTCTGGTTTGGTGGTCAGCTGGCGTGTTTTGCGGGCGT 152

153 TCCCTCTTTCAGACACCACACCAGAGCGTCGCGCGCAAAACT TACAAAA 203

204 TGGAAGACGCGTCCTCGTTCGCCGTCTGCTCCTCTTTCTTAAAGCCTCCA 254

255 AGCCACCAGCTTCTTTCTAAATCTGCAACC ATG 284

 CAAT-box  TATA-box  Box S  Start codon (ATG)

Figure 1. Nucleotide sequence of the *Chlorella vulgaris* α -1 tubulin promoter and its more relevant predicted motifs.

The TATA-box sequence found in *Chlorella vulgaris* α -1 tubulin promoter (TACAAAA) has minor deviations in relation to the consensus TATA box DNA sequence. This type of variation, called weak TATA box, has been reported in different eukaryotic cells and also facilitates the interaction with the TATA-binding protein [27], [28]. The CAAT box, also found in the promoter, is known for its capability to regulate the transcription frequency [29].

Other studies reference the use of tubulin promoters for microalgae transformation; for instance, Davies *et al.* [30] fused the promoter region of the β 2-tubulin gene to the coding region of a genomic clone of arylsulfatase (ars), to form a chimeric tubB2/ars sequence, leading to an efficient microalgae transformation. Also, Hallmann and Sumper [31] achieved the functional expression of the *Chlorella sp.* HUP1 gene in *Volvox carteri* under the control of the constitutive promoter *Volvox* β -tubulin. Considering these previous examples, α -1 tubulin promoter from *Chlorella vulgaris* is proposed as an effective promoter for the transformation of *Chlorella sorokiniana*.

Table 2. List of putative cis-acting elements in the α -1 tubulin promoter in *Chlorella vulgaris*

Name	Sequence	Function
AAGAA-motif	GAAAGAA	Related with the stability of poly(A) sites
ARE	AAACCA	Cis-acting regulatory element essential for the anaerobic induction
CAAT-box	CAAT, CCAAT	Common cis-acting element in promoter and enhancer regions
STRE	AGGGG	Stress-responsive element
TATA-box	TACAAAA	Core promoter element around -30 of transcription start
Box S	AGCCACC	Pathogen-induced element
RAV1A	CAACA	RAV1 recognition element
ARFAT	TGTCTC	Auxin-responsive element
SORLIP1	GCCAC	Light-responsive element

The *aadA* codon optimized sequence obtained a 69,8 % GC content (compared with a 53 % content of the original gene), which increases its likelihood to *Chlorella sp.*'s genome (67,2%) [32] and its possibility to be translated efficiently. The designed vector (including the promoter and the *aadA* sequences) consisted of 3797 bp and included the sequences necessary for its replication in *E. coli* (figure 2).

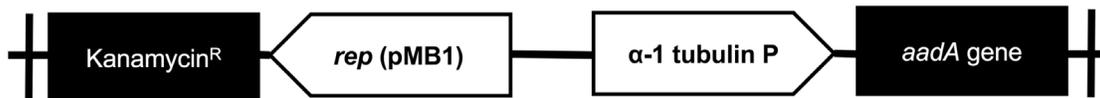
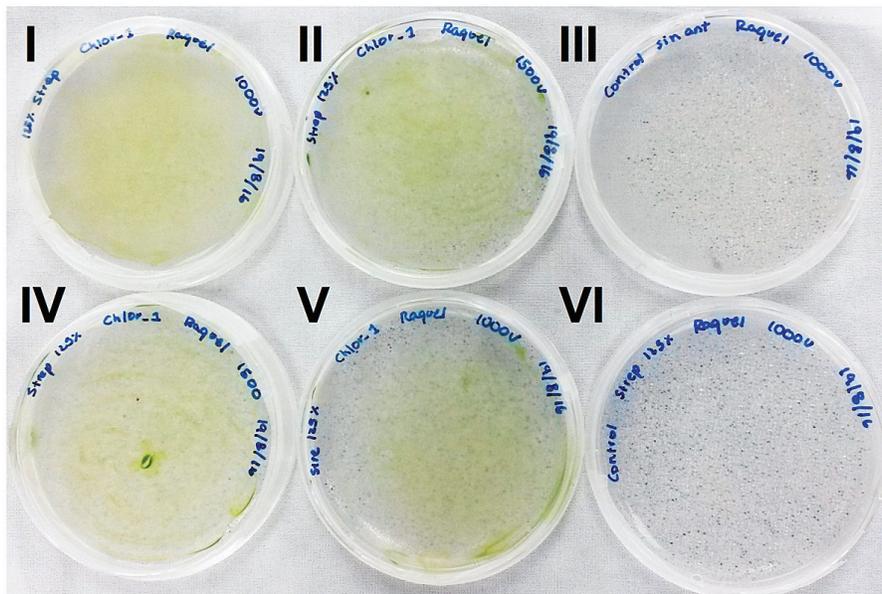


Figure 2. Map of the designed *pChlorella_1* vector. α -1 tubulin P: strong promoter, native from *Chlorella vulgaris*, which drives the expression of the *aadA*; *aadA* gene: gene that codes for streptomycin-3 “-adenyltransferase and confers resistance to streptomycin; *rep* (pMB1): allows a high copy number replication and growth in *E. coli*; Kn^R : kanamycin resistance gene, it allows the selection of the plasmid in *E. coli*.

Electrotransformation and PCR analysis

The transformation of *C. sorokiniana* with *pChlorella_1* plasmid was induced through electroporation. For a higher transformation efficiency, the plasmid was linearized using *Xba*I restriction enzyme [33]. The *GeneArt*® MAX Efficiency Transformation Reagent was used, which is a commercial reagent for the transformation of *Chlamydomonas reinhardtii* that increases the permeability of the membrane. However, other authors have treated *Chlorella sp.* through osmosis with sorbitol, mannitol, KCl, $CaCl_2$ and HEPES, obtaining a similar effect [34]. After the electroporation process, microalgae growth was observed in the streptomycin selective medium, evidencing the positive result of the transformation. The negative control (electropored microalgae without the plasmid) was not able to survive in the medium with antibiotic (figure 3-a). The transformed microalgae were subjected to a direct PCR of random colonies to identify the *aadA* gene present in *pChlorella_1*. The PCR products showed positive results, achieving the expected size of approximately 400 pb. Therefore, it was possible to confirm the integration of the promoter sequence and the resistance gene in the nuclear DNA of the microalgae (figure 3-b). The results demonstrated that the modified permeabilization membrane protocol, as well as the voltage used are adequate for the transformation of *C. sorokiniana*.

a.



b.

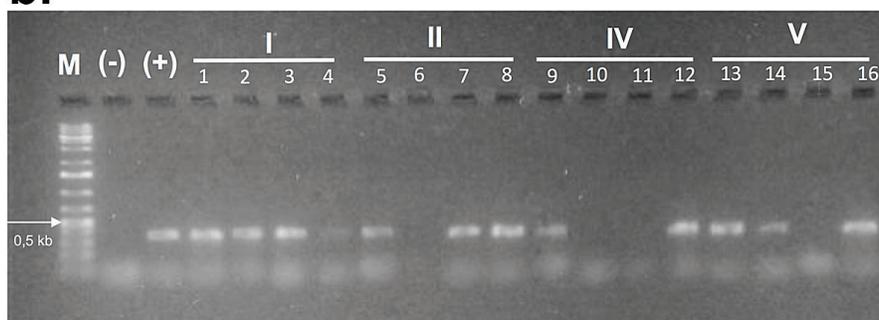


Figure 3. Transformation of *C. sorokiniana* with *pChlorella_1* vector. a. Growth, in a selective medium, of *C. sorokiniana* transformed with *pChlorella_1* (III and VI negative controls). b. Proof of the presence of the *aadA* gene in *C. sorokiniana* by colony polymerase chain reaction. The *aadA* gene was confirmed in all selected colonies except 6, 10, 11 and 15. M, 1-kb DNA ladder; (+) positive control, *pChlorella_1* plasmid; (-) negative control; lanes 1-16, randomly selected colonies.

Conclusion

In this research, it was possible to achieve an efficient transformation through the electroporation of *Chlorella sorokiniana* with the *pChlorella_1* vector. Our results proved the capacity of the *Chlorella*- α -tubulin promoter to express a foreign antibiotic-resistance gene in *C. sorokiniana* cells. Further research is required to determine the stability and strength of this new promoter, as well as the addition of new genetic elements, including the multiple cloning site, intron, UTR. The stable transformation of the microalgae has been a slow process due to the reduced heterologous gene expression; hence, research of endogenous promoter sequences is essential in order to accomplish an efficient heterologous gene expression, especially in microalgae used for industrial production like those from *Chlorella* genus.

Acknowledgments

This study was financed by Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica. The authors thank Maria Valerio for the final English language revision service.

References

- [1] L. Barsanti and P. Gualtieri, "Is exploitation of microalgae economically and energetically sustainable?," *Algal Res.*, vol. 31, pp. 107–115, 2018.
- [2] J. Kim, L. Liu, Z. Hu, and E. Jin, "Identification and functional analysis of the *psaD* promoter of *Chlorella vulgaris* using heterologous model strains," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 19, pp. 1–14, 2018.
- [3] B. A. Rasala, S. S. Chao, M. Pier, D. J. Barrera, and S. P. Mayfield, "Enhanced genetic tools for engineering multigene traits into green algae," *PLoS One*, vol. 9, no. 4, 2014.
- [4] S. Lee *et al.*, "Development of an alcohol-inducible gene expression system for recombinant protein expression in *Chlamydomonas reinhardtii*," *J. Appl. Phycol.*, vol. 30, pp. 2297–2304, 2018.
- [5] T. Thanh, V. T. Q. Chi, H. Omar, M. P. Abdullah, and S. Napis, "Sequence analysis and potentials of the native RbcS promoter in the development of an alternative eukaryotic expression system, using green microalga *Ankistrodesmus convolutus*," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 13, no. 3, pp. 2676–2691, 2012.
- [6] S. Jagadevan *et al.*, "Recent developments in synthetic biology and metabolic engineering in microalgae towards biofuel production," *Biotechnol. Biofuels*, vol. 11, no. 1, pp. 1–22, 2018.
- [7] P. Úbeda-Mínguez, T. Chileh, Y. Dautor, F. García-Maroto, and D. L. Alonso, "Tools for microalgal biotechnology: Development of an optimized transformation method for an industrially promising microalga—*Tetraselmis chuii*," *J. Appl. Phycol.*, vol. 27, no. 1, pp. 223–232, Feb. 2015.
- [8] Y. F. Niu *et al.*, "A new inducible expression system in a transformed green alga, *Chlorella vulgaris*," *Res. Genet. Mol. Res.*, vol. 10, no. 104, pp. 3427–3434, 2011.
- [9] M. Vila, E. Díaz-Santos, M. De La Vega, H. Rodríguez, Á. Vargas, and R. León, "Promoter trapping in microalgae using the antibiotic paromomycin as selective agent," *Mar. Drugs*, vol. 10, no. 12, pp. 2749–2765, 2012.
- [10] N. Yan, C. Fan, Y. Chen, and Z. Hu, "The potential for microalgae as bioreactors to produce pharmaceuticals," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 17, no. 6, pp. 1–24, 2016.
- [11] Z. M. De Guglielmo y R. Fernandez, "Principales promotores utilizados en la transformación genética de plantas," *Rev. Colomb. Biotecnol.*, vol. 18, no. 2, p. 119, 2016.
- [12] L. Doron, N. Segal, and M. Shapira, "Transgene expression in microalgae: From tools to applications," *Front. Plant Sci.*, vol. 7, p. 505, 2016.
- [13] B. Wang, J. Wang, and D. R. Meldrum, "Application of synthetic biology in cyanobacteria and algae," *Front. Microbiol.*, vol. 3, p. 344, 2012.
- [14] A. Kumar, V. R. Falcao, and R. T. Sayre, "Evaluating nuclear transgene expression systems in *Chlamydomonas reinhardtii*," *Algal Res.*, vol. 2, no. 4, pp. 321–332, 2013.
- [15] B. Yang, J. Liu, Y. Jiang, and F. Chen, "*Chlorella* species as hosts for genetic engineering and expression of heterologous proteins: Progress, challenge and perspective," *Biotechnol. J.*, vol. 11, no. 10, pp. 1244–1261, 2016.
- [16] Y.-F. Niu, T. Huang, W.-D. Yang, J.-S. Liu, and H.-Y. Li, "Genetic engineering of microalgae," in *Recent advances in microalgal biotechnology*, H. Gerken, Z. Sun, and J. Liu, Eds. Heathrow, UK: OMICS International, p. 232., 2016.
- [17] M. M. Allen and R. Y. Stanier, "Growth and division of some unicellular blue-green Algae," *J. Gen. Microbiol.*, vol. 51, no. 2, pp. 199–202, 1968.
- [18] S. F. Altschul, W. Gish, W. Miller, E. W. Myers, and D. J. Lipman, "Basic local alignment search tool," *J. Mol. Biol.*, vol. 215, no. 3, pp. 403–410, 1990.
- [19] T. Yamada, S. Maki, and T. Higashiyama, "Nucleotide sequence of a *Chlorella vulgaris* alpha-tubulin gene," *Plant Physiol.*, vol. 11, no. 10, p. 1467, 1993.
- [20] M. Lescot, "PlantCARE, a database of plant cis-acting regulatory elements and a portal to tools for in silico analysis of promoter sequences," *Nucleic Acids Res.*, vol. 30, no. 1, pp. 325–327, 2002.
- [21] Y. Nakamura, T. Gojobori, and T. Ikemura, "Codon usage tabulated from the international DNA sequence databases; its status 1999," *Nucleic Acids Res.*, vol. 27, no. 1, p. 292, 1999.

- [22] P. Puigbò, E. Guzmán, A. Romeu, and S. Garcia-Vallvé, "OPTIMIZER: A web server for optimizing the codon usage of DNA sequences," *Nucleic Acids Res.*, vol. 35, no. Suppl. 2, 2007.
- [23] H. V. Perales-Vela, R. V. García, E. A. Gómez- Juárez, M. O. Salcedo-Álvarez, and R. O. Cañizares-Villanueva, "Streptomycin affects the growth and photochemical activity of the alga *Chlorella vulgaris*," *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 132, pp. 311–317, 2016.
- [24] H. Qian *et al.*, "Effects of streptomycin on growth of algae *Chlorella vulgaris* and *Microcystis aeruginosa*," *Environ. Toxicol.*, vol. 27, no. 4, pp. 229–237, 2012.
- [25] M. Sanitha, S. Radha, A. A. Fatima, S. G. Devi, and M. Ramya, "Agrobacterium-mediated transformation of three freshwater microalgal strains," *Pol. J. Microbiol.*, vol. 63, no. 4, pp. 387–392, 2014.
- [26] V. R. Yella and M. Bansal, "DNA structural features of eukaryotic TATA-containing and TATA-less promoters," *FEBS Open Bio.*, vol. 7, no. 3, pp. 324–334, 2017.
- [27] T. Meyer, J. Carlstedt-Duke, and D. B. Starr, "A weak TATA box is a prerequisite for glucocorticoid-dependent repression of the osteocalcin gene," *J. Biol. Chem.*, vol. 272, no. 49, pp. 30709–30714, 1997.
- [28] D. Choubey and R. Panchanathan, "Interferon-inducible Irf200-family genes in systemic *lupus erythematosus*," *Immunol. Lett.*, vol. 119, no. 1–2, pp. 32–41, 2008.
- [29] L. G. Zou *et al.*, "High-efficiency promoter-driven coordinated regulation of multiple metabolic nodes elevates lipid accumulation in the model microalga *Phaeodactylum tricornutum*," *Microb. Cell Fact.*, vol. 17, no. 1, 2018.
- [30] J. P. Davies, D. P. Weeks, and A. R. Grossman, "Expression of the arylsulfatase gene from the β 2-tubulin promoter in *Chlamydomonas reinhardtii*," *Nucleic Acids Res.*, vol. 20, no. 12, pp. 2959–2965, 1992.
- [31] A. Hallmann and M. Sumper, "The chlorella hexose/H⁺ symporter is a useful selectable marker and biochemical reagent when expressed in volvox," *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, vol. 93, no. 2, pp. 669–673, 1996.
- [32] G. Blanc *et al.*, "The *Chlorella variabilis* NC64A Genome Reveals Adaptation to Photosymbiosis, Coevolution with Viruses, and Cryptic Sex," *Plant Cell*, vol. 22, no. 9, pp. 2943–2955, 2010.
- [33] C. Wang, Y. Wang, Q. Su, and X. Gao, "Transient expression of the GUS gene in a unicellular marine green alga, *Chlorella sp.* MACC/C95, via electroporation," *Biotechnol. Bioprocess Eng*, vol. 12, no. 2, pp. 180–183, 2007.
- [34] L. L. Bai *et al.*, "A new strategy to produce a defensin: stable production of mutated NP-1 in nitrate reductase-deficient *Chlorella ellipsoidea*," *PLoS One*, vol. 8, no. 1, 2013.

Evaluación de sistemas térmicos y fotovoltaicos solares en tres plantas procesadoras de leche de la región Huetar Norte, Costa Rica

Evaluation of solar thermal and photovoltaic systems in three milk processing plants in the Northern Huetar Region, Costa Rica

Tomás J. Guzmán-Hernández¹, Javier M. Obando-Ulloa²,
Xabier Álvarez de Eulate³, Raúl Ilundain-López⁴,
Paola Juan-Pérez⁵, Guillermo Castro-Badilla⁶

Guzmán-Hernández, T; Obando-Ulloa, J; Álvarez de Eulate, X; Ilundain-López, R; Juan-Pérez, P; Castro-Badilla, G. Evaluación de sistemas térmicos y fotovoltaicos solares en tres plantas procesadoras de leche de la región Huetar Norte, Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 33-2. Abril-Junio 2020. Pág 37-46.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v33i2.4191>

Fecha de recepción: 21 de mayo de 2019
Fecha de aprobación: 29 de agosto de 2019

1 Doctor en Ciencias Agronómicas; coordinador del programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE), Campus Tecnológico Local San Carlos, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: tjguzman@tec.ac.cr.

 <https://orcid.org/0000-0002-2719-8550>

2 Doctor en Tecnología Agraria y Alimentaria; docente e investigador del programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE), Campus Tecnológico Local San Carlos, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: jaobando@tec.ac.cr.

 <https://orcid.org/0000-0002-8857-904X>

3 Master en Biología y Conservación de la Biodiversidad; pasante del programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE), Campus Tecnológico Local San Carlos, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: xalvarezeulate@gmail.com.

4 Máster en Profesorado de Educación Secundaria, pasante del programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE), Campus Tecnológico Local San Carlos, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: rilundain22@gmail.com.

5 Máster en Biodiversidad, Paisajes y Gestión Sostenible; pasante del programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE), Campus Tecnológico Local San Carlos, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: paolix1291@gmail.com

6 Ingeniero en Electrónica; docente e investigador de la Escuela de Ingeniería Electrónica, Campus Tecnológico Local San Carlos, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: gucastro@tec.ac.cr.

 <https://orcid.org/0000-0002-7159-9845>



Palabras clave

Costa Rica; energía solar; ganadería; gases de efecto invernadero; tecnología térmica solar.

Resumen

Los combustibles fósiles, que actualmente aportan cerca del 85% de la energía primaria consumida, seguirán siendo la principal fuente para cubrir la demanda energética de los próximos años. Ante esta perspectiva, y dentro de un marco de cambio climático global, las energías renovables deben tomar un mayor protagonismo como fuentes de energía limpia. Costa Rica, como la mayoría de los países desarrollados, presenta una alta dependencia de los combustibles fósiles, principalmente del petróleo. Sin embargo, a diferencia de otras zonas del planeta, la energía solar potencial en este país está cuantificada en 10 000 MW, aunque su uso es mínimo.

Dado que el sector agroindustrial produce una alta emisión de gases de efecto invernadero, responsables de la problemática del cambio climático, se decidió realizar una investigación con el objetivo de evaluar la aplicación de la tecnología térmica solar y fotovoltaica en este sector.

La tecnología térmica solar y fotovoltaica se instaló en tres plantas procesadoras de leche de la región Huetar Norte de Costa Rica. El análisis de los resultados obtenidos permitió observar la reducción del consumo de energía y, de una forma muy notable, de las emisiones de gases de efecto invernadero, gracias al aprovechamiento de una fuente totalmente limpia y renovable como la energía solar. Además, se ha generado una mayor independencia en las empresas en el nivel energético y sus productos podrían adquirir la categoría de ecológicos, lo que representaría una ventaja competitiva en el mercado regional, nacional e internacional.

Keywords

Costa Rica; solar energy; cattle; green house gases; thermal solar technology.

Abstract

Fossil fuels, which currently contribute close to 85% of the primary energy consumed, will continue to be the main source to cover the energy demand of the coming years. Given this perspective, and within a framework of global climate change, renewable energy should take a greater role as sources of clean energy. Costa Rica, like most developed countries, is highly dependent on fossil fuels, mainly oil. However, unlike other areas of the planet, the potential solar energy in this country is quantified as 10 000 MW, enough energy for use in different production systems. Therefore, this work has evaluated a new application of solar thermal collector technologies and photovoltaic panels in the agricultural sector, as it is one of the most important sectors in terms of emission of greenhouse gases, which aggravates the problem of climate change.

Five solar thermal and photovoltaic systems (hybrid thermosiphons, hybrid forced and PV) were designed and built in two dairies and two milk-processing plants in the Huetar Norte region of Costa Rica in 2015. In all of them, computerized data logging systems were located and variables were measured; measurements of three years were evaluated, namely: time in hours, days, months; inlet and outlet temperatures; kWh; carbon equivalence, and economic savings. The results showed that energy consumption was reduced and, notably, greenhouse gas and carbon equivalent emissions, thanks to the use of solar energy. In addition, environmental pollution was lessened by the reduction of smoke due to the burning of firewood; greater independence was generated at the energetic level in associations and companies, and their products could eventually be certified as organic products.

Introducción

En la actualidad, el consumo de energía en el globo está en aumento y se proyecta que esta tendencia continúe en los próximos años. Dentro de la demanda global de energía actual, los combustibles fósiles aportan cerca del 85% de la energía primaria consumida [6] y seguirán siendo la principal fuente de energía [13]. Ante esta perspectiva, y dentro de un marco de cambio climático mundial, las energías renovables deben tomar un mayor peso como energía limpia, con bajos o incluso nulos niveles de emisiones y con la característica de la sostenibilidad en el tiempo.

Aunque desde el siglo XVIII, el desarrollo tecnológico apuntaba a la utilización del sol para fines productivos, fue hasta en el siglo XX que se desarrollaron las tecnologías de uso de la energía del sol para varios fines, entre los que destacan el calentamiento de fluidos, la producción de vapor y la generación de corriente eléctrica [5].

En el caso de Costa Rica, la producción energética está centrada fundamentalmente en tres fuentes renovables: hidroeléctrica (76%), eólica (4%) y geotérmica (12%) [9]. Sin embargo, Costa Rica depende altamente de los combustibles fósiles, principalmente el petróleo, puesto que suponen un 52% de la energía consumida en el país, principalmente dentro del sector transporte [9]. En cuanto a la energía solar, Costa Rica presenta un potencial cuantificado en aproximadamente 10 000 MW, pero su grado de desarrollo es muy bajo.

En Costa Rica, como en el resto del mundo, los sectores agrícola y agroindustrial son responsables de alrededor del 12% de las emisiones de gases de efecto invernadero, relacionadas principalmente con las fermentaciones entéricas, generadoras de metano, y la producción de estiércol [8]. En el caso de Costa Rica, el sector agropecuario es de gran importancia económica, especialmente en el cantón de San Carlos, donde se encuentran el 55% de los asociados de la Cooperativa de Productores de Leche Dos Pinos R.L., quienes producen más del 50% del volumen nacional. Es primordial lograr una mejora en el uso de la energía tanto en el sector agropecuario como en el agroindustrial para reducir los niveles de emisión de gases de efecto invernadero y el impacto ambiental de las actividades de estos dos sectores.

La radiación solar que se recibe en la superficie terrestre puede ser captada y aprovechada mediante diferentes sistemas: captadores solares térmicos o módulos fotovoltaicos, principalmente, aunque hay otros sistemas como secadores solares pasivos, cuya utilización no se ha evaluado en este trabajo, pero que ha sido implementada y evaluada por el grupo de investigación del programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE) [5].

Los módulos fotovoltaicos están formados por celdas organizadas en paneles en las que se genera electricidad a partir de la radiación solar. Para ello, se deben mantener unas condiciones estandarizadas de radiación (1000 W/m^2) y de temperatura (25° C). Los paneles fotovoltaicos pueden ser monocristalinos (con secciones de un único cristal de silicio), policristalinos (formados por pequeñas partículas cristalizadas) o amorfos (con el silicio no cristalizado). Su eficiencia es mayor cuanto mayores son los cristales, aunque también aumenta su peso, grosor y costo. El rendimiento de los paneles monocristalinos puede alcanzar el 20%, mientras que en los paneles amorfos no llega al 10%, aunque su costo es mucho menor [5] y [2].

Por su parte, los colectores solares térmicos normalmente se emplean para uso doméstico y pueden ser de circuito abierto o cerrado. En los sistemas de circuito abierto, el agua circula a través de los propios colectores solares, mientras que en los sistemas cerrados, el agua se almacena en un depósito para su posterior uso, después de pasar por los colectores. El sistema cerrado tiene mayor eficiencia y supone un mayor ahorro energético, pero presenta problemas en zonas con bajas temperaturas. En los equipos de circuito cerrado se distinguen dos tipos

de flujo: termosifónico, en el que el agua circula únicamente por diferencias de densidad, y forzado, en el que se emplean bombas para la circulación del agua [7], [12] y [5]. En los sistemas solares térmicos se recomienda incorporar un sistema auxiliar de calentamiento (gas o resistencias eléctricas, por ejemplo) para evitar problemas de abastecimiento de agua caliente debido a la variación de la radiación solar [11] y [5].

Tomando en cuenta las posibilidades anteriormente mencionadas, con las que cuenta el sector de la energía solar y su bajo grado de desarrollo, se plantea la alternativa de emplear esa fuente de energía en diferentes procesos productivos del sector agropecuario, considerando el potencial que presenta la región Huetar Norte de Costa Rica para ello. De esta forma, se abriría un camino que pueda favorecer la producción limpia, reducir los niveles de emisiones y mejorar las condiciones de trabajo de los pequeños productores agropecuarios.

Objetivo general

El objetivo general de este trabajo fue evaluar la eficiencia de los sistemas solares térmicos o fotovoltaicos instalados en la región Huetar Norte por medio del análisis de la generación de energía, así como del ahorro energético, el económico y el impacto ambiental (descenso en las emisiones de dióxido de carbono) relacionados con el uso de estos equipos.

Metodología

La ubicación del proyecto respondió a la necesidad del uso de los sistemas solares en la región Huetar Norte de Costa Rica, dado el consumo de agua caliente (160 y 215 L/día) para las operaciones de esterilización y pasteurización a 70 °C, en las plantas procesadoras de leche. Durante el tiempo de ejecución de este trabajo se evaluó:

- La eficiencia de producción eléctrica de un sistema fotovoltaico compuesto por ocho paneles de 2 kW de potencia con 8 convertidores, el cual se instaló en la lechería del Campus Tecnológico Local San Carlos, del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR-SSC).
- La eficiencia de calentamiento de agua de un sistema solar termosifónico híbrido de ocho colectores, con sistema auxiliar eléctrico también instalado en la lechería del ITCR-SSC.
- La eficiencia de calentamiento de agua de dos sistemas térmicos forzados híbridos, con sistema auxiliar de gas LP compuesto por colectores solares planos de calentamiento de agua y un tanque acumulador de agua con capacidad para 302,4 L. Este tanque cuenta con termopares conectados a un sistema informático para registrar los datos de captación de energía y el uso del agua caliente. Estos sistemas se instalaron en las plantas de procesamiento de los productores de lácteos LLAFFRAK y “San Bosco” respectivamente, ambos en Santa Rosa de Pocosol, San Carlos. Estas dos plantas procesadoras de leche se seleccionaron por ser una zona dedicada a la agricultura y la ganadería, con un índice de Desarrollo Social Distrital bajo [10].

Resultados y Discusión

Sistema fotovoltaico instalado en la lechería del Campus Tecnológico Local San Carlos del Instituto Tecnológico de Costa Rica

Desde la instalación del sistema solar fotovoltaico en la lechería del Campus Tecnológico Local San Carlos, del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR-SSC) en mayo de 2015 y hasta

octubre de 2018, se ha generado un total de 8296,86 kWh, con una media anual de 2428,35 kWh. Esta producción eléctrica ha supuesto un ahorro económico de $\text{¢}1\,717\,442$ desde mayo de 2015 (aprox. $\text{¢}500\,000$ anuales), junto con un ahorro en la factura eléctrica inicial de un 28% (figura 1). Con este ahorro anual, la recuperación de la inversión inicial ($\text{¢}3\,630\,000$) se establecería en 7,2 años, lo cual es un tiempo de recuperación corto para una instalación de estas características [4] y [5].

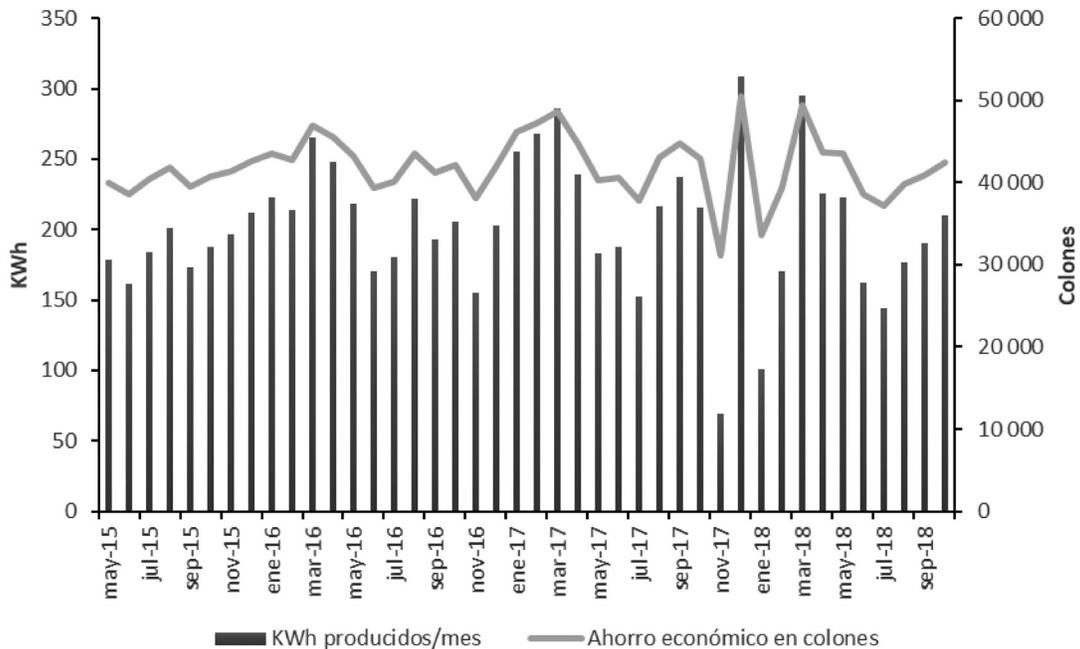


Figura 1. Producción eléctrica mensual y ahorro económico mensual en la factura eléctrica debido a la instalación del sistema fotovoltaico en la lechería del ITCR-SSC

Por otro lado, la instalación de este sistema ha supuesto una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero de 1642,86 kg de CO_2 anuales, de acuerdo con los datos registrados en el sistema Enlighten [5].

Sistema termosifónico híbrido instalado en la lechería del Campus Tecnológico Local San Carlos, del Instituto Tecnológico de Costa Rica

El sistema termosifónico híbrido instalado en la lechería del ITCR-SSC permite el empleo de la energía solar para el calentamiento de agua destinada a la esterilización de los equipos de ordeño. Desde su instalación en mayo de 2015 hasta mayo de 2018, este equipo ha generado una media anual de 1603,16 kWh de energía equivalente. Esta producción energética ha supuesto un ahorro económico de $\text{¢}436\,000$ anuales, y ha evitado la emisión de 1106 kg de CO_2 anuales (figura 2).

En este caso, la recuperación de la inversión inicial ($\text{¢}5\,000\,000$) se lograría en 11,5 años, lo cual supone un ahorro económico importante, aunque la inversión inicial es más cuantiosa [5]. En los meses más soleados del año, principalmente entre enero y marzo, el ahorro económico puede alcanzar cotas cercanas al 80%, superando ampliamente la barrera del 50% de ahorro; durante el resto del año se mantiene cercano al 40% (figura 3).

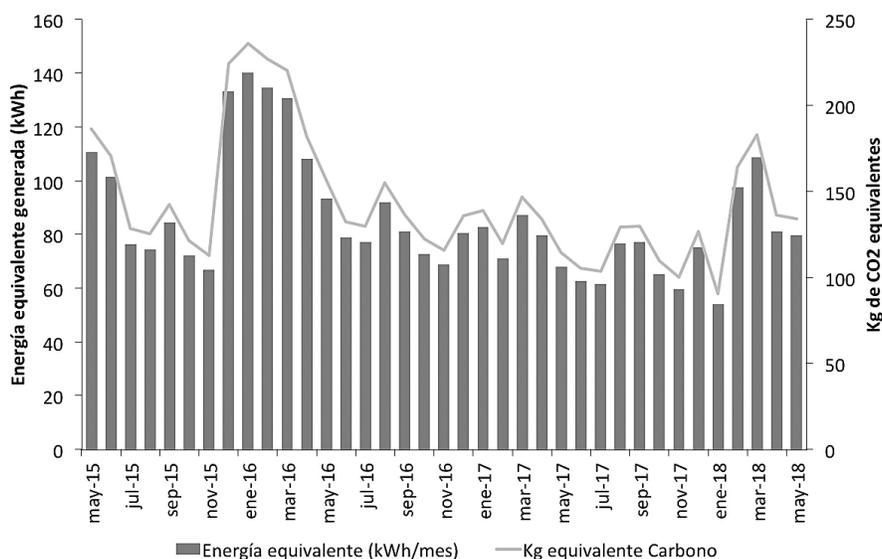


Figura 2. Producción eléctrica equivalente y emisiones de CO₂ evitadas por el sistema termosifónico instalado en el ITCR-SSC

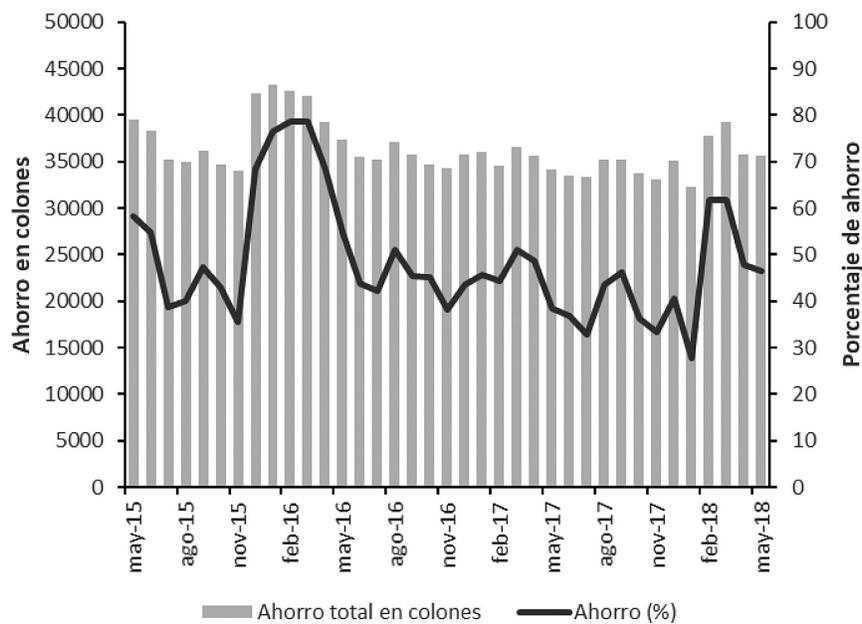


Figura 3. Ahorro económico mensual y porcentaje de ahorro sobre la factura eléctrica previa debidos al sistema solar térmico en la lechería del ITCR-SSC

Sistema termosifónico híbrido forzado instalado en la planta procesadora de lácteos LLAFRAK

Antes de la instalación de este sistema, la lechería se valía de una caldera de leña de fabricación casera para calentar el agua hasta la temperatura necesaria para el proceso de pasteurización, la cual consumía aprox. 2,5 toneladas de leña al mes [4]. El costo de la leña y la mano de obra necesaria para su manejo era de ¢202 250 mensuales. Actualmente, el consumo de gas LP implica un gasto mensual de ¢36 000 menos. Esto se traduce en un ahorro total de ¢166 250 al mes [4].

Los datos recogidos entre marzo de 2017 y julio de 2018 demuestran que, tras el paso por el sistema, el agua incrementaba su temperatura de aprox. 24,67 °C hasta 60,95 °C, por lo que el sistema ha sido capaz de suministrar cerca del 87,20% de la energía total necesaria para la producción en esta planta (figura 4).

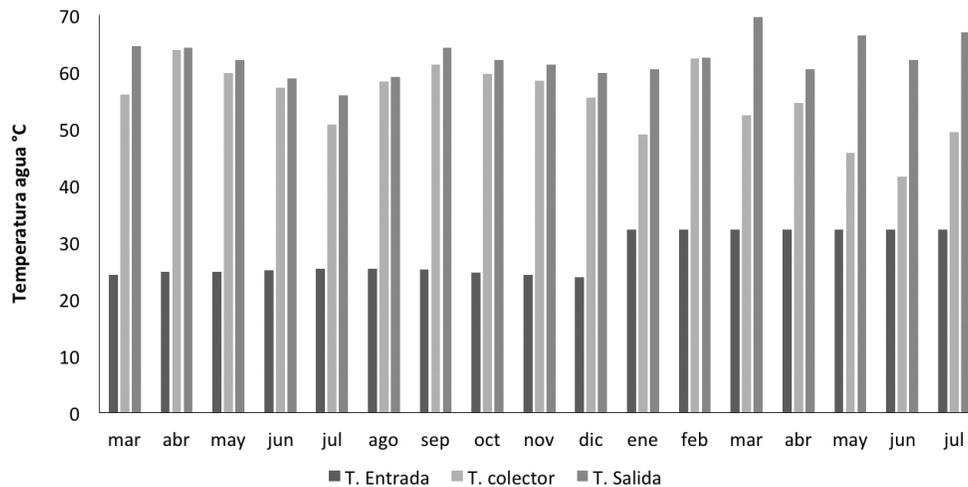


Figura 4. Comparación entre la temperatura de entrada, temperatura en colectores y temperatura de salida del agua a través del sistema solar térmico forzado híbrido de LLAFRACK, en el periodo comprendido entre marzo de 2017 y julio de 2018.

Por otra parte, se debe tener en cuenta que, desde marzo de 2017 hasta julio de 2018, el sistema térmico de LLAFRACK generó un total de 11962,24 kWh, lo que se corresponde con 8254 kg equivalentes de carbono (figura 5).

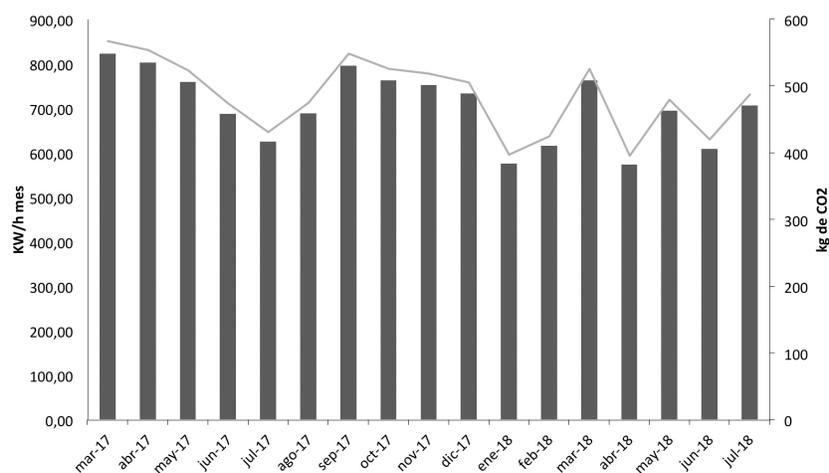


Figura 5. Producción de energía equivalente, expresada en kWh/mes, por el sistema solar térmico forzado híbrido, y emisiones de CO₂ evitadas por cada mes entre marzo de 2017 y julio de 2018

En el caso de la leña, por cada kg de leña quemada se emitían a la atmósfera 1,7 kg de CO₂. Teniendo en cuenta el uso de entre 2 y 2,5 toneladas de leña mensuales, anualmente esa

cantidad se correspondía con 46,3 toneladas de CO₂ emitidas a la atmósfera; las emisiones se han reducido en 38 toneladas de CO₂, equivalentes al 82,2% de las emisiones totales por año. Esta reducción en emisiones se traduce en una importante reducción del impacto ambiental generado por los productores de LLAFRAK y una mejora significativa en las condiciones de trabajo y salud de sus empleados [4].

Sistema termosifónico híbrido forzado instalado en la planta procesadora de lácteos “San Bosco”

Entre junio de 2016 y mayo de 2018 mediante el sistema solar térmico instalado se consiguió elevar la temperatura del agua desde 24,72 °C hasta 59,46 °C, lo que supuso un 83% de la energía requerida por los procesos productivos en la planta procesadora de lácteos “San Bosco” (figura 6).

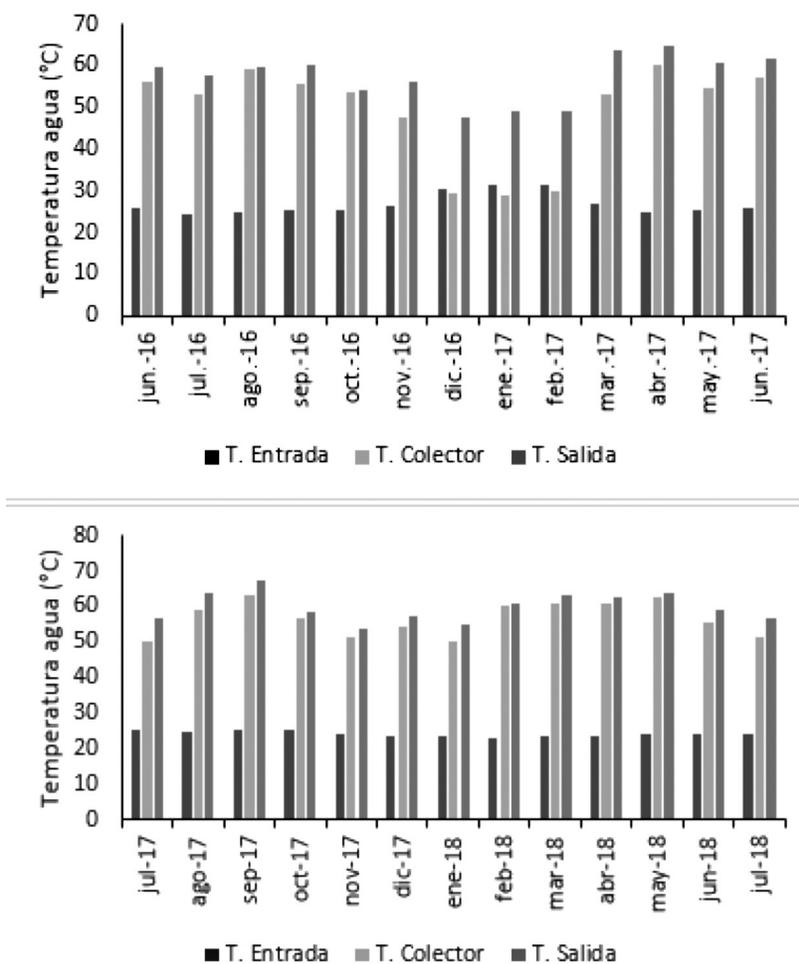


Figura 6. Gráfica comparativa de las temperaturas de entrada, temperatura en colectores y temperatura de salida del agua a través del sistema solar térmico forzado híbrido de “San Bosco”, en los periodos junio 2016 – junio 2017 (superior) y julio 2017 – agosto 2018 (inferior)

Como se puede comprobar, desde que “San Bosco” cuenta con el sistema solar se ha generado un total de 8749,92 kWh, con un promedio de 336 kWh/mes (figura 7). Esto se corresponde con una reducción total de 6037,44 kg de CO₂ totales.

En la lechería de “San Bosco” el total energético producido es menor que en LLAFRAK, ya que la temperatura alcanzada por el sistema térmico de LLAFRAK es 3,8 °C mayor que en “San Bosco”. Esto puede ser debido a unas condiciones climatológicas de mayor nubosidad, que disminuyen el rendimiento del sistema, pero que no impiden, con ayuda del sistema auxiliar de Gas LP, alcanzar un óptimo rendimiento, generando la temperatura requerida para la realización correcta del proceso productivo.

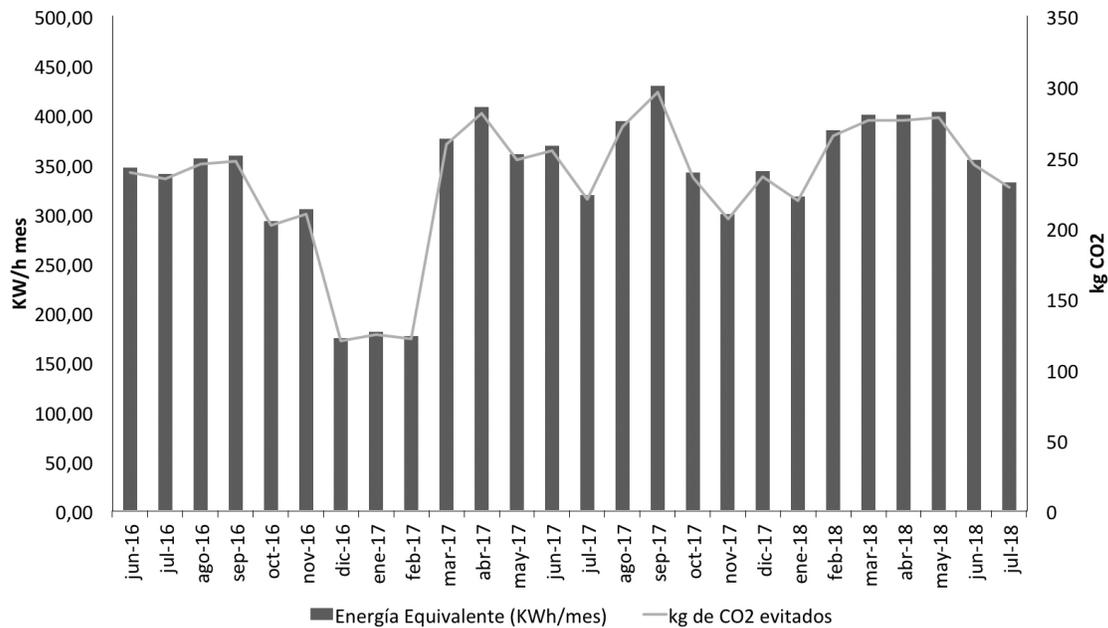


Figura 7. Producción de energía equivalente expresada en kWh/mes por el sistema solar térmico forzado híbrido de “San Bosco”, y emisiones de CO₂ evitadas por cada mes, entre junio de 2016 y julio de 2018

Conclusiones

Con la aplicación de las tecnologías térmicas solares se ha reducido el consumo de energía y se ha obtenido mayor independencia en el aprovisionamiento energético en las plantas procesadoras analizadas. Por otro lado, se ha reducido las emisiones de gases de efecto invernadero, gracias al aprovechamiento de una fuente de energía totalmente limpia y renovable como la energía solar.

Por lo tanto, estas tecnologías resultan ser una alternativa de gran interés y con potencial para beneficiar las actividades agropecuarias, que han mostrado ser viables técnica y económicamente. Además, su impacto tanto en el medio ambiente como en las condiciones de vida de los productores es positivo, mejorando incluso la percepción del producto por parte del consumidor. Por todo ello, y teniendo en cuenta el escenario del cambio climático actual, parece imprescindible apostar por la energía solar en los diferentes ámbitos en los que se requiere el consumo de energía.

El uso de tecnologías solares también permitiría diferenciar el producto final como ecológicamente sostenible, mediante una etiqueta distintiva que lo identificaría en los mercados nacional e internacional.

Referencias

- [1] O. V. Ekechukwu & B. Norton, "Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology," *Energy conversion and management*, 40(6), 615-655, 1999.
- [2] C. Espejo-Marín, "La energía solar fotovoltaica en España", *Nimbus*, 13-14, 2004.
- [3] T.J. Guzmán-Hernández, F. Araya-Rodríguez, J.M. Obando-Ulloa, M. Rivero-Marcos, G. Castro-Badilla & J.M. Ortega-Castillo, *Uso de tecnología solar en actividades agropecuarias de la Región Huetar Norte de Costa Rica*. Santa Clara de San Carlos: Unidad de Publicaciones TEC, 2016. ISBN Obra Independiente: 978-9968-641-99-9.
- [4] T.J. Guzmán-Hernández, F. Araya-Rodríguez, J.M. Obando-Ulloa, M. Rivero-Marcos & G. Castro-Badilla, "Evaluación de sistemas térmicos y fotovoltaicos solares en unidades de producción agropecuaria, Región Huetar Norte, Costa Rica", *Agronomía Mesoamericana*, 28(3), 535-548, 2016.
- [5] T.J. Guzmán-Hernández, J.M. Obando-Ulloa, G. Castro-Badilla, D.A. Rodríguez-Rojas, N. Arce-Hernández, J.M. Ortega-Castillo y F. Araya-Rodríguez, "Aplicación de tecnologías solares térmicas híbridas, para la deshidratación y secado de productos agrícolas en la Región Huetar Norte de Costa Rica", *Ventana* 11 (1): 21-25, 2017.
- [6] M. I. Hoffert, K. Caldeira, G. Benford, D. R. Criswell, C. Green, H. Herzog, A.K. Jain, H.S. Kheshgi, K.S. Lackner, J.S. Lewis, H. D. Lightfoot, W. Manheimer, J.C. Mankins, M.E. Mauel, L.J. Perkins, M.E. Schlesinger, T. Volk, & T.M.L. Wigley, "Advanced technology paths to global climate stability: energy for a greenhouse planet," *Science*, 298(5595), 981-987, 2002.
- [7] M. Khan, A. Abdul-Malek., M. Mithu, & D. Das, "Design, fabrication and performance evaluation of natural circulation rectangular box-type solar domestic water system," *IJRER*, 2, 164-177, 2010.
- [8] T. Kristensen, L. Mogensen, M. T. Knudsen., & J. E. Hermansen, "Effect of production system and farming strategy on greenhouse gas emissions from commercial dairy farms in a life cycle approach," *Livestock Science*, 140(1-3), 136-148, 2011.
- [9] Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones, MINAET, *VI Plan Nacional de Energía*. Dirección Sectorial de Energía, 2011.
- [10] Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica, MIDEPLAN, *Costa Rica. Índice de Desarrollo Social 2017*. Área de Análisis del Desarrollo, 2017.
- [11] S. Nandwani, *Energía solar. Conceptos básicos y su utilización*. Departamento de Física de la Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica, 2005.
- [12] L. Quirós, "Calentando el agua y cuidando el ambiente", *Construir*, 2011.
- [13] K. H. Solangi, M. R. Islam, R. Saidur, N. A. Rahim, & H. Fayaz, "A review on global solar energy policy," *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(4), 2149-2163, 2011.

Familias térmicas solares para procesamiento de productos agropecuarios y agroindustriales en la región Huetar Norte de Costa Rica: programa local piloto

Solar thermal equipments for the processing of agricultural and agroindustrial products in the Northern Huetar Region of Costa Rica: Local pilot program

Tomás J. Guzmán-Hernández¹, Javier M. Obando-Ulloa²,
Freddy Araya-Rodríguez³, Guillermo Castro-Badilla⁴

Guzmán-Hernández, T. J; Obando-Ulloa, J. M; Araya-Rodríguez, F; Castro-Badilla, G. Familias térmicas solares para procesamiento de productos agropecuarios y agroindustriales en la región Huetar Norte de Costa Rica: programa local piloto. *Tecnología en Marcha*. Vol. 33-2. Abril-Junio 2020. Pág 47-53.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v33i2.4311>

Fecha de recepción: 29 de abril de 2019
Fecha de aprobación: 11 de agosto de 2019

- 1 Doctor en Ciencias Agronómicas; coordinador del programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE), Campus Tecnológico Local San Carlos, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: tjguzman@tec.ac.cr. Autor de correspondencia.
 <https://orcid.org/0000-0002-2719-8550>
- 2 Doctor en Tecnología Agraria y Alimentaria; docente e investigador del programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE), Campus Tecnológico Local San Carlos, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: jaobando@tec.ac.cr
 <https://orcid.org/0000-0002-8857-904X>
- 3 Doctor en Ciencias. Programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE), Campus Tecnológico Local San Carlos, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: faraya@tec.ac.cr.
- 4 Ingeniero en Electrónica; docente e investigador de la Escuela de Ingeniería Electrónica, Campus Tecnológico Local San Carlos, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: gucastro@tec.ac.cr.
 <https://orcid.org/0000-0002-7159-9845>



Palabras clave

Agroindustria; energía solar; sistemas solares térmicos; secado solar; sistemas solares termosifónicos.

Resumen

En las operaciones de procesamiento y conservación de productos agropecuarios se aplica diferentes fuentes de energía, cuyo precio ha aumentado en los últimos años. Con el apoyo del programa local piloto de uso de energía solar en la región Huetar Norte, en conjunto con el Instituto Tecnológico de Costa Rica y el Sector Agropecuario, se ha evaluado la aplicación de diversos sistemas térmicos solares en pequeñas y medianas explotaciones agrícolas para sustituir los métodos tradicionales de generación de energía por sistemas limpios para mejorar las condiciones productivas y disminuir la huella de carbono local. Por esta razón, se ha diseñado y evaluado sistemas termosifónicos solares híbridos con un sistema auxiliar eléctrico para la esterilización de equipos de ordeño, así como sistemas térmicos solares forzados híbridos con agua y gas LP para la esterilización y pasteurización de leche o para el secado de productos agrícolas con agua, aire caliente y gas LP y un secador solar pasivo para diferentes tipos de productos agrícolas. Los resultados de la evaluación de estos sistemas se obtuvieron por medio de la ubicación de termopares en lugares claves dentro de los sistemas y fueron almacenados en el espacio cibernético para facilitar su acceso mediante cualquier dispositivo electrónico. Estos resultados han permitido comprobar la disminución de los costos operativos relacionados con las facturas energéticas, el mejoramiento de la eficiencia de los diferentes procesos y la disminución de la huella de carbono de estas explotaciones, lo que representaría una ventaja competitiva en el mercado regional, nacional e internacional.

Keywords

Agroindustry; solar drying; solar energy; thermal solar system; thermosiphonic solar systems.

Abstract

Different energy sources are applied in the operations used for processing and preserving food and other agricultural products. The Technology Institute of Costa Rica and the agricultural sector of Costa Rica has supported the Local Pilot Program for the use of solar energy in the Northern Huetar Region of Costa Rica for the application and evaluation of different solar thermal systems in small and medium-sized agricultural units to replace the traditional methods of energy generation for clean production systems, reduce the local carbon footprint and improve production conditions. For this reason, in the Northern Huetar Region of Costa Rica, hybrid solar thermosiphonic systems with an auxiliary electric system have been designed and evaluated for the sterilization of milking equipment; hybrid solar thermal systems with water and LP gas for sterilization and pasteurization of milk; hybrid forced solar thermal systems with water, hot air and LP gas and a passive solar dryer for different types of agricultural products. The results of the evaluation of these systems were obtained by setting thermocouples in key places inside the systems and they were stored in the cybernetic space to facilitate their access through any electronic device. These results has allowed verify the decrease in operating costs related to energy bills, the efficiency improvement of the different processes and the carbon footprint decreasing of these farms, which would represent a competitive advantage in the regional, national and international markets.

Introducción

La energía ha tenido un papel fundamental no solo para impulsar el desarrollo de los países, sino para generar el bienestar de la población en todos los niveles [1], por lo que el abastecimiento de energía cumple un rol importante en el funcionamiento de cualquier actividad productiva de un país.

En las últimas décadas, la base de generación de energía ha utilizado recursos no renovables, principalmente combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas); sin embargo, el encarecimiento de estos y sus derivados, los altos índices de emisiones contaminantes y los impactos ambientales irreversibles que han generado en el planeta, han conducido a los países a evaluar la llamada matriz energética (conjunto de energías utilizadas) con el propósito de encontrar alternativas menos contaminantes [2].

Esta necesidad del cambio en la matriz se formalizó con el uso de energías limpias, también llamadas renovables, para sustituir parte del consumo de energías fósiles y a la vez, impulsar el compromiso con el desarrollo sostenible por medio de cultivos energéticos o fuentes de energía renovables que hasta el momento no habían sido aprovechadas [1] [2] con el fin de minimizar los costos de producción, principalmente de aquellos que se reflejan en el pago de la factura energética [1].

En torno al tema, y de acuerdo con el VI Plan Nacional de Energía 2012-2030 del Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones (MINAET), Costa Rica presenta un potencial teórico solar de 10.000 MW aunque su grado de utilización es mínimo [3]. Dado lo anterior, el MINAET insta a promover programas de ahorro energético en los macroconsumidores, por lo que ha focalizado el estudio de las oportunidades y el potencial que tiene la región Huetar Norte con fuentes de energía alternativas.

Considerando que dicha zona es una de las mejores en cuanto a radiación solar en Costa Rica [4], el Grupo de Investigación en Sistemas Térmicos Solares para la Agricultura del Programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE) del Campus Tecnológico Local San Carlos del Instituto Tecnológico de Costa Rica (SSC-ITCR) ha decantado a favor de la tecnología solar como alternativa viable y efectiva, con el fin de generar la energía necesaria para las pequeñas empresas de la zona para beneficio propio y como distintivo comercial, la cual represente una ventaja competitiva en el mercado regional, nacional e internacional.

Partiendo de lo mencionado, el objetivo de este trabajo consiste en evaluar la aplicación de diversos sistemas térmicos solares en pequeñas y medianas explotaciones agrícolas para sustituir los métodos tradicionales de generación de energía por sistemas limpios para mejorar las condiciones productivas y disminuir la huella de carbono local.

Materiales y métodos

Considerando el informe emitido por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) en el que se afirma que la ganadería es responsable del 18% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (GEI) [5] –por encima del transporte- y partiendo de que en el cantón de San Carlos (Alajuela, Costa Rica) se encuentra el 55% de los asociados de la Cooperativa de Productores de Leche Dos Pinos R.L. (850 productores en total), quienes generan más del 50% de la producción nacional (0,6 millones de kilogramos de leche), el grupo de investigación se dio a la tarea de aplicar tecnologías que minimicen el impacto generado por el consumo eléctrico de las plantas agroindustriales en las que se desarrolla los procesos productivos del sector ganadero y lechero que inciden negativamente en la huella de carbono local.

Para lograrlo, se desarrolló un sistema térmico solar para el calentamiento de agua para la desinfección de los equipos de ordeño y la pasteurización de leche, que cuenta con paneles solares térmicos, conectados a un tanque acumulador con capacidad para 302,40 l de agua, que posee un sistema eléctrico auxiliar que se activa en caso de que la radiación solar no sea suficiente para que el agua alcance la temperatura requerida (70 °C). El tanque también tiene tres previsiones internas para la conexión de termopares para registrar los datos de captación de energía y el uso del agua, tal como lo describe [6]. Estos sistemas han sido instalados y evaluados, tanto en la lechería del SSC-ITCR como en la lechería de la Escuela Técnica Agrícola e Industrial (ETAI) y en la planta procesadora de las Asociaciones de Productores Lácteos LLAFRACK y San Bosco [7].

Gracias a la capacitación que se impartió a los productores afiliados a la Asociación de Productores Agroambientalistas de Cacao de Guatuso (ASOPAC) sobre el uso de estos sistemas en explotaciones agrícolas, surgió la idea de aplicar esta tecnología al secado de productos agrícolas, de modo que se los productos tengan mayor inocuidad y calidad; por tanto, se diseñó dos sistemas de secado solar, uno de ellos híbrido con circulación forzada de aire y otro con circulación pasiva [8].

Una vez instalados todos los sistemas, se procedió al registro de la masa, tanto de agua fría y agua caliente como de aire frío y caliente, cálculo del diferencial (ahorro) de electricidad del sistema en función del uso de los sistemas solares, balance energético de los sistemas en función de la zona, determinación de la eficiencia energética y la disminución de los costos de producción, cálculo de la disminución de la huella de carbono por medio del producto del valor de los kWh anuales ahorrados y medidos por el sistema y el valor medio de Kg de CO₂ emitidos en la generación eléctrica, según se describe en [2] y [6].

Resultados y discusión

De acuerdo con [9], la región Huetar Norte es una de las dos mejores zonas con radiación solar en Costa Rica, la cual presenta una producción máxima promedio de 0,25 kWh, específicamente cuando el sol está en el cenit (entre las 11 y 12 h; figura 1).

Con base en estos resultados, se ha determinado que en esta región es posible generar una producción diaria promedio de energía solar de 7 kWh y una producción mensual promedio de 187 kWh, lo cual ha permitido determinar que los sistemas térmicos solares instalados en LLAFRACK y San Bosco aportaron la mayor cantidad de energía necesaria para las operaciones que se realizan en la planta procesadora (97,75 y 87,81%, respectivamente), mientras que aquellos instalados en la lechería del ITCR-SSC y la ETAI tan solo aportaron 73,51% y 52,84% de la energía necesaria, respectivamente, para alcanzar la temperatura del agua requerida para las operaciones de limpieza, sanitización y pasteurización (cuadro 1), lo que a su vez ha reducido la emisión de gases de efecto invernadero entre 85% y 99% en las unidades productivas donde se instaló estos sistemas (cuadro 2).

Con respecto de los sistemas térmicos solares de secado para productos agrícolas, se comparó el proceso de secado de cacao y frijol tanto en el sistema térmico solar con circulación de aire forzado como en el pasivo: los resultados permitieron determinar que en el sistema con circulación forzada fue más eficiente para alcanzar un porcentaje de humedad similar, puesto que presentó un tiempo de proceso más corto (48 y 40 h, respectivamente) en comparación con el sistema con circulación pasiva (cuadro 3).

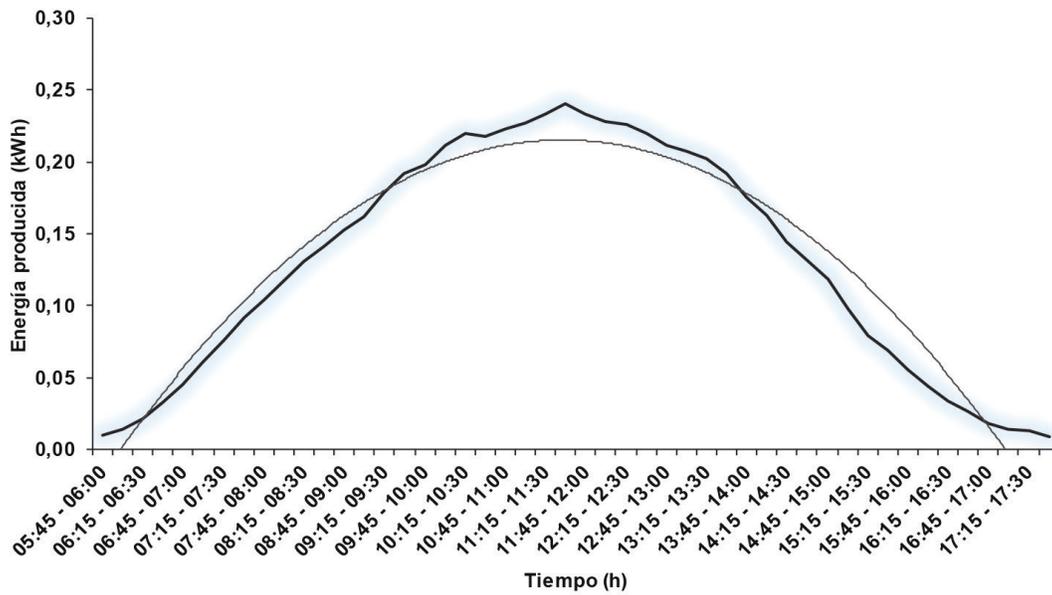


Figura 1. Producción horaria promedio de energía solar durante el día en la región Huetar Norte de Costa Rica, según los datos registrados en el sitio web <https://enlighten.enphaseenergy.com>

Cuadro 1. Porcentaje de energía aportada por el sistema solar térmico para las operaciones de sanitización y pasteurización que se realizan en las unidades productivas donde se instaló los sistemas

Unidad productiva	Energía (KWh/mes)			Porcentaje de energía aportada por el sistema térmico solar (%)
	Demandada	Suministrada por el sistema térmico	Suministrada por el sistema auxiliar	
ITCR-SSC	458,70	242,04	216,04	52,84
ETAI	488,15	358,82	129,33	73,51
LLAFRAK	427,89	416,28	9,61	97,75
San Bosco	418,26	367,30	50,99	87,81

Cuadro 2. Porcentaje de reducción de las emisiones de CO₂ registradas en las unidades productivas donde se instaló los sistemas térmicos solares

Unidad productiva	Emisiones de CO ₂ (Kg)		Reducción (%)
	Antes de la instalación de los sistemas	Después de la instalación de los sistemas	
ITCR-SSC	165,00	11,88	92,80
ETAI	48,44	7,11	85,32
LLAFRAK	3855,60	2,25	99,94
San Bosco	3855,60	11,93	99,69

Cuadro 3. Comparación del tiempo de secado de cacao y frijol en dos tipos de sistemas térmicos solares implementados en la región Huetar Norte de Costa Rica

Producto	Sistema térmico solar de secado			
	Circulación forzada de aire		Circulación pasiva de aire	
	Tiempo de proceso (h)	Humedad (%)	Tiempo de proceso (h)	Humedad (%)
Cacao	48	7	122	7,52
Frijol	40	11	168	11,29

Además, otros productos agrícolas sometidos a secado con circulación forzada de aire alcanzaron los porcentajes de humedad permitidos por las normas internacionales [10] en aprox. 40 - 56 h (cuadro 4).

Cuadro 4. Porcentajes de humedad alcanzados por los productos agrícolas secados en el sistema térmico solar híbrido con circulación forzada de aire

Producto	Tiempo de proceso (h)	Humedad (%)
Ayote	48	8
Café	56	11
Cúrcuma	48	12
Jengibre	48	7
Piña	40	12

Conclusiones

Este estudio ha permitido comprobar que la energía electromagnética emanada del sol es ilimitada y está disponible en promedio de 200 - 500 W/m² en la mayor parte del mundo, por lo que su uso es una opción viable, a través de sistemas combinados para las operaciones agrícolas y la conservación de los productos agropecuarios. Además, el uso de este tipo de energía contribuye no solo a la mitigación de los gases de efecto invernadero para reducir el efecto del cambio climático a nivel global, sino como un distintivo comercial que represente una ventaja competitiva para los productores de la región Huetar Norte en los mercados regionales, nacionales e internacionales.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecen a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica y a la Fundación para el Fomento y Promoción de la Investigación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria de Costa Rica por el apoyo económico a los proyectos VIE 1710- 024, VIE 1701-180, VIE 1710-012 y F 0917, respectivamente.

Referencias

- [1] I. Briceño, et al. Potencial de generación de energía de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia. Rev. Palmas, vol. 36, no. 3, pp. 43-53, Jul.- Sept. 2015.
- [2] WST.J. Guzmán-Hernández, et al. Evaluación de sistemas térmicos y fotovoltaicos solares en unidades de producción agropecuaria, región Huetar Norte, Costa Rica. Agron. Mesoam., vol. 28, no. 3, pp. 535-548, Sept.-Dic. 2017.
- [3] Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones (MINAET). (2011). VI Plan Nacional de energía 2012-2013. Disponible en http://www.dse.go.cr/es/03Publicaciones/01PoliticaEnerg/VI_Plan_Nacional_de_Energia_2012-2030.pdf.
- [4] Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). (2010). Costa Rica: matriz eléctrica. Disponible en https://www.kolbi.cr/wps/wcm/connect/8823524c-7cc7-4cef-abde-a1f06e14da0e/matriz_folleto_web2.pdf?MOD=AJPERES&CVID=l8SK4gG.
- [5] Matthews, C. (2006). La ganadería amenaza el medio ambiente. Disponible en <http://www.fao.org/newsroom/es/news/2006/1000448/index.html>.
- [6] T. Guzmán-Hernández, et al. Uso de la energía solar en sistemas de producción agropecuaria: producción más limpia y eficiencia energética. Technol. Marcha. Encuentro de Investigación y Extensión 2016, pp. 46-56. 2016.
- [7] T. Guzmán, et al. Resultados de la implementación de tecnologías solares en sistemas de producción agropecuaria en Costa Rica. Ventana Lechera, vol. 35, pp. 4-17, Ene. 2017.
- [8] T.J. Guzmán-Hernández, et al. Aplicación de tecnologías solares térmicas híbridas, para la deshidratación y secado de productos agrícolas en la región Huetar Norte de Costa Rica. Ventana vol. 11, no. 1, pp. 21-25. 2017.
- [9] R. Portilla Pastor, et al. Determinación de potenciales de energía solar para generación eléctrica en Costa Rica. En: Memorias Congreso Internacional Clima, Agua y Energía, pilares para el desarrollo sostenible. Universidad Nacional Campus Nicoya, Guanacaste, Costa Rica. pp. 231-244. 2014.
- [10] Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá (INCAP). Cuadro de composición de alimentos de Centroamérica. 2a edición. 128 pp. 2012.

Simulación de movimientos vermiformes mediante caminatas aleatorias entre n-símplex vecinos

Simulation of vermiform movements through
random walks between n-simplex neighbors

Jorge Arroyo-Hernández¹, José Pablo Alvarado-Moya²

Arroyo-Hernández, J; Alvarado-Moya, J. Simulación de movimientos vermiformes mediante caminatas aleatorias entre n-símplex vecinos. *Tecnología en Marcha*. Vol. 33-2. Abril-Junio 2020. Pág 54-66.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v33i2.4329>

Fechas de recepción: 1 de mayo de 2019
Fecha de aprobación: 25 de agosto de 2019

1 Escuela de Matemática, Universidad Nacional. Costa Rica. Correo electrónico: jarroy@una.ac.cr.

 <http://orcid.org/0000-0002-3890-5011>

2 Escuela de Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: palvarado@tec.ac.cr.



Palabras clave

Movimiento vermiforme; n-símplex; caminatas aleatorias.

Resumen

La aplicación de técnicas de visión computacional en contextos biológicos requiere generalmente la anotación manual de datos del contexto específico, lo que hace que estas etapas sean costosas en inversión de tiempo y recurso humano especializado. En este artículo, se presenta un método novedoso de generación de datos aleatorios dentro de un subdominio restringido a variedades de formas permitas. Se particulariza el proceso a modelos de forma explícitos basados en hitos de frontera para estructuras vermiformes. Mediante este proceso, se logran simular deformaciones secuenciales de movimientos de gusanos por medio de caminatas aleatorias entre los subdominios.

Keywords

Vermiform movement; n-simplex; random walks.

Abstract

Application of computational vision techniques in biological contexts usually requires manual annotation of data from the specific context, which makes these stages costly due to investment in specialized human resource time. In this article we present a novel method of generating random data within a subdomain restricted to a variety of allowed shapes. The process is particularized to explicit models based on border landmarks for vermiform structures. Through this process, sequenced deformations of worm movements are simulated by random walks between the subdomains.

Introducción

La economía en Centroamérica depende de la agricultura. En países como Costa Rica, en donde indicadores macroeconómicos muestran un incremento en la diversificación de bienes y servicios, un 10,3% de las actividades económicas se atribuyen al sector agropecuario [1]. La supervivencia de este sector depende de la mejora continua que permita alcanzar, mantener e innovar los procesos, superando los estándares de calidad y cantidad demandados por los mercados locales e internacionales [2].

En la búsqueda de biocontroles para enfermedades en plantas se ha perseguido automatizar parcial o totalmente el análisis de muestras con modernos métodos de campo de visión por computador y aprendizaje de máquina, para así potenciar el impacto del tiempo invertido por expertos en el análisis de dichas muestras [3], [4].

Métodos que utilizan explícitamente información de la forma de organismos para determinar indicadores de interés requieren suficiente material de entrenamiento, que es en general costoso de preparar manualmente. Este artículo propone una técnica novedosa de emulación de la variación de siluetas, que se produce con un bajo costo computacional. El método propuesto parte de un conjunto de datos inicial que define el dominio válido de formas, y a partir de allí sigue un recorrido aleatorio por dicho dominio. El proceso genera una sucesión de formas sintéticas nuevas que complementan el conjunto de datos original, con el objetivo de poder utilizarlo en procesos de entrenamiento y validación de sistemas de aprendizaje automático.

Si bien es cierto, el concepto presentado en este artículo se desarrolla en el contexto de análisis de imágenes de nematodos como caso particular, el concepto es aplicable a cualquier otra área en que se utilicen modelos explícitos de forma, como el análisis facial [5] o el análisis de imágenes médicas [6], entre otros.

El artículo se estructura de la siguiente manera: una revisión de trabajos relacionados se presenta en la siguiente sección.; el fundamento teórico y algorítmico utilizado en la generación de las nuevas formas se describe en la tercera sección; en la cuarta, se analizan los resultados del método propuesto. Conclusiones y trabajo futuro presentados en la última sección cierran el artículo.

Trabajos relacionados y modelo propuesto

Varias estrategias se han propuesto para clasificar, detectar, simular y extraer estructuras en imágenes de objetos con formas de gusano. En “Active shape models...” [7] se sientan las bases de los métodos capaces de expresar explícitamente formas válidas por medio de modelos estadísticos de distribución de puntos, con base en el análisis de componentes principales, para la reducción de la dimensión de vectores representativos de la formas. Sin embargo, en ese mismo trabajo se demuestra que una distribución normal de puntos es incapaz de restringir las formas representadas a formas vermes válidas y deja por fuera siluetas anatómicamente plausibles en nematodos y otros organismos vermiformes.

Un método de descripción de las contorsiones de la cabeza del *C. elegans* se expone en “Automated detection...” [8]. Dicho método propone cómo medir los ángulos de contorsión en la cabeza, en la descripción del *forrageo* (movimientos exploratorios). La información espaciotemporal se aprovecha en “Tracking the swimming motions...” [9] para predecir la posición y ajustar la forma del organismo en procesos de segmentación y rastreo, utilizando para ello la evolución de los ángulos y vértices del esqueleto morfológico. Estos conceptos se toman como base en este trabajo para ser utilizados en la dirección contraria, y sintetizar con ello nuevas formas.

Otros métodos para representar el espacio de formas válidas de nematodos basados en técnicas de aprendizaje de diccionarios y de aprendizaje de variedades se exploran en “Active dictionary models...” [10] y “Segnema: nematode segmentation...” [11]. Un concepto basado en un modelo generativo que aprende la geometría de la variedad a partir de los datos se propone en “Geometry based data generation” [12], en donde se procura ignorar la densidad de estos, utilizando mapas de difusión para establecer la estructura geométrica de la variedad. Dicha estrategia no es apta para el tipo de datos presentes en este artículo, donde la dimensión del espacio es elevada con respecto al número de datos disponible, pues la difusión no cuenta con suficiente soporte para ser estimada de forma robusta.

Como alternativa para dar más peso a la geometría de la variedad que a la densidad de puntos disponibles de entrenamiento, se utiliza en la presente propuesta una técnica similar a los k vecinos más cercanos móviles, expuesta en “Analysis and evaluation of V*-kNN...” [13] para un contexto de consultas en bases de datos espaciales. El método es similar al presentado aquí en el hecho de que usa tanto la información de la posición actual en la caminata como del vecindario para la decisión del siguiente paso; pero en el presente caso la estrategia elegida para saltar a la siguiente posición está orientada a producir formas disímiles al punto de partida, manteniendo su validez, en vez de procurar la descripción geométrica de la variedad.

En otra dirección, la simulación completa del organismo de un nematodo de la especie *C. elegans* se persigue en el proyecto OpenWorm [14]. En ese proyecto ya se ha generado el movimiento locomotivo de un espécimen, por medio de la simulación de 302 neuronas

y 95 células musculares. Los datos producidos en dicha simulación se pueden acoplar a renderizadores que generen las siluetas o las imágenes, según se requiera. Si bien es cierto, esta simulación de abajo hacia arriba (*bottom-up*) permite alcanzar altos niveles de realismo anatómico en los detalles, el consumo de recursos computacionales no la hace viable en contextos donde la generación de formas es parte de otros procesos, como la segmentación de nematodos o su rastreo en imágenes.

En este trabajo se propone una estrategia para la generación de una sucesión de formas a partir de una caminata aleatoria estimada sobre un conjunto de datos de entrenamiento que se asume pertenecen a una variedad topológica embebida en un espacio de alto número de dimensiones, en donde el reto es generar formas suficientemente disímiles de las existentes en el cuerpo de entrenamiento, pero que sigan siendo válidas en el dominio de aplicación, todo ello con un bajo consumo de recursos computacionales, que permita insertar el proceso generativo en otras tareas, como la segmentación o rastreo de nematodos en imágenes.

Simulación de movimientos vermiformes

La generación de nuevas formas aleatorias con el método propuesto persigue restringir los resultados a estructuras vermiformes válidas. Se parte de un modelo donde el dominio completo de D_f formas válidas se particiona en subdominios S_{D_f} , para los que se define una relación de vecindad. Cada paso realizado en una caminata aleatoria discreta produce saltos a subdominios vecinos. Esto asegura que cada forma generada en cada paso de la caminata es única en su estructura, diferenciándose de los pasos previos, pero además que es una forma válida. En las siguientes secciones se detalla el proceso de generación de formas y la definición del camino aleatorio.

Conjunto de datos para la simulación

Los modelos de forma son prototipos paramétricos representados a través de un conjunto D_f de formas cuyo i -ésimo elemento se representa vectorialmente por $\hat{f}_i = [x_{i0} \ y_{i0} \ x_{i1} \ y_{i1} \ \dots \ x_{im-1} \ y_{im-1}]^T$ donde cada par (x_{ij}, y_{ij}) representa las coordenadas cartesianas de un hito P_{ij} en la imagen. Los hitos deben estar ubicados secuencialmente a lo largo del contorno del objeto que representan (ver figura 1).

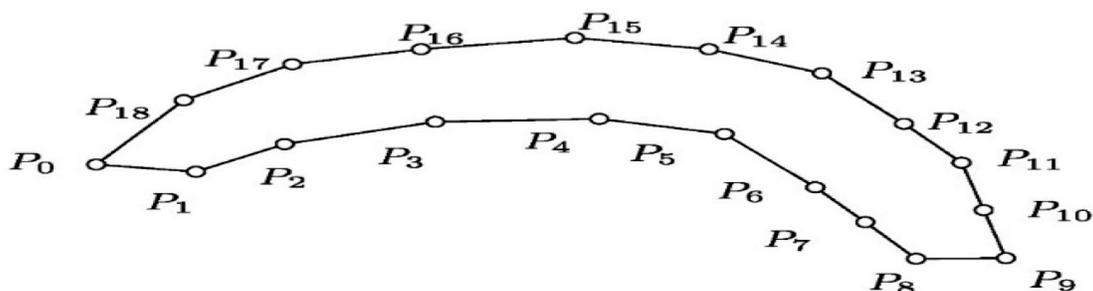


Figura 1. Secuenciación de hitos de una forma verme f_i . Cada forma en el conjunto de datos se construye a partir de una forma *cruda* representada con un número arbitrario de hitos colocados manualmente por un anotador humano sobre el borde de cada organismo en imágenes digitales. Las imágenes provienen de muestras reales de suelo, capturadas con un microscopio óptico en trece secuencias con características visuales variadas.

Las formas crudas son normalizadas en varios pasos. Primero se asegura que los hitos anotados sigan una secuencia en sentido antihorario [15], [16], iniciando siempre en la cabeza o la cola. Un número constante m de hitos equidistantes para cada forma del conjunto D_f se genera por medio de interpolación con trazadores segmentarios cúbicos [17], [18] a partir de los hitos anotados. Además, el conjunto de datos se extiende (o aumenta) con formas generadas por reflexiones de las formas interpoladas, e intercambiando las posiciones de cabeza y cola, con

$$\tilde{f}_i = \left[\begin{array}{cccccccccccccccc} x_{\frac{i}{2}^m} & y_{\frac{i}{2}^m} & x_{\frac{i}{2}^m+1} & y_{\frac{i}{2}^m+1} & \text{L} & x_{i_{m-1}} & y_{i_{m-1}} & x_{i_0} & y_{i_0} & x_{i_1} & y_{i_1} & \text{L} & x_{\frac{i}{2}^m-1} & y_{\frac{i}{2}^m-1} \end{array} \right]^T$$

Finalmente, todo el conjunto de formas se alinea y re-escala utilizando el análisis de Procrustes descrito en “Active shape models...” [7]. En adelante, la i -ésima forma normalizada del conjunto total de datos se denota con \hat{f}_i .

Dominio y subdominios de formas vermes

El dominio D_f es un conjunto de cardinalidad infinita en el que cada elemento $\hat{f}_i \in D_f$ es una forma verme válida. Asimismo, se define un subdominio S_{D_f} como un subconjunto de individuos \hat{f}_i , que por medio de algún estadístico de proximidad o distancia, agrupa formas similares. De este modo el dominio se particiona en un conjunto de subdominios disjuntos. En el presente trabajo, cada subdominio se representa por medio de un n -simplex [19], es decir, una envoltura convexa de n dimensiones engendrada por $n + 1$ puntos en \mathbb{R}^{2m} , dada por $\{v_0, v_1, \text{L}, v_n\}$ con vectores $\{v_1 - v_0, v_2 - v_0, \text{L}, v_n - v_0\}$ linealmente independientes, de modo que $\{f_0, f_1, \text{L}, f_n\}$ sean formas vermes válidas similares. Se parte de la premisa de que formas válidas \hat{f}_i dentro del subdominio (n -simplex) se engendran como combinaciones baricéntricas:

$$\hat{f}_i \approx \alpha_0 f_0 + \alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2 + \text{L} \alpha_n f_n$$

Con $0 \leq \alpha_i \leq 1$ y $\sum_{j=0}^n \alpha_j = 1$, y que dicho subdominio embebido en el espacio \mathbb{R}^{2m} es (aproximadamente) tangente a una variedad topológica n -dimensional correspondiente al dominio D_f que contiene todas las formas válidas. Dos subdominios que poseen al menos un vértice del n -simplex en común se consideran vecinos.

Por medio del algoritmo de k - medias [20] se encuentran k conglomerados \mathbb{R}^{2m} , que agrupan todas las formas disponibles de acuerdo a su similitud. Los k centroides asociados a los conglomerados conforman el conjunto C de posibles vértices de los n -simplex (ver figura 2).

Generación de movimientos aleatorios vermes

Los movimientos vermes se simulan con una caminata aleatoria [21], definida en este caso como una sucesión de saltos aleatorios entre subdominios $S_{D_f}^{(i)}$ vecinos (como se muestra en la figura 3), que deforman gradualmente la silueta original. Este recorrido entre subdominios vecinos permite que cada elemento \hat{f}_i conserve información de la forma de al menos uno de los vértices que los subdominios tienen en común, obligando así en cada cambio de subdominio a una deformación paulatina, sin cambios abruptos.

Se parte entonces de una forma verme inicial \hat{f}_0 . A partir de ella se calcula el n -simplex $S_{D_f}^{(0)}$ engendrado por el conjunto V_0 de los n centroides en C más cercanos a \hat{f}_0 . Esta tarea utiliza

el método aproximado de búsqueda de vecinos más cercanos expuesto en “Fast approximate nearest neighbors...” [22].

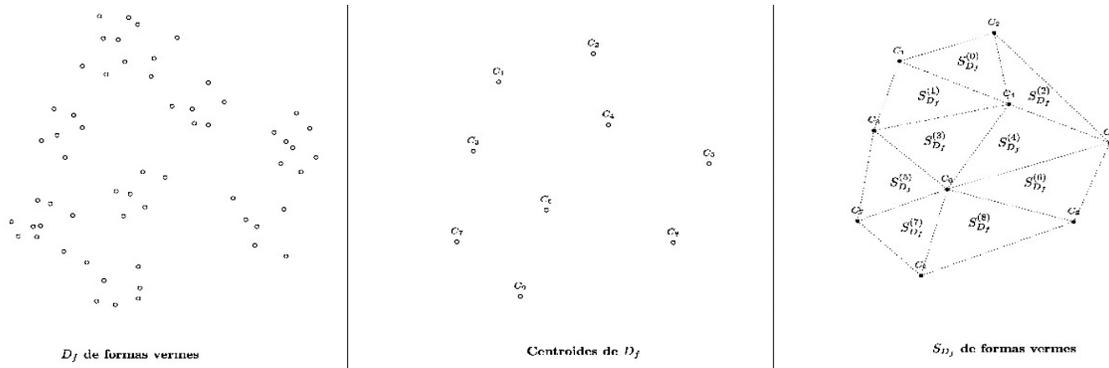


Figura 2. Obtención de S_{D_f} a través de k -medias. El subconjunto de n vértices se elige de modo que el n -simplex engendrado no contenga ningún otro vértice. La elección del número $k > n$ de conglomerados define entonces indirectamente el volumen de los simplex, y qué tan disimiles serán las formas en subdominios vecinos.

Ahora, se selecciona el siguiente subdominio $S_{D_f}^{(1)}$ determinado por el conjunto V_1 de los n centroides más próximos a uno de los vértices (seleccionado aleatoriamente) de V_0 . Este nuevo subdominio de formas permitidas corresponde a un n -simplex vecino del anterior. Dentro de este subdominio $S_{D_f}^{(1)}$ se toma aleatoriamente la siguiente forma $\hat{f}^{(1)}$ de la sucesión, utilizando coeficientes baricéntricos generados aleatoriamente.

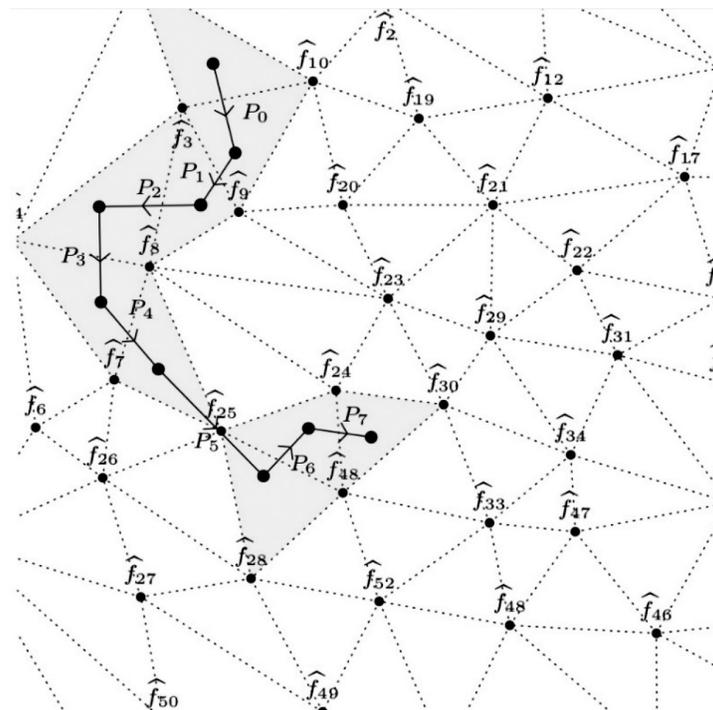


Figura 3. Caminata aleatoria de \hat{f}_i entre S_{D_f} vecinos. El proceso se repite iterativamente hasta satisfacer un criterio de parada, como por ejemplo, un número predeterminado de pasos, o haber superado alguna medida de distancia con el punto de partida. El algoritmo completo se resume en la figura 4.

```

Input :  $\hat{f}_0 \leftarrow$  Forma inicial
           $D_f \leftarrow$  Dominio de formas permitidas
1  $C \leftarrow kmeans(D_f)$  /* centroides de  $D_f$  calculados por  $k$ -means */
2  $M_0 \leftarrow \hat{f}_0$  /*  $M_0$  vértice inicial */
3  $i \leftarrow 1$ 
4 mientras  $i$  menor a algún  $p$  hacer
5    $V_i \leftarrow knn(C, M_{i-1})$  /*  $V_i$  vecinos más cercanos de  $M_{i-1}$  por  $k$ -nn */
6    $S_{D_f}^{(i)} \leftarrow ksíplex(V_i)$  /*  $i$ -ésimo subdominio de formas permitidas */
7    $\hat{f}_i \leftarrow random(S_{D_f}^{(i)})$  /* Cálculo de la  $i$ -ésima deformación  $\hat{f}_i \in S_{D_f}^{(i)}$  */
8    $M_i \leftarrow random(V_i)$  /*  $M_i$  es un vértice al azar de  $S_{D_f}^{(i)}$  */
9    $i \leftarrow i + 1$ 
10 fin

```

Figura 4. Algoritmo de caminata aleatoria de formas válidas. El algoritmo propuesto permite simular las deformaciones a partir de una instancia inicial y que continúen de manera natural conservando información de forma entre las iteraciones, y dando a la secuencia el carácter de movimiento aleatorio de un organismo vermiforme. En la figura 5, se aprecia un ejemplo del movimiento generado por el recorrido aleatorio basado en el salto entre subdominios vecinos. Se parte de una forma inicial arbitraria y se muestran para nueve iteraciones las deformaciones generadas, que el método asegura sean formas vermes válidas.

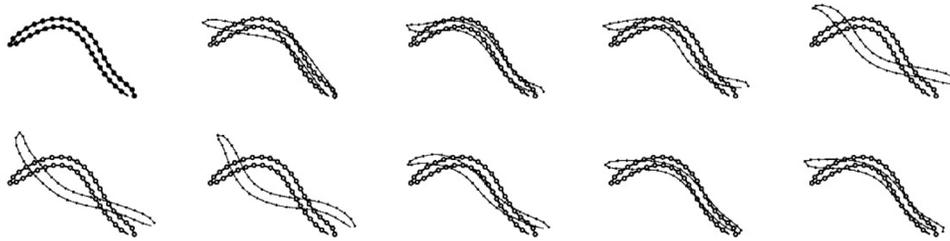


Figura 5. Deformaciones de movimientos continuos mediante el traslado aleatorio entre S_{D_f}

Transformación de formas y proyección a la variedad

Para poder evaluar el alcance de las formas generadas en la caminata aleatoria, es necesario resolver dos problemas:

- ¿Cómo generar eficientemente formas arbitrarias que se puedan considerar válidas?
- ¿Cómo proyectar una forma verme cualquiera al dominio de formas válidas?

El primer problema se ataca para el caso de los nematodos, con la simulación de deformación de la anatomía. El segundo problema se resuelve con el algoritmo de la estimación de las coordenadas baricéntricas correspondientes a una forma dada dentro del n -símplex más cercano. Los detalles se desglosan en las siguientes dos secciones.

Método de deformación de nematodos

Para deformar un nematodo \hat{f}_i , se utiliza el esqueleto E_i (ver figura 6) definido como un vector compuesto por las posiciones de las vértebras, cada una dada por el promedio de los dos hitos

correspondientes opuestos P_{ij} y P_{im-j} . Se toman los hitos sobre la cabeza y cola como la primera vértebra $V_{i0} = (E_{i0_x}, E_{i0_y}) = (x_{i0}, y_{i0})$ y última vértebra $V_{iu} = (E_{iu_x}, E_{iu_y}) = (x_{iu}, y_{iu})$, respectivamente, donde $u = \frac{m}{2}$ y m es el número de hitos de \hat{f}_i . El conjunto de todos los esqueletos E_i de $\hat{f}_i \in D_f$ se denota \bar{E} , y cada uno se expresa vectorialmente por

$$E_i = \left[E_{i0_x} \ E_{i0_y} \ E_{i1_x} \ E_{i1_y} \ L \ E_{iu_x} \ E_{iu_y} \right]^T$$

La posición de cada vértebra intermedia está dada por

$$E_{ij_x} = \frac{x_{ij} + x_{i(m-j)}}{2} \quad E_{ij_y} = \frac{y_{ij} + y_{i(m-j)}}{2} \quad \text{para } 0 < j < u$$

La modificación de forma se concentra en dos fragmentos del esqueleto, definidos por las u' vértebras $V_{ij} = (E_{ij_x}, E_{ij_y})$ más cercanas a la cabeza y a la cola de \hat{f}_i . Para las vértebras V_{ij} del fragmento de la cabeza se cumple $1 \leq j < u'$, y para el fragmento de cola $u - u' \leq j < u$.

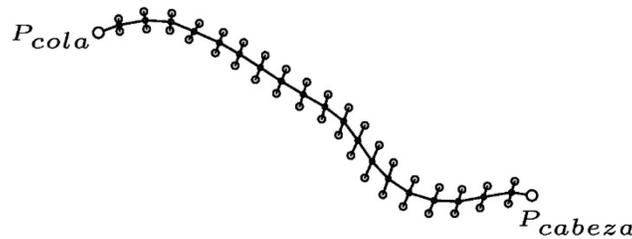


Figura 6. Esqueleto de una forma verme \hat{f}_i

Para lograr la deformación deseada (e inspirada en el *forrageo* [8]) se toman los fragmentos u' con vértebras de cola y cabeza, y se manipulan (junto a los hitos correspondientes a cada vértebra) como una cadena cinemática directa. En dicha cadena, cada vértebra cuenta con un grado de libertad rotacional. Los ángulos de rotación θ están restringidos a ser iguales en todas las vértebras.

Dado el número u' de vértebras que modificar, el algoritmo toma inicialmente la vértebra del fragmento de cabeza $V_{iu'} = (t_x, t_y)$ como fija y aplica la transformación al resto de vértebras e hitos en la cadena cinemática.

$$M_v \begin{bmatrix} x_{ij} \\ y_{ij} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \text{sen} \theta & -(t_x \cos \theta + t_y \text{sen} \theta) + t_x \\ -\text{sen} \theta & \cos \theta & -(t_y \cos \theta - t_x \text{sen} \theta) + t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{ij} \\ y_{ij} \\ 1 \end{bmatrix}$$

Luego, dada la nueva posición de la vértebra $V_{iu'-1}$ se le aplica M_v al resto de elementos de la subcadena cinemática hacia la cabeza. Posteriormente, se repite el proceso a partir de la vértebra $V_{iu'-2}$ y así sucesivamente hasta llegar al hito de la cabeza. De forma análoga, se sigue el procedimiento de la vértebra colocada en la posición $u - u' + 1$ hacia la cola. Las contorsiones vermes de la cola resultante se ilustran en la figura 7.

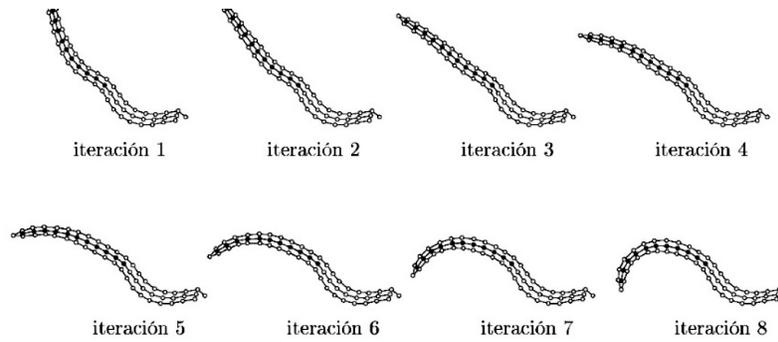


Figura 7. Iteraciones del método de serpiente para la cola de \hat{f}_i para $u' = 11$, $\theta = 0,2$ rad

Proyección al dominio de formas válidas

La proyección de una forma \hat{f}_α al dominio de formas válidas se divide en dos etapas. La primera es determinar el subdominio al que pertenece \hat{f}_α , y la segunda es calcular los pesos baricéntricos que mejor aproximan la forma en dicho subdominio.

Para la primera etapa se calcula el conjunto de los $n+1$ vecinos más cercanos $\{\hat{f}_0, \hat{f}_1, \dots, \hat{f}_n\}$ a \hat{f}_α ordenados según su lejanía. Estos vecinos son elementos del conjunto de posibles vértices obtenido con el algoritmo de k -medias (sección 3.2). Luego, se aplica la variación del método *matching pursuit* [25] propuesta en “Active dictionary models...” [10] para estimar los pesos baricéntricos $\alpha = [\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_n]$ que mejor aproximan la forma \hat{f}_α dada por $\hat{f}_\alpha \approx \alpha_0 f_0 + \alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2 + \dots + \alpha_n f_n = \hat{f}_c$

Así \hat{f}_c es la aproximación más cercana a \hat{f}_α que se encuentra dentro del n -símplex con vértices f_i .

Resultados y discusión

En esta sección, se muestran resultados sobre la versatilidad del método propuesto para la generación de sucesiones aleatorias de formas vermes que simulen el movimiento de serpiente. Primero, se analiza la similitud entre formas de la secuencia en función del número de centroides utilizados. Luego se revisa el método utilizado para estimar los pesos baricéntricos.

Para la experimentación se utilizó una base de datos de entrenamiento con 10 932 formas vermes distintas, generadas a partir de un conjunto inicial de formas crudas, normalizadas y aumentadas según lo descrito en la sección 3.1, con $m=40$ hitos por contorno.

Los algoritmos se implementaron en el lenguaje C++, utilizando la biblioteca FLANN [23] para el cálculo eficiente de los centroides y de búsqueda de vecinos cercanos, así como la biblioteca LTI-Lib2 [24] como base para el procesamiento de imágenes.

Distancia entre formas en función de la dimensión del subdominio

En el primer experimento se evaluó la distancia entre las formas producidas con los saltos entre subdominios, en función de la dimensión de dichos subdominios. Dicha distancia entre formas se cuantificó con el promedio de la distancia euclídea entre hitos correspondientes de dos

formas sucesivas \hat{f}_i y \hat{f}_{i+1} , dada por $d(\hat{f}_{i+1}, \hat{f}_i) = \frac{1}{m} \sum_{j=0}^{m-1} \sqrt{(x_{i+1j} - x_{ij})^2 + (y_{i+1j} - y_{ij})^2}$

El cuadro 1 resume los resultados obtenidos usando 1000 iteraciones del algoritmo de generación de formas (figura 4) con subdominios n -dimensionales (n -simplex), con $n = 5, 10, 20, \dots, 100$ vértices tomados de k centroides, definidos sobre el conjunto de datos con el método de k medias (sección 3.2) para $k > 200$ en múltiplos de 100.

El resultado confirma la correlación existente entre la distancia entre las formas sucesivas y la dimensión n de los subdominios. Entre mayor la cantidad de vértices utilizada, mayor la distancia entre los hitos correspondientes a dos deformaciones sucesivas.

Esto puede explicarse así: manteniendo el número k de puntos disponibles como vértices constante, entonces mientras mayor sea el número n , mayor será la distancia entre dichos vértices, de modo que también aumente el tamaño del paso realizado de una forma a otra.

Cuadro 1. Promedio de distancias entre hitos correspondientes a \hat{f}_i y \hat{f}_{i+1} en una sucesión de 1000 formas

$C_j \setminus$ Nodos	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
200	9.234	10.912	12.290	14.024	13.299	14.149	15.750	14.748	16.111	17.904	16.833
300	9.772	11.263	12.270	12.142	13.477	15.999	16.252	16.175	17.001	17.576	18.475
400	8.734	10.261	11.417	12.571	13.813	13.415	15.108	15.911	16.614	17.124	17.395
500	8.870	10.999	11.530	11.995	12.223	13.122	14.145	14.925	16.685	18.693	18.583
600	7.647	9.9830	11.314	12.416	13.591	14.164	14.560	15.969	16.823	19.612	20.405
700	7.683	9.5160	11.193	12.497	12.639	13.226	12.569	14.097	15.279	16.482	19.400
800	6.232	9.0780	10.791	12.318	12.559	13.558	13.182	13.921	14.517	14.568	17.801
900	6.283	9.3140	11.217	12.206	13.095	14.642	14.992	15.347	15.347	16.359	19.029
1000	6.483	9.2060	10.794	12.207	13.324	14.218	15.074	15.902	16.522	16.791	18.385

Nota: Se tomaron los k centroides correspondientes a los conglomerados encontrados por el algoritmo de k -medias, y de ellos se seleccionaron subdominios de n dimensiones (n -simplex) embebidos en un espacio de \mathbb{R}^{80} (40 hitos por forma).

Si el número de vértices del subdominio es 5, el desplazamiento de los hitos será menor a 8 píxeles en promedio, lo que exhibe baja variabilidad promedio de cambios independientemente del número de centroides.

Si se elige un número de vértices de los subdominios mayor a 40, las deformaciones sucesivas con distancias superiores a 13 píxeles por hito se perciben abruptas y se pierde la noción de continuidad de la simulación, independientemente del número k de centroides utilizado.

Simulaciones aceptables con distancias promedio entre hitos de alrededor de 12 píxeles se pueden generar con n -simplex con dimensión n entre 10 y 30, independientemente del número de centroides.

Validez y alcance del dominio de formas

El segundo experimento persigue cuantificar de qué modo cualquier forma verme \hat{f}_α puede ser aproximada en el dominio de formas válidas D_f .

Se utilizó una muestra de 1000 formas vermes \hat{f}_α generadas aleatoriamente usando el método de deformación de nematodos ya descrito, normalizadas según el método indicado para la normalización de las formas crudas, utilizando como punto de partida formas no presentes en la base de datos de entrenamiento.

Se utilizó el método para la proyección al dominio de formas válidas, para calcular la aproximación \hat{f}_c de cada forma \hat{f}_α . Se evaluó entonces la distancia promedio entre hitos (dada en la sección 4.1) en función de la dimensión n de los n -simplex, para varios valores de k centroides de donde se tomaron los $n + 1$ vértices de los n -simplex. En los resultados que se muestran en la figura 8 hay tendencia a una disminución de la distancia entre la aproximación \hat{f}_c de \hat{f}_α cuando aumenta el número k de centroides que determinan los subdominios. Desde una partición con $k = 200$ conglomerados del D_f para formar los subdominios, se muestra que aproximadamente la distancia por hito entre las siluetas originales y las calculadas es menor a 1 pixel promedio, por lo que se concluye que son muy cercanas en forma. Por otro lado, al aumentar la dimensión de los n -simplex, la distancia de desvío entre hitos tiende a aumentar también para un mismo número de centroides k , puesto que si se mantiene k , entonces la distancia entre los vértices crece con el aumento de la dimensión n de la variedad. Obsérvese que este efecto se reduce conforme aumenta el número de centroides.

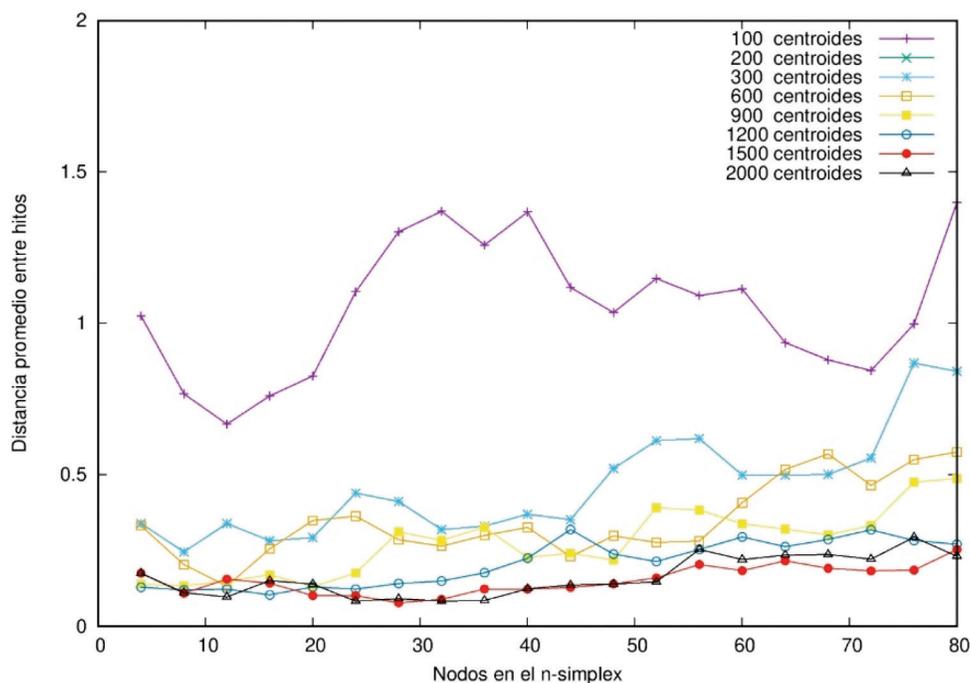


Figura 8. Distancia promedio por hito entre \hat{f}_c y \hat{f}_α en un S_{D_f} de k vértices

Conclusiones y trabajo futuro

Los experimentos realizados conducen a dos resultados: primero, el modelo basado en n -simplex para aproximar la variedad topológica que cubre el dominio D_f de formas válidas permite alcanzar cualquier forma con un desvío promedio de menos de un pixel por hito entre las formas válidas y sus proyecciones a dicha variedad. Segundo, la estrategia de caminata aleatoria propuesta, que utiliza saltos entre subdominios vecinos, permite generar secuencias de movimientos de serpiente realistas y (como consecuencia directa del primer punto) capaces de alcanzar en el proceso cualquier forma válida.

Las características de las formas generadas en la caminata aleatoria dependerán tanto de la dimensión n de la variedad, que determina el número de vértices de cada símplex, como del número k de centroides utilizados como candidatos a vértices de los símplex.

Estas características le permiten al método propuesto generar formas aleatorias que pueden ser utilizadas en procesos de segmentación y clasificación de siluetas vermes. De igual manera, el método de deformación propuesto es capaz de generar formas vermes distintas a las existentes en el cuerpo de entrenamiento.

La distancia entre formas consecutivas en la secuencia de pasos es ajustable con el método propuesto por medio de los parámetros n (dimensión de la variedad topológica) y k (total de conglomerados cuyos centroides constituyen los posibles vértices de los n -símplex). Dichos parámetros controlan además la complejidad total del proceso, para integrar el método en otras estrategias de segmentación y rastreo.

Referencias

- [1] L. F. Arauz Cavallini, A. I. Gómez De Miguel, M. Valverde Díaz, G. Rodríguez Muñoz y E. Mora Monge, "Informe de gestión del sector agropecuario y rural (mayo 2014 – abril 2018)", SEPSA, Costa Rica, inf. téc., abr. de 2018.
- [2] L. Pratt y L. Rivera, "Tendencias en el desarrollo de la agricultura en Centroamérica: Nuevos retos para el Sector Privado y el diseño de políticas públicas", Centro Latinoamericano de Competitividad y Desarrollo Sostenible, CLACDS – INCAE, inf. téc., sep. de 2003.
- [3] A. Suprem, N. Mahalik, and K. Kim, "A review on application of technology systems, standards and interfaces for agriculture and food sector," *Computer Standards & Interfaces*, vol. 35, no. 4, pp. 355-364, 2013.
- [4] A. Tatem, H. Lewis, P. Atkinson, and M. Nixon, "Increasing the spatial resolution of agricultural land cover maps using a hopfield neural network," *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 17, no. 7, p. 647, 2003, issn: 13658816.
- [5] X. Cao, Y. Wei, F. Wen, J. Sun, "Face alignment by explicit shape regression," *International Journal of Computer Vision*, vol. 107, no. 2, pp. 177-190, April 2014, issn: 0920-5691. doi: 10.1007/s11263-013-0667-3. Dirección: <http://link.springer.com/10.1007/s11263-013-0667-3>.
- [6] R. Sparks and A. Madabhushi, "Explicit shape descriptors: Novel morphologic features for histopathology classification," *Medical Image Analysis*, vol. 17, no. 8, pp. 997-1009, Dec. 2013, issn: 1361-8415. doi: 10.1016/J.MEDIA.2013.06.002. Dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136184151300087X>.
- [7] T. F. Cootes, C. J. Taylor, D. H. Cooper, and J. Graham, "Active shape models, their training and application," *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 61, no. 1, pp. 38-59, 1995.
- [8] K.-M. Huang, P. Cosman, and W. R. Schafer, "Automated detection and analysis of foraging behavior in *C. elegans*," in 2008 IEEE Southwest Symposium on Image Analysis and Interpretation, IEEE, 2008, pp. 29-32.
- [9] C. Restif and D. Metaxas, "Tracking the swimming motions of *C. elegans* worms with applications in aging studies," in International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, Springer, 2008, pp. 35-42.
- [10] M. Grüner Monzón, "Active dictionary models: a framework for non-linear shape modeling," master thesis, Electronics Engineering Department, Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, May 2015.
- [11] J. Jiménez Chavarría, "Segnema: nematode segmentation strategy in digital microscopy images using deep learning and shape models," master thesis, Escuela de Ingeniería en Computación, Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, Feb. 2019.
- [12] O. Lindenbaum, J. Stanley, G. Wolf, and S. Krishnaswamy, "Geometry based data generation," in *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2018, págs. 1407-1418.
- [13] S. Nutanong, R. Zhang, E. Tanin, and L. Kulik, "Analysis and evaluation of V*-kNN: An efficient algorithm for moving kNN queries," *The VLDB Journal*, vol. 19, no. 3, pp. 307-332, June 2010.
- [14] B. Szigeti, P. Gleeson, M. Vella, S. Khayrulin, A. Palyanov, J. Hokanson, M. Currie, M. Cantarelli, G. Idili, and S. Larson, "OpenWorm: an open-science approach to modeling *Caenorhabditis elegans*," *Frontiers in Computational Neuroscience*, vol. 8, p. 137, Nov. 2014, issn: 1662-5188. doi: 10.3389/fncom.2014.00137. Address: <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fncom.2014.00137/abstract>.
- [15] R. Sedgewick and K. Wayne, *Algorithms*. Addison-Wesley Professional, 2011.



- [16] C. Garza-Hume, M. C. Jorge, and A. Olvera, "Areas and shapes of planar irregular polygons," in *Forum Geometricorum*, vol. 18, 2018, pp. 17-36.
- [17] K. E. Atkinson, *An Introduction to Numerical Analysis*. John Wiley & Sons, 2008.
- [18] T. A. Foley and G. M. Nielson, "Knot selection for parametric spline interpolation," in *Mathematical Methods in Computer Aided Geometric Design*. Elsevier, 1989, 261-CP4.
- [19] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*. Cambridge University Press, 2004.
- [20] K. Wagstaff, C. Cardie, S. Rogers, and S. Schrödl and colls., "Constrained k-means clustering with background knowledge," in *ICML*, vol. 1, 2001, pp. 577-584.
- [21] W. Woess, "Random walks on infinite graphs and groups, ép.," *Cambridge Tracts in Mathematics*, vol. 138. Cambridge University Press, 2000.[22] M. Muja and D. G. Lowe, "Fast approximate nearest neighbors with automatic algorithm configuration," in *International Conference on Computer Vision Theory and Application VISSAPP'09*, INSTICC Press, 2009, pp. 331-340.
- [23] M. Muja and D. G. Lowe, "Fast matching of binary features," in *2012 Ninth Conference on Computer and Robot Vision*, IEEE, 2012, pp. 404-410.
- [24] P. Dörfler and P. Alvarado-Moya, "Lti-lib – a c++ open source computer vision library," in *Advanced Man-Machine Interaction: Fundamentals and Implementation*, ép. *Signals and Communication Technology*, K. F. Kraiss, Ed., Berlin-Heidelberg: Springer Verlag, 2006, pp. 399-421.
- [25] D. L. Donoho, Y. Tsaig, I. Drori, and J.-L. Starck, "Sparse solution of underdetermined systems of linear equations by stagewise orthogonal matching pursuit," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 58, no. 2, pp. 1094-1121, 2012.

Inventario de gases de efecto invernadero: Distrito central de Puntarenas (Costa Rica)

Inventory of greenhouse gases: Central District of Puntarenas (Costa Rica)

Ariel Porras-Rozas¹, Irene Medina-Mora², Valeria Castillo-Calderón³,
Ana Espinoza-Ocampo⁴

Porras-Rozas, A; Medina-Mora, I; Castillo-Calderón, V; Espinoza-Ocampo, A. Inventario de gases de efecto invernadero: Distrito central de Puntarenas (Costa Rica). *Tecnología en Marcha*. Vol. 33-2. Abril-Junio 2020. Pág 67-78.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v33i2.4333>

Fecha de recepción: 3 de mayo de 2019
Fecha de aprobación: 8 de setiembre de 2019



1 Ingeniero Ambiental. Ambientica Consulting S.A. Costa Rica. Correo electrónico: arozas@ambientica.com.

 <https://orcid.org/0000-0002-3548-1532>

2 Ingeniera Ambiental. Costa Rica. Correo electrónico: ire.93m@gmail.com.

 <https://orcid.org/0000-0002-2369-9542>

3 Ingeniera Ambiental. Ambientica Consulting S.A. Costa Rica. Correo electrónico: vcastillo.amb@gmail.com.

 <https://orcid.org/0000-0001-8442-3817>

4 Lic. Turismo Ecológico. Coordinadora Universidad Técnica Nacional, Sede del Pacífico. Costa Rica. Correo electrónico: aespinoza@utn.ac.cr.

 <https://orcid.org/0000-0001-9221-6527>

Palabras clave

Programa País Carbono Neutralidad 2.0; Puntarenas; Costa Rica; Cambio Climático; Inventario de emisiones; Huella de Carbono; Carbono Neutralidad; Gases de efecto invernadero; Ciudades Sostenibles.

Resumen

En el 2018 el MINAE (Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica) oficializó el PPCN 2.0, en respuesta a la Estrategia Nacional de Cambio Climático. En el distrito central de Puntarenas, la UTN lidera los esfuerzos para la elaboración de los Inventario de gases de efecto invernadero. Para ello se siguió la metodología descrita en el PPCN 2.0; se calcularon las emisiones del transporte y la energía estacionaria (consumo de combustibles fósiles y electricidad), residuos sólidos y aguas residuales. Para obtener la información requerida, se emitieron solicitudes de información a actores claves del distrito y se aplicó una encuesta al sector residencial y al sector comercial e industrial. Se utilizaron además los factores de emisión y potenciales de calentamiento global del IMN. Finalmente, se obtuvieron emisiones de 83618,27 ton CO₂e para el año 2016 y 79053,66 ton CO₂e para el año 2017, donde el mayor aporte es representado por el consumo de combustibles fósiles en la actividad pesquera y el transporte.

Keywords

Carbon Neutrality Country Program 2.0; Puntarenas; Costa Rica; Climate change; Emissions Inventory; Carbon footprint; Greenhouse gases; sustainable cities.

Abstract

In 2018, MINAE (Ministry of Environment and Energy of Costa Rica) made official the Carbon Neutrality Country Program 2.0, for the National Climate Change Strategy. In Puntarenas Central District, UTN leads the efforts for the elaboration of emissions inventories. To get the required information, information requests were sent to key actors in the district and then a poll was applied to the residential, commercial and industrial sector. Emission factors and global warming potential from the IMN was used. The results are the following: in 2016 were emitted 83618.27 ton CO₂e, in 2017 were emitted 79053.66 ton CO₂e, the greatest contribution is represented by the fossil fuels used in the fishing activity and the transport.

Introducción

Desde el año 2013, la Universidad Técnica Nacional de Costa Rica (UTN), lidera los esfuerzos para la elaboración de los Inventarios de Carbono del distrito central de la Provincia de Puntarenas en el marco del proyecto "*Puntarenas hacia la Carbono Neutralidad*". En las ciudades, la información que brindan los inventarios de carbono sirve como base para la toma de decisiones ante el fenómeno del cambio climático, especialmente las ciudades más sensibles al aumento del nivel del mar, como es el caso de Puntarenas [1].

En el mes de setiembre del año 2018, el Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE) oficializó la categoría Cantonal del Programa País Carbono Neutralidad 2.0 (PPCNC 2.0), con el fin de apoyar el cumplimiento de los objetivos de mitigación del país en el contexto de la Estrategia Nacional de Cambio Climático y en respuesta a los compromisos internacionales adquiridos en la Contribución Nacionalmente y el Acuerdo de París [2].

En el caso específico del distrito de Puntarenas, en el presente estudio se describe la realización del Inventario de Gases de Efecto Invernadero (GEI) del distrito, en el cual se reportan las emisiones provenientes del sector energía estacionaria, transporte, residuos, procesos y uso de productos, silvicultura y otros usos de suelo, de acuerdo con lo establecido en el PPCN 2.0. Además, se identifican y priorizan las acciones para la reducción de las emisiones del distrito según los portafolios de medidas de mitigación del programa [3].

Además del distrito Central de Puntarenas, otras 14 ciudades se encuentran contabilizando sus gases de efecto invernadero, entre ellas Osa, Pérez Zeledón, Santa Cruz, Cañas, Nicoya, Oreamuno, Cartago, San Ramón, Goicoechea, Montes de Oca, Parrita, Quepos, San Carlos y Pococí [4].

En el caso particular de Monteverde, los proyectos de reducción elegidos fueron enfocados en el transporte con la “Ruta Eléctrica”, en los residuos orgánicos con el programa “De residuos a compost” y un programa de reforestación con el objetivo de reforestar 37 hectáreas al año [5]. De manera similar, el distrito Central de Puntarenas se encuentra en la búsqueda de proyectos que disminuyan sus emisiones de gases de efecto invernadero.

Metodología

Metodología de cálculo

Se utilizó la metodología establecida por el PPCN 2.0 y sus documentos anexos [3], [6], [7], [8], se identificaron los límites del inventario y se realizó una revisión y selección de las fuentes de emisión, los sectores y el alcance a reportar.

Se aplicaron las claves de notación correspondientes para cada fuente y se recalculó el año base debido a cambios realizados al límite geográfico y en la metodología de cálculo utilizada. Se diseñó además un método de recolección de información de emisiones por sectores y fuentes para así realizar el cálculo de las emisiones utilizando los factores de emisión publicados por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) y el IPCC, posteriormente se evaluó la calidad de los datos utilizados.

Las metodologías de cálculo específicas utilizadas para cada fuente fueron las siguientes:

Sector Transporte y Energía Estacionaria

Cálculo de las emisiones por consumo de combustibles fósiles

Se utilizaron los datos en litros de ventas de diésel 50, gasolina plus y gasolina súper dentro del distrito, suministrados por RECOPE S.A. En el caso del subsector actividad pesquera, INCOPECA brindó los datos de la cantidad de combustible autorizado para las embarcaciones pesqueras en el distrito central de Puntarenas.

En ambos casos, las cifras se multiplicaron por su respectivo factor de emisión (FE) del IMN y el potencial de calentamiento global (PCG) asociado.

Cálculo de las emisiones por consumo de combustible (gasolina y diésel):

Fórmula 1.

$$\text{ton CO}_2 \text{ eq} = \frac{\text{Litros combustible} \times \text{FE combustible}_{\text{CO}_2} \times \text{PCG}_{\text{CO}_2}}{1000} + \frac{\text{Litros combustible} \times \text{FE combustible}_{\text{CH}_4} \times \text{PCG}_{\text{CH}_4}}{1000}$$

+

$$\frac{\text{Litros combustible} \times FE_{\text{combustible}_{N_2O}} \times PCG_{N_2O}}{1000}$$

Cálculo de emisiones por consumo de energía eléctrica

Se solicitó información por tipo de tarifa al Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). Posteriormente se multiplicó el consumo de electricidad total de cada tarifa por el FE correspondiente a uso de energía eléctrica, multiplicando luego por el PCG del CO₂.

Fórmula 2.

$$\text{ton CO}_2 \text{ eq} = \frac{\text{Kilowatt hora consumidos} \times FE_{CO_2} \times PCG_{CO_2}}{1000}$$

Sector residuos

Cálculo de las emisiones por tratamiento de aguas residuales domésticas

Se identificaron tres fuentes de emisión de GEI por tratamiento de aguas residuales (tanques sépticos, planta de tratamiento y vertido directo en cuerpo receptor) por lo que se tomaron datos de la Encuesta Nacional de Hogares, con el fin de determinar la magnitud de la población corresponde a cada tipo de disposición de aguas residuales.

Se estimó la cantidad de habitantes por vivienda, este valor se multiplicó por los datos reportados de viviendas que cuentan con tanque séptico, y las que no cuentan con tratamiento de aguas residuales. Luego, se determinaron los GEI asociados, mediante la fórmula que se muestra a continuación:

Cálculo de las emisiones por tratamiento de aguas residuales domésticas (tanque séptico, descarga a ríos):

Fórmula 3.

ton CO₂ eq =

$$\frac{\text{Cantidad de personas al año}_{\text{tipo disposición}} \times FE_{\text{tipo de disposición}_{CH_4}} \times PCG_{CH_4}}{1000}$$

Cálculo de las emisiones por tratamiento de aguas residuales domésticas en planta de tratamiento:

Se utilizaron los datos del reporte operacional de la planta de tratamiento El Roble para la cuantificación de los kg de DQO/año producidos.

Adicionalmente, se multiplicaron los valores de caudal (L/s) y concentración de DQO (mg/L) reportados para la obtención de los mg/s de DQO producidos en el día en el que se hizo el reporte. Se multiplicaron los kg DQO /día por la cantidad de días cubiertos por cada reporte, finalmente se sumaron los valores obtenidos para obtener los kg DQO/año.

Fórmula 4.

kg DQO/año =

$$Q_1 \times Cn_{DQO1} \times 60s \times 60min \times 24h \times N_{\text{días1}}$$

+

$$\begin{aligned}
 & Q_2 \times Cn_{DQO2} \times 60s \times 60min \times 24h \times N_{días2} \\
 & \quad + \\
 & Q_3 \times Cn_{DQO3} \times 60s \times 60min \times 24h \times N_{días3} \\
 & \quad + \\
 & Q_4 \times Cn_{DQO4} \times 60s \times 60min \times 24h \times N_{días4}
 \end{aligned}$$

Donde,

Q: Caudal (L/s) de cada reporte

Cn_{DQO}: Concentración de DQO (mg/L) de cada reporte

N_{días}: Número de días que cubre cada reporte operacional

Nota: La suma de los N_{días}, debe ser de 365 días, que corresponde a los días de un año completo.

En el caso de la PTAR El Roble, fue necesario calcular el FE correspondiente, ya que este factor depende del tipo de planta de tratamiento que se tiene, para ello se utilizó la siguiente fórmula:

Fórmula 5.

$$FE = B_0 \times MCF$$

Donde,

B₀: Capacidad máxima de producción de CH₄ (kg CH₄/kg DQO)

MCF: Factor corrector para el metano (fracción)

Para la determinación de las toneladas de CO₂ equivalente, se multiplicó la sumatoria de los datos de kg DQO obtenidos para cada mes por el FE y el PCG respectivo para cada caso, como se muestra a continuación:

Fórmula 6.

$$\text{ton CO}_2 \text{ eq} = \frac{\text{Cantidad de personas al año} \times FE_{PTAR_{CH_4}} \times PCG_{CH_4}}{1000}$$

Cálculo de las emisiones por disposición de residuos sólidos en relleno sanitario:

Se utilizaron datos de toneladas de residuos sólidos (RS) dispuestos en relleno sanitario por mes, durante el 2016 y 2017. La Municipalidad de Puntarenas posee información sobre la cantidad total recolectada en varios distritos, por lo que, se realizaron los cálculos pertinentes para obtener la generación de residuos sólidos solo del distrito central de Puntarenas. A continuación, se detalla la fórmula utilizada:

Fórmula 7.

$$kgRS_{DCP} = \frac{TonRS * 1000}{Población total} \times Población proyectada_{DCP}$$

Donde,

DCP: Distrito central de Puntarenas

La sumatoria de los kilogramos de residuos sólidos dispuestos en el relleno sanitario, se multiplicó por el FE y el PCG correspondientes para la estimación de los GEI emitidos por la disposición de residuos sólidos ordinarios en relleno sanitario.

Fórmula 8.

$$\text{ton } CO_2 \text{ eq} = \frac{\text{kg RS/año} \times \text{FE relenos sanitarios}_{CH_4} \times \text{PCG}_{CH_4}}{1000}$$

Cálculo de las emisiones por compostaje de residuos sólidos:

Se realizó una encuesta dirigida al sector residencial, comercial e industrial del distrito de Puntarenas. Utilizando el número de hogares habitados en el distrito central de Puntarenas y el número de empresas existentes en el área de interés, se estimó la cantidad de hogares y comercios que compostan residuos empleando una regla de 3, como se muestra a continuación:

Fórmula 9.

Estimación de cantidad de hog/emp que composta =

$$\frac{\text{Cantidad de encuestados que composta}}{\text{Total de encuestados}} \times \text{Total de hog/emp en el distrito}$$

Los datos obtenidos corresponden al año 2018 ya que en este año se aplicó la encuesta, sin embargo, se tomaron en cuenta en los inventarios de los años 2016 y 2017.

Sector Agricultura, Silvicultura y Usos de Suelo

De acuerdo con el INEC, existen 5 fincas en el distrito central de Puntarenas. Estas fincas se dedican al cultivo de caña de azúcar como actividad primaria y teca como actividad secundaria, no hay información sobre actividades ganaderas.

Metodología de recopilación de información

Se emitieron un total de 7 solicitudes de información, a los siguientes actores clave: Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE), Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), Instituto costarricense de pesca y acuicultura (INCOPECA), Instituto costarricense de acueductos y alcantarillados (AyA), Instituto costarricense de estadística y censo (INEC), Ministerio de Salud y Municipalidad de Puntarenas.

Además, se realizó una encuesta dirigida a hogares, comercios e industrias existentes en el distrito central de Puntarenas.

Metodología de priorización de medidas de mitigación

Tiempo atrás se tenía identificado la restauración del manglar del distrito como un posible proyecto de mitigación de emisiones, sin embargo, no se analizó la viabilidad de dicho proyecto. En noviembre del 2018, la UTN llevó a cabo III Encuentro de Gobiernos Locales Costeros al cual asistieron estudiantes de la UTN, el gestor ambiental de la Municipalidad de Puntarenas, representantes de INCOPECA, el decano de la Sede del Pacífico de la UTN, el Ministerio de Salud, además vecinos de la comunidad. En dicho encuentro se presentaron las medidas de mitigación propuestas por el Dirección de Cambio Climático del MINAE para el sector residuos y los sectores movilidad eléctrica y sostenible (Ver cuadro 1).

Posterior a la presentación de cada una de las propuestas, los asistentes al encuentro colaboraron en la priorización de estas, ya que, al ser actores locales son fuente ideal de información para priorizar iniciativas de reducción que son factibles y realistas para implementar en el distrito. Las propuestas fueron analizadas utilizando los criterios de evaluación técnicos, económicos y ambientales establecidos en el portafolio de medidas de mitigación del PPCN 2.0, se estableció una escala del 1 al 3 para puntuar la viabilidad de la medida en cada uno de los criterios.

Cuadro 1. Medidas de mitigación por sector [3]

Residuos Sólidos	Movilidad Sostenible	Movilidad Eléctrica
<ul style="list-style-type: none"> - Compostaje de Residuos orgánicos. - Modernización de vehículos de recolección. - Optimización de rutas de recolección de residuos. <p>Incineración.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Rellenos Sanitarios con aprovechamiento de gas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Construcción de ciclovías - Bicicletas públicas. - Instalación de parqueos de bicicletas. - Ciudad caminable (aceras) - Circuitos, rutas o cadenas accesibles. - Paradas que promueven el uso del transporte público. - Rutas, calles o bulevares peatonales. - Gestión de parqueos. - Desaceleración de centros urbanos. - Plan de movilidad cantonal. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sustitución de motocicletas - Sustitución de flota liviana. - Sustitución de SUVs o pickups. - Sustitución de camiones de basura. - Sustitución de flota especial. - Buses eléctricos en rutas turísticas. - Tranvía. - Recarga de vehículos eléctricos como servicio. - Requisitos de puntos de recarga para nuevas edificaciones. - Servicio de carros eléctricos compartidos. - Servicio de bicicletas eléctricas compartidas.

Factores de emisión y potencial de calentamiento global

Se utilizaron los factores de emisión de GEI calculados por el IMN en 2018 (Ver cuadro 3). En el subsector transporte, se hizo uso de los factores de emisión reportados para la gasolina y diésel como combustible. Para los factores de emisión asociados al CH₄ y al N₂O, se utilizaron los valores asociados a las fuentes: Residencial y agrícola, y Transporte terrestre, ya que son los que mejor representan las actividades que se llevan a cabo en el distrito central de Puntarenas. En cuanto al subsector energía eléctrica se empleó el FE correspondiente al año para el cual se hizo el cálculo de las toneladas de CO₂ equivalentes asociadas al consumo eléctrico.

En el sector de desechos, se emplearon los FE identificados para la disposición de residuos sólidos en relleno sanitario. Para el subsector correspondiente a aguas residuales domésticas se emplearon los valores reportados para el tratamiento de aguas residuales en tanque séptico y descarga directa a ríos. Los valores utilizados para cada fuente identificada, y sus respectivas unidades se muestran a continuación. De igual manera los potenciales de calentamiento global empleados fueron tomados del Instituto Meteorológico Nacional.

Cuadro 2. Potenciales de calentamiento global.

PCG			Fuente
CO2	CH4	N2O	
1,00	21,00	310,00	[9]

Cuadro 3. Factores de emisión utilizados [9].

Fuentes	UNIDAD	Factor			Fuente	
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O		
Sector energía estacionaria y transporte						
Gasolina (Transporte y energía estacionaria)	kg/L	2,231	0,0003460	0,0000221	[9]	
Diésel (Residencial y Agrícola)	kg/L	2,613	0,0003820	0,0000244		
Gasolina (Transporte terrestre con catalizador)	kg/L	2,231	0,000907	0,000283		
Diésel (Transporte terrestre con catalizador)	kg/L	2,613	0,000419	0,000154		
Búnker (Residencial y Agrícola)	kg/L	3,10	0,0004330	0,0000277		
LPG (Residencial y Agrícola)	kg/L	1,61	0,0001390	0,0000027		
Uso de electricidad (2016)	kg/kWh	0,0557				
Uso de electricidad (2017)	kg/kWh	0,0754				
Sector desechos						
Residuos sólidos ordinarios (Relleno Sanitario)	kg/kg RS		0,0581		[10]	
Compost	kg/kg RS		0,004	0,0003		
Biodigestores	kg/kg RS		0,002			
Agua residual doméstica (Tanque séptico)	kg/persona/año		4,38			
Agua residual doméstica (PTAR El Roble)	kg/persona/año		0,18		[9]	
Agua residual doméstica (Descarga a ríos)	kg/persona/año		0,88			
Agua residual industrial	kg/kg DQO					
Sector Agricultura, Silvicultura y otros Usos de la Tierra						
Fermentación entérica						
Terneros	kg/cabeza año		16,81			
Hembras en crecimiento	kg/cabeza año		41,91			
Machos en crecimiento	kg/cabeza año		70,16			
Hembra adulta	kg/cabeza año		85,67			
Macho adulto	kg/cabeza año		111,7			
Búfalos	kg/cabeza año		55			
Ovejas	kg/cabeza año		5			
Cabras	kg/cabeza año		5			
Caballos	kg/cabeza año		18			
Cerdos	kg/cabeza año		1			
Manejo de estiércol						
Ganado	kg/cabeza año		1			
Caballos	kg/cabeza año		1,64			
Cabras	kg/cabeza año		0,17			
Cerdos	kg/cabeza año		1			
Aves de Corral	kg/cabeza año		0,02			

Continúa...

Continuación

Fuentes	UNIDAD	Factor			Fuente
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
Usos de suelo					
Aplicación de Cal dolomita	kg /ton	476,66			[11]
Aplicación de Urea	kg /ton	733,33			
N ₂ O suelos gestionados (Fertilizantes)	kg/ kgN			0,01	
Cultivo de arroz	kg/ha/día		4,94		

Siglas y abreviaturas:

RS: Residuos sólidos

ARD: Agua residual doméstica

ARI: Agua residual industrial

Resultados y discusión

En el presente inventario se excluyeron fuentes de GEI que según el PPCNC 2.0, son de reporte obligatorio, y que ocurren dentro o fuera de los límites del inventario, esto se debe a la dificultad actual de las instituciones del Estado para brindar información.

Se diseñaron dos encuestas; para obtener una confiabilidad del 90% en los resultados de estas, en el sector residencial se aplicó en 66 hogares y en el sector comercial e industrial a 62 comercios/industrias.

El distrito central de Puntarenas cuenta con una huella de carbono total de 83618,27 ton CO₂e para el año 2016 y 79053,66 ton CO₂e para el año 2017, esto para las emisiones clasificadas como de alcance 1 y 2.

Como se observa en la figura 1, en el 2016 el mayor porcentaje de emisión de CO₂e correspondió al consumo de diésel en la actividad pesquera, ya que de acuerdo a los datos de INCOPECA las embarcaciones trabajan en su gran mayoría a base de diésel. El segundo puesto en cuanto al aporte de emisiones de CO₂e, también corresponde al consumo diésel, pero en el sector transporte. Asimismo, las emisiones que le siguen en magnitud a las mencionadas anteriormente corresponden al consumo de gasolina en la actividad pesquera y en el sector transporte.

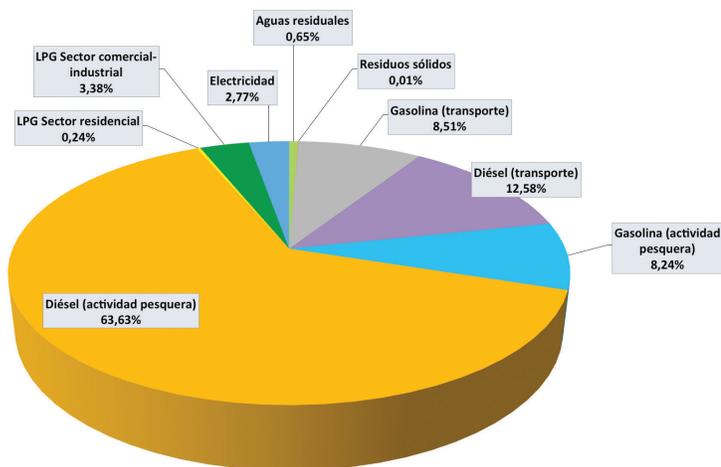


Figura 1. Distribución porcentual de las toneladas de CO₂ equivalente, 2016.

En cuanto a las emisiones en el 2017, si bien hubo una reducción del 2,86% respecto al 2016 (4564,61 CO₂e), posee una distribución similar de GEI. En la figura 2 se puede observar que, el consumo de diésel y gasolina en la actividad pesquera y en el sector transporte continúan siendo las mayores fuentes de emisiones de CO₂ para el año 2017.

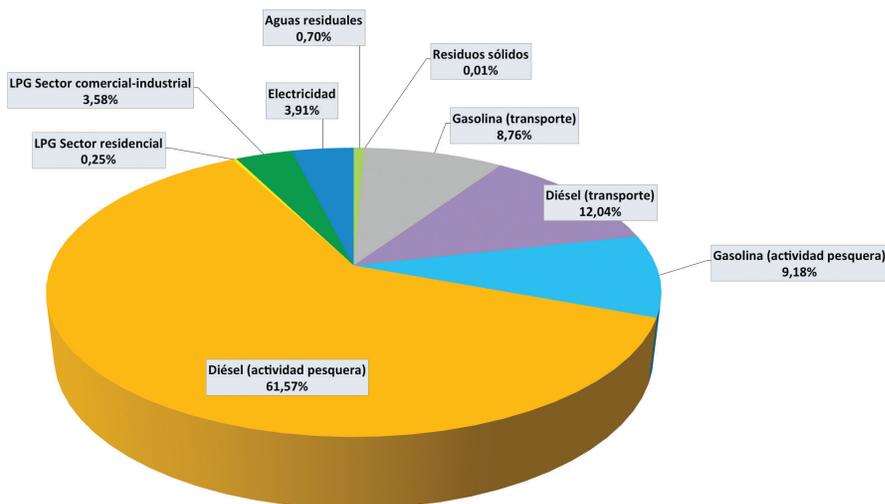


Figura 2. Distribución porcentual de las toneladas de CO₂ equivalente 2017.

El consumo de diésel y gasolina del sector transporte y la actividad pesquera, en conjunto representan el 92,96% y 91,55% de las emisiones para el 2016 y 2017 respectivamente, es decir, para ambos años corresponden a la mayor fuente de emisión de GEI.

En conjunto, las emisiones por residuos sólidos, aguas residuales y consumo LPG y electricidad representan el restante 7,04% del total de las emisiones de GEI para el año 2016 y el 8,45% para el año 2017. Sin embargo, por falta de datos, no se consideraron las aguas residuales tratadas en las PTAR privadas que funcionan dentro de los límites del distrito, por lo que se espera que, en inventarios posteriores, aumente el porcentaje de emisiones correspondiente a las aguas residuales al tomar en cuenta esta fuente de emisión.

En las figuras 3 y 4 se observa que, en ambos años, el CO₂ representa más del 98% del total de las emisiones de GEI.

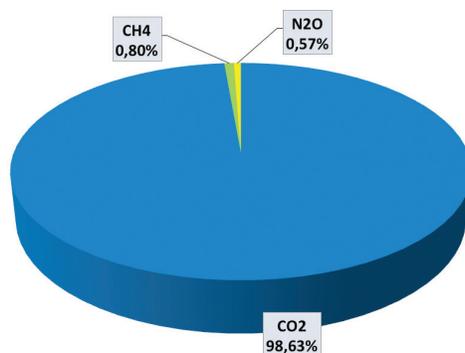


Figura 3. Distribución porcentual de los gases de GEI 2016.

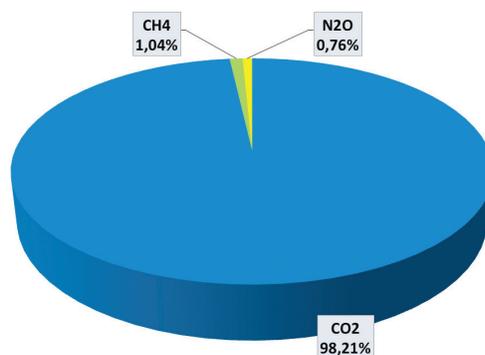


Figura 4. Distribución porcentual de los gases de GEI 2017.

En cuanto a las medidas de reducción de la huella de carbono del distrito, se eligieron las 4 que obtuvieron un mayor puntaje por parte de los participantes del III Encuentro de Gobiernos Locales Costeros, por su viabilidad técnica, económica, y ambiental, las cuales fueron: paradas que promuevan uso de transporte público, optimización de las rutas de recolección de residuos, compostaje de residuos orgánicos, donde el subproducto es tierra orgánica y sustitución de la flota liviana municipal por vehículos eléctricos. Estos resultados serán utilizados por la Comisión Intersectorial del Cambio Climático, para ser implementadas en el año 2019 y así avanzar con paso firme hacia la carbono neutralidad.

Conclusiones

- Las emisiones para el distrito central de Puntarenas en 2016 corresponden a 83618,27 toneladas CO₂e.
- Las emisiones para el distrito central de Puntarenas en 2016 corresponden a 79053,66 toneladas CO₂e.
- La actividad pesquera representa la mayor fuente de emisión de GEI en ambos años.
- Más del 90% de las emisiones de GEI del distrito central de Puntarenas, corresponden al consumo de combustibles fósiles en la actividad pesquera y sector transporte.
- Más del 98% de los GEI emitidos corresponden a CO₂.
- Como medidas de reducción de la huella de carbono, mediante criterios técnicos, económicos y ambientales se eligieron las iniciativas: Paradas que promuevan uso de transporte público, optimización de las rutas de recolección de residuos, Compostaje de residuos orgánicos, donde el subproducto es tierra orgánica y la Sustitución de la flota liviana municipal por vehículos eléctricos.
- Existen actores clave que no aportan información necesaria para la cuantificación de fuentes de GEI que fueron identificadas dentro del alcance del inventario.

Referencias

- [1] Dirección de Cambio Climático, «Política Nacional de Adaptación al Cambio Climático,» San José, 2018.
- [2] Naciones Unidas, «Acuerdo de París,» París, 2015.
- [3] Dirección de Cambio Climático, «Portafolio de Acciones de Mitigación de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero a Escala Cantonal de Costa Rica. Tema: Movilidad Sostenible. Tema: Movilidad Eléctrica. Tema: Gestión de los residuos.,» San José., 2018.

- [4] S. Rodríguez, «Ojo al clima,» 2 Julio 2019. [En línea]. Available: <https://ojoalclima.com/estos-son-los-14-cantones-que-haran-inventario-de-sus-emisiones/>. [Último acceso: Diciembre 2019].
- [5] Consejo de Distrito Monte Verde, «Inventario de Gases de Efecto Invernadero y Plan de Acción para la Reducción de Emisiones de GEI,» Monte Verde, 2018.
- [6] Dirección de Cambio Climático, «Programa País Carbono Neutralidad 2.0 Categoría Cantonal,» San José, 2018.
- [7] Dirección de Cambio Climático, «Portafolio de acciones de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a escala cantonal de Costa Rica.,» San José, 2018.
- [8] Dirección de Cambio Climático, «Metodología para la medición, reporte y verificación de las emisiones, reducciones, remociones y compensaciones de GEI a nivel cantonal para Costa Rica,» San José.
- [9] Instituto Meteorológico Nacional, «Factores de emisión gases efecto invernadero,» San José, 2018.
- [10] Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, «IPCC,» 2006. [En línea]. Available: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/5_Volume5/V5_6_Ch6_Wastewater.pdf. [Último acceso: 10 2019].
- [11] Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, «IPCC,» 2006. [En línea]. Available: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/4_Volume4/V4_11_Ch11_N2O&CO2.pdf. [Último acceso: 10 2019].
- [12] C. A. Ríos y J. F. Rincón, «CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO DEL PROCESO DE COSECHA DE CAÑA DE AZÚCAR,» Cali, 2014.
- [13] IPCC, «Pautas IPCC 2006 para inventarios nacionales de gases de efecto invernadero,» 2006.
- [14] RECOPE, «Manual de productos,» 2018.

Homologación de Procedimientos Técnicos para la Evaluación de Fuentes Fijas bajo los Requisitos del punto 5 de la NMX-EC-17025-IMNC-2006

Homologation of Technical Procedures for the Evaluation of Fixed Sources under the Requirements Of Point 5 of the NMX-EC-17025-IMNC-2006

María Concepción Martínez-Rodríguez¹,
Lorena Elizabeth Campos-Villegas², Jaime Ivan Sánchez-Quiroz³

Martínez-Rodríguez, M.C; Campos-Villegas, L; Sánchez-Quiroz, J. Homologación de Procedimientos Técnicos para la Evaluación de Fuentes Fijas bajo los Requisitos del punto 5 de la NMX-EC-17025-IMNC-2006. *Tecnología en Marcha*. Vol. 33-2. Abril-Junio 2020. Pág 79-90.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v33i2.4336>

Fecha de recepción: 4 de mayo de 2019
Fecha de aprobación: 1 de setiembre de 2019



- 1 Profesora investigadora del Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo del Instituto Politécnico Nacional. México.
Correos electrónicos: mcmartinezr@ipn.mx; mconcepcionmr@yahoo.com.mx.
- 2 Profesora Investigadora del Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo del Instituto Politécnico Nacional. México.
Correo electrónico: lor_ca2003@yahoo.com.mx
- 3 Instituto Politécnico Nacional. México.
Correo electrónico: jaime.ivan.sanchez@gmail.com

Palabras clave

Normalización; Norma Mexicana; documentación técnica; fuentes fijas.

Resumen

Todo país industrializado o en vías de desarrollo cuenta con infinidad de procesos industriales, de máquinas, sistemas y aplicaciones que utilizan la combustión. La contaminación atmosférica representa un impacto ambiental no deseado, que se genera en las plantas productivas y en los procesos industriales, motivo por el cual se le han dedicado equipos, instalaciones y métodos de gestión para evitarla o intentar controlarla dentro de determinados límites. La Normatividad Mexicana especifica los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera en función de cada tipo de actividad y equipo (NOM-085-SEMARNAT-2011 y NOM-043-SEMARNAT-1993). La metodología radicará en la investigación documental con el propósito de homologar la documentación y procedimientos basados en la esquematización de la Norma Mexicana (NMX) y en los requisitos del personal, instalaciones, métodos, equipos, la trazabilidad, muestreo, control y aseguramiento de la calidad que se establecen en los mismos métodos de ensayo.

Keywords

Standardization; Mexican Standard; technical documentation; fixed sources.

Abstract

Every industrialized or developing country has countless industrial processes, machines, systems and applications that use combustion. Air pollution represents an unwanted environmental impact, which is generated in production plants and industrial processes, so it has been dedicated equipment, facilities and management methods to avoid or try to control it within certain limits. The Mexican Regulations specify the maximum permissible emission levels to the atmosphere depending on each type of activity and equipment (NOM-085-SEMARNAT-2011 and NOM-043-SEMARNAT-1993). The methodology will be based on documentary research with the purpose of standardizing the documentation and procedures based on the schematization of the Mexican Standard (NMX) and on the requirements of personnel, facilities, methods, equipment, traceability, sampling, control and assurance of the quality that are established in the same test methods.

Introducción

La evaluación de las fuentes fijas forma parte del ciclo de prevención-control-mitigación y debe efectuarse de forma responsable, siempre realizada por personal técnico calificado, con equipos y protocolos validados, que permitan proveer de resultados metrológicamente confiables y con trazabilidad hacia el Sistema Internacional de Unidades (SI) [1].

La normalización tiene como objetivo elaborar especificaciones y requisitos técnicos, los cuales se ponen bajo la disposición de organizaciones públicas y privadas para mejorar la calidad y la seguridad de cualquier producto o actividad tecnológica, científica, industrial o de servicios, por lo que la adecuación y homologación de los criterios técnicos se muestra como principal variable de ingreso al proceso de normalización. La homologación de procedimientos y métodos de ensayo facilita la certificación con base a la reglamentación técnica necesaria. Ha sido utilizada en diversos campos de aplicación, uno de los campos más importantes es el relacionado con el control de alimentos. Como un ejemplo de caso práctico de homologación

se tiene el reportado por el Instituto de Prospectiva Tecnológica de la UE [2], en el cual declaran como intención principal el apoyo hacia el control de alimentos garantizando que los Estados dispongan de herramientas prácticas para implementar y mejorar reglamentaciones.

Actualmente los procesos de producción en serie, así como ciertos servicios, demandan la obtención de energía calorífica mediante la reacción exotérmica de una gran variedad de combustibles fósiles y alternativos. Las fuentes fijas generadoras de emisiones son plantas industriales o de servicios estacionarias que presentan emisiones de contaminantes y subproductos de la combustión a través de chimeneas o ductos de venteo [3], este tipo de fuentes emiten gases de efecto invernadero como dióxido de carbono, monóxido de carbono, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, óxidos metálicos y materiales particulados líquidos y sólidos, dichas emisiones contaminantes no son susceptibles a un confinamiento debido a las características físico-químicas de la matriz en la que se emiten, pero sí pueden ser sometidas a procesos de control antes de ser lanzadas a la atmósfera. Para que los ensayos de cuantificación de la emisión de contaminantes a la atmósfera sean reconocidos por las dependencias federales o por las dependencias de estados o municipios, los resultados deben de ser emitidos por laboratorios de ensayo acreditados; por consecuencia estos últimos deben demostrar mediante evidencia objetiva que cumplen con los requisitos establecidos en la normativa vigente y con las políticas del organismo acreditador.

El objetivo de este trabajo propone homologar la documentación técnica y de trabajo para la evaluación de fuentes fijas aplicable a laboratorios en fase de acreditación o en proceso de renovación, para satisfacer el punto 5 “Requisitos técnicos” de la NMX-EC-17025-IMNC-2006[4], dado que la norma mexicana presenta una total concordancia con la norma internacional ISO/IEC17025:2005. Los puntos de la NMX a considerar para llevar a cabo la homologación son los siguientes:

- 5.2 Personal
- 5.3 Instalaciones y condiciones ambientales
- 5.4 Métodos de ensayo y validación
- 5.5 Equipos
- 5.6 Trazabilidad de la medición
- 5.7 Muestreo
- 5.8 Manipulación de los ítems de ensayo
- 5.9 Aseguramiento de la calidad

La homologación y la documentación apropiada de procedimientos y requisitos técnicamente aptos, otorga al cliente y al proveedor de servicios de ensayo la certeza de que los trabajos de muestreo y análisis se apegan a métodos validados y reconocidos, los cuales, al aplicarse, derivan en la calidad metrológica del resultado emitido. Un resultado de calidad dota de información certera y confiable al cliente, lo que permite un eficaz control de los compuestos contaminantes emitidos a la atmósfera, promoviendo la oportuna implementación de acciones para incrementar la eficiencia térmica de los sistemas de combustión y también contribuyen a evitar el desequilibrio ecológico de la región.

La acreditación, un proceso técnico riguroso en los laboratorios, surge con la finalidad de dar confiabilidad y certeza a los trabajos analíticos mediante la aplicación de políticas, medidas de control y aseguramiento de la calidad y el cumplimiento de ciertos requisitos conciliados a nivel internacional. La homologación y conciliación de los procedimientos técnicos repercute directamente sobre la figura de la acreditación.

A pesar de que la mayor parte del ensayo, o medición de emisiones en fuentes fijas es considerado un trabajo de muestreo y debe de demostrarse el cumplimiento del punto 5.7 de la NMX-EC-17025-IMNC-2006 (muestreo), también debe de evidenciarse a profundidad el cumplimiento de los puntos 5.4 (Métodos de ensayo y validación) y 5.6. (Trazabilidad de la medición), ya que son elementos que requieren un arduo trabajo de homologación.

Debido a las características de la matriz gaseosa, la geometría del ducto, el diseño de chimeneas y ductos de venteo y la velocidad del flujo de los gases, se asume que las concentraciones de los contaminantes varían de punto a punto y de momento a momento.

En la actualidad, la Normatividad Mexicana carece de elementos que establezcan las directrices para la realización de muestreos representativos en fuentes fijas. Su ausencia afecta directamente la representatividad del muestreo (porcentaje de isocinetismo punto a punto), con lo que se compromete la veracidad y la calidad de los resultados emitidos por los laboratorios y lo que en consecuencia provoca la problemática sobre la eficacia de los controles de contaminantes atmosféricos. La propuesta de un esquema de adecuación y homologación técnica que contemple las normas NMX-AA-009-SCFI-1993[5], NMX-AA-010-SCFI-2001[6], NMX-AA-035-SCFI-1976[7] y NMX-AA-054-SCFI-1978[8] para el tratamiento matemático de datos, sería clave como medida de control ambiental y una garantía de la calidad en los resultados.

Instrumentos legales concernientes a la evaluación de Partículas Suspendidas Totales (PST) en Fuentes Fijas

Actualmente, la Zona Metropolitana del Valle de México cuenta con 43 Laboratorios acreditados en la rama de Fuentes Fijas ante la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA), de los 43 Laboratorios sólo 37 se encuentran dentro del Padrón de Laboratorios Ambientales, reconocido por la Secretaría del Medio Ambiente del DF [9]. La realización exitosa de un muestreo en chimeneas, o ductos de ventilación, involucra el uso correcto de los diversos componentes de los equipos, el seguimiento de protocolos y procedimientos de medición y la revisión de los parámetros de aseguramiento de la calidad para que los resultados sean trazables [10] y comparables con los límites máximos permisibles o con estudios realizados por cualquier otro laboratorio.

El muestreo en fuente comparado con métodos de estimación y balances de materia brinda la ventaja de ofrecer valores reales y no aproximaciones. La utilización de técnicas de muestreo en campo requiere de la aplicación de procedimientos de muestreo estandarizados, equipo de medición específico y personal calificado [11].

La regulación de actividades comerciales, técnicas de servicio y productivas en México se lleva a cabo por medio de las siguientes actividades [12]:

- Evaluación del estado de la normalización nacional e internacional
- Adopción o adaptación de normas técnicas internacionales
- Elaboración, estructuración y presentación de normas técnicas
- Constitución, integración, organización y administración de comités, organismos y grupos de trabajo de normalización
- Estudio y evaluación de los beneficios los costos y el impacto regulatorio de la aplicación de normas técnicas
- Uso o aplicación voluntaria de normas
- Aplicación u observancia obligatoria de normas y regulaciones.

La acreditación se define como el procedimiento mediante el cual un organismo autorizado, a través de procedimientos preestablecidos y utilizando tanto la normatividad internacional como la nacional, reconoce formalmente la competencia de una organización, o un laboratorio, para la realización de una determinada actividad de evaluación de la conformidad, en donde cada uno de los procedimientos son elaborados de acuerdo a criterios establecidos en normas o guías técnicas específicas [13].

Requisitos técnicos para demostrar la competencia de los laboratorios de ensayo

Para un laboratorio, es fundamental que el personal con el que cuenta tenga establecidas actividades y responsabilidades y cuente con un perfil adecuado para el desarrollo de su puesto. Como principales herramientas para el desarrollo de sus actividades, el laboratorio debe de contar con los equipos y materiales requeridos y especificados en los métodos. Estos son de carácter fundamental, puesto que su ausencia, modificación o desviación afecta radicalmente las tareas del laboratorio. La cadena de trazabilidad es un punto importante a considerar dentro de la calibración de los equipos, puesto que a partir de ésta es posible brindar resultados trazables hacia el Sistema Internacional de unidades.

El sistema de gestión de calidad bajo los requisitos de la NMX-EC-17025-IMNC-2006

Este estudio tiene como alcance la homologación conforme a los requisitos técnicos estipulados en el punto 5 de la norma NMX-EC-17025-IMNC-2006, que son los siguientes: personal, instalaciones y condiciones ambientales, métodos de ensayo y validación, equipos, trazabilidad de la medición, muestreo, manipulación de los ítems de ensayo y finalmente aseguramiento de la calidad.

Para los laboratorios de ensayo o calibración, la única forma de demostrar el desarrollo e implementación de un sistema de gestión de la calidad bajo ISO/IEC 17025[14], es el cumplimiento de los requisitos técnicos y administrativos, pero en gran medida la base de la acreditación de los laboratorios viene determinada por el desarrollo correcto y confiable de los ensayos efectuados, lo cual está plenamente descrito y establecido en la sección de requisitos técnicos de la norma NMX-EC-17025-IMNC-2006. El grado de contribución de estos requisitos se ve reflejado notablemente en la estimación de la incertidumbre asociada a la medición, la cual difiere de ensayo a ensayo y es característica de cada laboratorio. De los requisitos técnicos estipulados en la norma, los relacionados con los factores humanos, instalaciones, condiciones ambientales, métodos de prueba, equipo de medición y manejo de ítems de ensayo son los que mantienen un mayor carácter de contribución sobre los resultados del ensayo.

Con fines de la evaluación de la información, la norma NMX-EC-17025-IMNC-2006 se ha analizado de forma sistemática con base en dos aspectos; primero se evalúa el punto de la norma con base en su criticidad sobre el resultado de la medición, se manejan tres valores de criticidad: alta, media o baja; el segundo aspecto evalúa la pertinencia de la inclusión de la información técnica en documentos normativos (inclusión en NOM, NMX o guía técnica).

Requisitos para el personal relacionado con la evaluación de fuentes fijas (requisito 5.2)

El personal es la variable humana que afecta la confiabilidad del desarrollo de un método analítico. La evaluación del desempeño del personal operativo se encuentra ligada al punto de validación de métodos y se definirá con base en el mapeo de actividades y responsabilidades. El personal relacionado con la evaluación de fuentes fijas debe de cumplir con ciertos requisitos

establecidos en un perfil (formación, habilidades, experiencia, conocimientos) con la finalidad de demostrar y asegurar su competencia durante las actividades del muestreo y del análisis de los ítems de ensayo. Además, ha de ser físicamente capaz de llevar a cabo las tareas que exija su puesto [15].

Características de las condiciones ambientales e instalaciones para el ensayo (requisito 5.3)

De acuerdo al alcance de este trabajo, la evaluación de fuentes fijas bajo el método de ensayo establecido en la NMX-AA-010-SCFI-2001, se efectúa en dos etapas: Trabajo de muestreo en campo y Trabajo analítico en el laboratorio.

Las condiciones ambientales e instalaciones durante la primera etapa son prácticamente únicas de cada fuente fija y de cada trabajo de muestreo, por lo tanto, no son susceptibles al control del laboratorio, sin embargo, el laboratorio y el personal deben de tomar precauciones y actuar conforme a lo estipulado en sus procedimientos generales de trabajo.

Cómo ejemplos no limitativos se encuentran los ambientes corrosivos, los ambientes con presencia de contaminantes en forma de aerosoles o nieblas ajenas a la fuente en estudio, la presencia de elementos particulados y las condiciones de humedad relativa extrema.

En contraparte, las instalaciones y las condiciones ambientales en la etapa de trabajo analítico en el laboratorio son totalmente atribuibles a la organización.

Las condiciones ambientales del laboratorio pueden influir de forma directa e indirecta sobre el proceso del ensayo en laboratorio y su efecto puede comprometer la calidad de los resultados analíticos e inclusive puede invalidar los resultados. Un control adecuado de las variables del medio es importante para el bienestar del personal, el funcionamiento de los instrumentos y cuestiones básicas de seguridad en el trabajo [15].

Requisitos de equipos para la evaluación de fuentes fijas (requisito 5.5)

Los equipos de medición y de apoyo forman parte medular de la estructura de un laboratorio, motivo por el cual el laboratorio debe de estar provisto con todos los equipos para llevar a cabo las operaciones de muestreo y ensayo. Las cuestiones de mantenimiento, uso, calibración, adquisición y adicionales deben de llevarse a cabo de una forma regulada por el sistema de control de la calidad estipulado por el mismo laboratorio.

Los métodos de ensayo en cuestión se encuentran establecidos en las normas mexicanas siguientes:

- **NMX-AA-010-SCFI-2001:** Determinación de partículas en los gases que fluyen por un conducto.
- **NMX-009-SCFI-1993:** Determinación de flujo de gases en un conducto.
- **NMX-054-SCFI-1978:** Determinación de humedad en los gases que fluyen por un conducto.
- **NMX-054-SCFI-1978:** Determinación de la concentración de bióxido de carbono, monóxido de carbono y oxígeno en los gases que fluyen por un conducto.

Trazabilidad de las mediciones (requisito 5.6)

La trazabilidad metrológica es la propiedad de un resultado de medida por la cual el resultado puede relacionarse con referencia a una cadena ininterrumpida y documentada de calibraciones. La trazabilidad es fundamental para que los resultados de las mediciones sean comparables a cualquier tiempo y lugar. Demostrar la cadena de trazabilidad no es un asunto sencillo, dentro de la administración del laboratorio debe de existir un elemento humano capaz de interpretar los datos proporcionados en los informes de calibración.

Método isocinético para determinar la concentración de partículas suspendidas totales

Los métodos de prueba son la parte medular de un laboratorio de ensayos, en el caso de los métodos de prueba para la evaluación de fuentes fijas también incluyen aspectos relacionados con el muestreo, manejo, transporte, almacenamiento, preparación y disposición de los ítems de ensayo. Dada su importancia, los métodos de ensayo establecidos en las NMX y referenciados en las NOM deben de acatarse y seguir inequívocamente por los laboratorios las instrucciones y no es válida ninguna desviación.

Es importante que los laboratorios de ensayo empleen métodos de ensayo que satisfagan las necesidades de sus clientes, por tal motivo es primordial que los métodos utilizados sean de las versiones vigentes y actualizadas; en caso de que el cliente no especifique los métodos a utilizar durante el ensayo, el laboratorio tiene la posibilidad de seleccionar los métodos más apropiados para realizar esta labor.

Repercusión de la homologación de procedimientos sobre la tarea de muestreo

Un laboratorio de ensayo requiere de métodos de medición que ofrezcan resultados válidos, para así demostrar su competencia técnica considerando elementos importantes como los equipos, los analistas y las condiciones medioambientales durante el desarrollo del ensayo. Los métodos normalizados, como las NMX aplicables al monitoreo de emisiones atmosféricas, son métodos que para demostrar su inclusión a la normativa fueron previamente validados.

Propuesta para el manejo matemático de datos experimentales

El manejo matemático de los datos afecta directamente la realización del muestreo. La correcta interpretación y uso de las variables físicas durante el momento del estudio contribuirán a alcanzar una mayor representatividad en el muestreo.

De acuerdo a la NMX-AA-010-SCFI-2001, el muestreo preliminar se maneja como obligatorio con la finalidad de obtener la información básica que debe de utilizarse en el muestreo definitivo y a través del preliminar es preciso obtener las variables [6] fracción húmeda preliminar, temperatura, presión estática, análisis de gases, peso molecular, velocidad promedio, tamaño de la boquilla y factor K promedio del preliminar.

Concluido el monitoreo definitivo en la fuente fija, es necesario llevar a cabo el tratamiento matemático de datos, para llegar al resultado final del ensayo (promedio de dos muestreos definitivos), que es expresado como la concentración de la emisión de partículas suspendidas totales expresada a condiciones normales de presión y temperatura y base seca. El siguiente tratamiento matemático se propone como un elemento base sencillo, directo y de unificación de los mecanismos establecidos en las normas previamente señaladas, en el cual de una manera ordenada se plantean las ecuaciones desarrolladas con toda la obtención de las variables de cálculo para la emisión del resultado de ensayo.

En la figura 1 se desglosa el método de obtención de cada variable involucrada en el cálculo final de la concentración de partículas muestreadas. Es preciso proceder con la determinación de la concentración de partículas a partir del peso de las mismas y del volumen colectado expresado en condiciones normales.

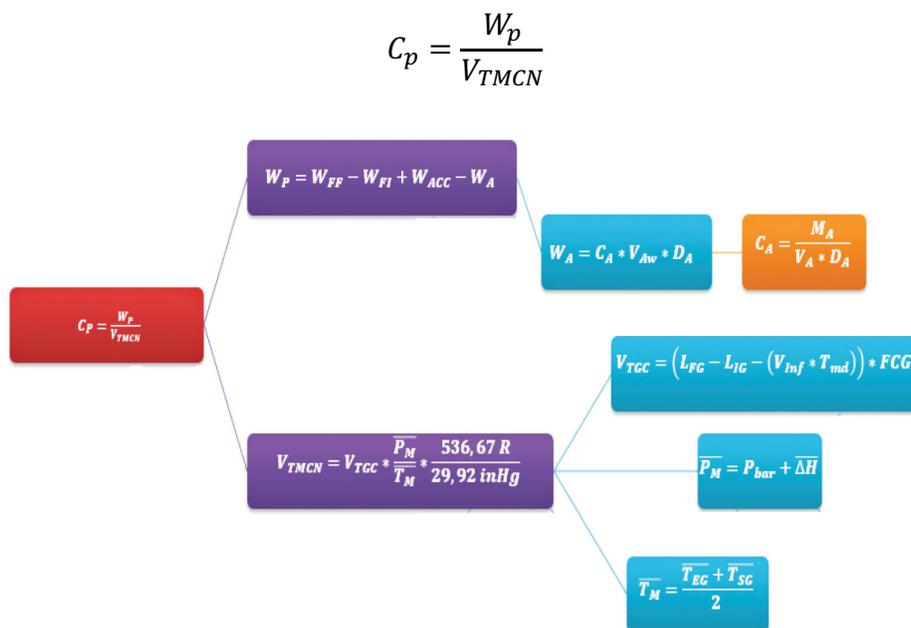


Figura 1. Secuencia de ecuaciones para la obtención de la concentración de partículas.

Donde:

- C_p :Concentración de partículas a condiciones normales [mg/m^3]
- W_p :Peso de partículas [mg]
- V_{TMCN} :Volumen total muestreado a condiciones normales [m^3]

Para el cálculo, es importante obtener el peso de partículas colectadas en el medio filtrante y accesorios, puesto que las partículas se colectan en el filtro; sin embargo, es preciso también recuperar las partículas que pueden quedar adheridas al equipo de muestreo, para lo cual es de suma importancia obtener el peso de los residuos de evaporación de la acetona, debido a que, en la NMX se señala que se tiene que restar este peso y basados en el método 5 de la EPA [16], es posible usar este procedimiento para el cálculo de dicha variable, aunado a esto se complementa con el procedimiento para realizar el ensayo del Blanco de acetona descrito en la NMX-AA-010-SCFI-2001.

El siguiente paso fundamental es efectuar el cálculo del isocinetismo; dado que de éste depende la representatividad del muestreo en la fuente fija. El principio de isocinetismo es la relación que se da entre el volumen muestreado con el gasómetro seco de la consola y el volumen teórico muestreado a partir de un método indirecto que emplea como variables de ingreso la velocidad de los gases que fluyen por un conducto, el área transversal de la boquilla de muestreo y el tiempo total expresado en segundos del muestreo definitivo, en donde los rangos aceptables de isocinetismo están comprendidos entre el 90% y el 110% en promedio para aceptar los resultados del ensayo [17].

Para la estimación de la fracción húmeda y seca de los gases que fluyen por un conducto es necesario sustituir los valores de variables intermedias como lo son la presión manométrica en el medidor de flujo previamente calculada y la temperatura media de operación del medidor de flujo.

Estimación de la incertidumbre asociada a la medición en la determinación de PST

Una medición tiene el propósito de determinar, el valor de una magnitud, llamada mensurando que de acuerdo al Vocabulario Internacional de Metrología (VIM) [18], es el atributo sujeto a medición de un fenómeno, cuerpo o sustancia que puede ser distinguido cualitativamente y determinado cuantitativamente. Así mismo todas las mediciones tienen una incertidumbre asociada que puede deberse a los factores siguientes[19]: la naturaleza de la magnitud que se mide, el instrumento de medición, el operario y las condiciones externas. Cada uno de estos factores constituye por separado una fuente de incertidumbre y contribuye en mayor o menor grado a la incertidumbre total de la medida.

En principio, es posible clasificar las fuentes de incertidumbres en dos conjuntos bien diferenciados:

Errores accidentales o aleatorios que aparecen cuando mediciones repetidas de la misma variable dan valores diferentes, con igual probabilidad de estar por arriba o por debajo del valor real.

Errores sistemáticos que son una desviación constante de todas las medidas, ya sea siempre hacia arriba o siempre hacia abajo del valor real.

En todo caso es importante mencionar que la estimación de la incertidumbre es un proceso que depende en gran medida de la infraestructura del laboratorio, del nivel de conocimientos metroológicos del analista, pero sobre todo del tratamiento numérico y estadístico que sufran los datos del análisis.

Resultados

Para la implementación y mejora de la documentación al interior de los laboratorios ambientales con alcance en el monitoreo de fuentes fijas, en el presente trabajo se han diseñado diversas aportaciones, que facilitan cumplir los requisitos de la NMX-EC-17025-IMNC-2006, concentran información valiosa dado que se agrupan conforme a su nivel de criticidad y a su vez esto permite monitorear la efectividad y representatividad del muestreo en todo momento. En la determinación de PST, la secuencia del tratamiento de datos experimentales, es fundamental el flujo, peso molecular y contenido de humedad en los gases que fluyen por un conducto.

La propuesta de adecuación de tratamiento de datos experimentales y estimación de incertidumbre, en el cuadro I, es de un informe de resultados de la evaluación real en campo para una fuente fija (extractor de aire). Con la presentación de un resumen de resultados (Cuadro I) se avanza considerablemente en el cumplimiento de la función principal de un laboratorio de ensayo, que es la provisión de resultados organizados, trazables, confiables y válidos.

Los resultados de la investigación son apreciables en cuanto a la sistematización del método, el manejo de equipo y el personal, los tres grandes rubros a considerar por un laboratorio de ensayo.

En relación al método, la expresión del peso molecular por el producto de la concentración de CO_2 , O_2 , CO y N_2 con sus respectivos pesos moleculares y la fracción de gas seco (FGS), más el resultado de multiplicar por 18 (Peso Molecular del agua), por la fracción húmeda de los gases, se adecuó para evitar emplear la composición de los gases expresada en porcentaje y emplear la concentración como cmol/mol , conforme a lo establecido en el SI como punto para unificar el criterio.

Cuadro 1. Tabla de resultados experimentales para una fuente fija (extractor de aire).

	Primer definitivo		Segundo definitivo		Unidad	Primer definitivo		Segundo definitivo		Unidad
	Valor		Valor			Valor		Valor		
Volumen total corregido a condiciones de Gasómetro	39.2134		38.9073		ft ³	1.1104		1.1017		m ³
Presión manométrica promedio	23.0907		23.0905		in-Hg	78197.5126		78196.6825		pa
Temperatura promedio a condiciones de gasómetro	552.4167		553.0000		R	306.8981		307.2222		K
Fracción húmeda	0.002434		0.001311		adimensional					
Porcentaje de humedad	0.243433		0.131139		adimensional					
Incertidumbre del porcentaje de humedad	± 0.019093		± 0.019054		adimensional					
Fracción seca	0.9976		0.9987		adimensional					
Porcentaje seco	99.7566		99.8689		adimensional					
Peso molecular base húmeda	28.8096		28.8218		lb/lbmol					
Incertidumbre Peso molecular base húmeda	± 0.5692		± 0.5696		lb/lbmol					
Peso molecular base seca	28.8360		28.8360		lb/lbmol					
Presión en chimenea	23.0599		23.0599		in-Hg	78093.1361		78093.1361		pa
Velocidad promedio de los gases que fluyen por la chimenea	27.4484		27.6620		ft/s	8.3663		8.4314		m/s
Volumen total muestreado a condiciones de chimenea	39.3320		39.0100		ft ³	1.1138		1.1046		m ³
Volumen total muestreado por la boquilla	39.2665		39.5721		ft ³	1.1119		1.1206		m ³
Porcentaje de isocinétismo	100.1668		98.5797		adimensional					
Volumen total muestreado a condiciones normales	29.4721		29.1780		ft ³	0.8346		0.8262		m ³
Peso de partículas colectadas en el medio filtrante y accesorios	0.0180		0.0137		gr					
Concentración de partículas a condiciones normales	21.5682		16.5813		mg/m ³					
Incertidumbre de concentración de partículas a condiciones normales	± 1.3617		± 1.3574		mg/m ³					
Gasto volumétrico total muestreado a condiciones normales	0.0116		0.0115		m ³ /min					
Emisión de partículas por unidad de tiempo	0.2500		0.1903		mg/min	1.5000E-04		1.1417E-04		kg/h
Gasto volumétrico total a condiciones de chimenea	100.4538		101.2356		ft ³ /s	2.8445		2.8667		m ³ /s
Incertidumbre de Gasto volumétrico total a condiciones de chimenea	+ 1.0323		+ 1.0398		ft ³ /s	+ 0.0292		+ 0.0294		m ³ /s
Gasto volumétrico total en chimenea a condiciones normales	127.8878		128.6501		m ³ /min					
Gasto volumétrico total en chimenea a condiciones normales y base seca	127.5835		128.4865		m ³ /min					
Nivel máximo permisible de emisión	394.0699		392.9044		mg/m ³					
Factor de emisión	0.0547		0.0422		adimensional					

En la propuesta se ha verificado la uniformidad dimensional y se ha propuesto una nomenclatura de literales claras y perfectamente definidas. Debido a que en el mercado nacional se distribuyen ampliamente equipos de origen diverso diseñados para otorgar mediciones en el sistema inglés, se decidió desarrollar la secuencia observando tanto en el sistema inglés como en el SI. Para facilitar la tarea de comprensión de las ecuaciones involucradas se estableció en el tratamiento de datos, un cambio de nomenclatura con respecto a la norma que facilitará la tarea de identificación de variables.

En la adecuación del tratamiento matemático de datos experimentales y en el ajuste de los procedimientos técnicos, con relación al método, se pueden resumir de tal forma que los mismos demuestren con objetividad el cumplimiento de los requisitos de la norma NMX-EC-17025-IMNC-2006.

Conclusiones

Mediante la aplicación de las aportaciones concentradas en este trabajo y el cumplimiento cabal de los requisitos técnicos de la NMX-EC-17025-IMNC-2006, se puede inferir que las mediciones efectuadas aumentan su calidad metrológica y cumplen con los criterios de trazabilidad y de estimación de la incertidumbre. Ambos procesos se han definido históricamente por los laboratorios de ensayo como elementos complejos de cumplir.

El objetivo de homologación de la documentación técnica y de trabajo para la evaluación de fuentes fijas de acuerdo a los requisitos técnicos del punto 5.2 al 5.9 de la NMX-EC-17025-IMNC-2006, se cumplió vía la recopilación y clasificación de la información; la cual se hizo a partir de las publicaciones relacionadas con tópicos de metrología, normalización, validación y tratamiento estadístico de datos.

Los requisitos técnicos relacionados con la trazabilidad de la medición y con la estimación de la incertidumbre son complejos de observar por los laboratorios de ensayo y su cumplimiento es objeto de continuos debates entre los laboratorios y los organismos de acreditación.

Es importante no considerar la estimación de la incertidumbre como un requisito de bajo nivel de contribución; al contrario, a partir de sus variables intermedias es preciso determinar el desempeño de todos y cada uno de los elementos que intervienen en la realización de un ensayo.

La presencia de las fuentes fijas en el ramo industrial y de servicios es de vital importancia, motivo por el cual su desaparición a mediano o largo plazo no es factible.

Tecnológicamente han evolucionado hacia sistemas energéticos más limpios que substituyen progresivamente al uso de combustibles fósiles; sin embargo, las emisiones a la atmósfera deben seguir siendo monitoreadas y cuantificadas para la implementación de medidas locales y políticas públicas, que permitan mantener los niveles de la calidad del aire en condiciones ambientalmente favorables, con ello se cuida uno de los principales problemas de la humanidad que es la salud pública.

Referencias

- [1] Talavera M., & Pezet, F. "Trazabilidad en las mediciones de masa". Memorias. Simposio de Metrología, Centro Nacional de Metrología. Querétaro, México. 2002.
- [2] Anklam, E., & Gilbert, J. "Mejora de la Protección de los consumidores: Apoyo al control de alimentos". The IPTS Report (30), 1998.
- [3] INE-SEMARNAT. "Segundo Informe Nacional de Emisiones y Transferencia de Contaminantes 1998-1999". Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Informe. DF, México, 2001, pp. 135.

- [4] IMNC. Norma Mexicana NMX-EC-17025-IMNC-2006. "Requisitos Generales para la Competencia de los Laboratorios de Ensayo y de Calibración". Instituto Mexicano de Normalización y Certificación. *Diario Oficial de la Federación*. Julio 2006.
- [5] SECOFI. Norma Mexicana NMX-AA-009-1993-SCFI, "Contaminación Atmosférica-Fuentes Fijas-Determinación de Flujo de Gases en un Conducto por medio de Tubo de Pitot". Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. *Diario Oficial de la Federación*. Diciembre 1993.
- [6] DGN. Norma Mexicana NMX-AA-010-SCFI-2001. "Contaminación Atmosférica- Fuentes Fijas- Determinación de la emisión de partículas contenidas en los gases que fluyen por un conducto-Método Isocinético". Dirección General de Normas. *Diario Oficial de la Federación*. Abril 2004. DOI: CDU 677.2
- [7] DGN. Norma Mexicana NMX-AA-035-1976. "Determinación de bióxido de Carbono, Monóxido de Carbono y Oxígeno en los Gases de Combustión". Dirección General de Normas. *Diario Oficial de la Federación*. Junio 10, 1976.
- [8] DGN. Norma Mexicana NMX-AA-054-1978. "Contaminación Atmosférica - Determinación del contenido de humedad en los gases que fluyen por un conducto - Método gravimétrico". Dirección General de Normas. *Diario Oficial de la Federación*. Noviembre 1992.
- [9] SMA DF. "En Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México". Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal. Inventario. DF, México, 2008, pp. 147.
- [10] MinAmbiente. "Protocolo para el Control y Vigilancia de la Contaminación Atmosférica Generada por Fuentes Fijas". Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Protocolo. Bogotá, Colombia, 2010, pp. 99.
- [11] INE-SEMARNAT. "Guía metodológica para la estimación de emisiones de fuentes fijas". Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Guía. DF, México, 2013, pp. 146.
- [12] Armenta, M. "Propuesta de un procedimiento de auditoría interna para el sistema de gestión de calidad del laboratorio de ensayos normalizados mecánicos de la UPIICSA". Tesis de Maestría. Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas, IPN, DF, México, 2007, pp. 189.
- [13] Hernández, A., Fabela, M. d., & Martínez, M. "Sistemas de Calidad y Acreditación Aplicados a Laboratorios de Prueba". Instituto Mexicano del Transporte. Querétaro, México, 2001, pp. 72.
- [14] EMA. "Criterios de aplicación de la norma NMX-EC-17025-IMNC-2006 MP-FE005-10. Entidad Mexicana de Acreditación". Manual de procedimientos, México, 2013, pp. 51.
- [15] FAO. "Manuales para el Control de Calidad de los Alimentos". 14: La Garantía de la Calidad en el Laboratorio Químico de Control de los Alimentos. Food and Agriculture Organization for the United Nations. Manual. Roma, Italia, 1996, pp. 152.
- [16] US EPA (2017a). Method 5 — Determination of Particulate Matter Emissions from Stationary Sources. United States Environmental Protection Agency [en línea]. https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-08/documents/method_5.pdf
- [17] US EPA (2017b). Method 2 — Determination of Stack Gas Velocity and Volumetric Flow Rate (Type S Pitot Tube). United States Environmental Protection Agency [en línea]. https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-08/documents/method_5.pdf
- [18] BIPM. "International Vocabulary of Fundamental and General Terms in Metrology". Bureau International des Poids et Mesures. Francia, 1993, pp. 108.
- [19] Álvarez Ramos, M., & Acuña Campa, H. "Introducción al estudio de las mediciones. En: Manual de Laboratorio de Mecánica y Fluidos". Universidad de Sonora, Sonora, México, 2005, pp. 1-19.

Estimación de Heterosis y Heterobeltiosis en Híbridos Interpoblacionales de Tomate de Cáscara (*Physalis Ixocarpa Brot.*)

Estimation of Heterosis and Heterobeltiosis in Interpoblational Hybrids of Husk Tomato (*Physalis ixocarpa Brot.*)

Neymar Camposeco-Montejo¹, Valentín Robledo-Torres²,
Antonio Flores-Naveda³

Camposeco-Montejo, N; Robledo-Torres, V; Flores-Naveda, A. Estimación de Heterosis y Heterobeltiosis en Híbridos Interpoblacionales de Tomate de Cáscara (*Physalis Ixocarpa Brot.*). *Tecnología en Marcha*. Vol. 33-2. Abril-Junio 2020. Pág 91-101.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v33i2.4339>

Fecha de recepción: 25 de mayo de 2019
Fecha de aprobación: 17 de setiembre de 2019



- 1 Profesor investigador del Departamento de Fitomejoramiento de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México. Correos electrónicos: neym_33k@hotmail.com, naveda26@hotmail.com. Autor de correspondencia.  <https://orcid.org/0000-0003-0638-2452>
- 2 Profesor investigador del departamento de Horticultura de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México. Correo electrónico: robledo3031@gmail.com.
- 3 Profesor investigador del Departamento de Fitomejoramiento de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México. Correo electrónico: naveda26@hotmail.com

Palabras clave

Physalis ixocarpa Brot.; mejoramiento genético; efectos genéticos; cruzamientos; hibridación interpoblacional.

Resumen

El objetivo de la investigación fue evaluar los progenitores y sus cruza, y estimar la heterosis y la heterobeltiosis en híbridos de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot). Los progenitores fueron UAN CC-S2 (1), un genotipo de *Physalis angulata* (2), UAN CP-S2 (3), Gran Esmeralda (4), UAN CJ-S2 (5), Rendidora (6) y UAN 133-05 (7). Los cruzamientos planta a planta fueron en invernadero, en otoño-invierno de 2012; la evaluación de cruza y progenitores se realizó en el municipio de General Cepeda, Coahuila, México, en primavera-verano de 2013, bajo un diseño de bloques al azar con tres repeticiones. En cuanto a rendimiento, la cruza más rendidora fue 3*4, con rendimientos de 47.19 t.ha⁻¹, heterosis de 35.93% y heterobeltiosis de 20.85%; sin embargo, la cruza 1*6 presentó valores mayores de heterosis y heterobeltiosis, 117.91 y 117.62% respectivamente. Para número de frutos por planta, la cruza 7*3 mostró los valores de heterosis y heterobeltiosis mayores, 109.19 y 89.96% respectivamente. En cuanto a peso promedio del fruto, diámetro ecuatorial del fruto y diámetro polar del fruto, la mejor cruza fue la 3*4, que presentó heterosis de 41.17, 11.40 y 12.56% y heterobeltiosis de 37.99, 9.26 y 12.03% respectivamente, si bien la cruza 1*5 mostró valores de 115.91% de heterosis y 107.83% de heterobeltiosis en peso promedio del fruto. Entre las poblaciones estudiadas existe divergencia genética, puesto que presentaron altos valores de heterosis; además, los efectos maternos influyeron de forma significativa en las variables en estudio, indicando la mejor dirección de la cruza.

Keywords

Physalis ixocarpa Brot.; genetic improvement; genetic effects; crosses; interpopulation hybridation.

Abstract

The objective of the investigation was to evaluate progenitors and their crosses, and to estimate heterosis and heterobeltiosis in hybrid of husk tomato (*Physalis ixocarpa* Brot). The progenitors were UAN CC-S2 (1), a genotype of *Physalis angulata* (2), UAN CP-S2 (3), Gran Esmeralda (4), UAN CJ-S2 (5), Rendidora (6), and UAN 133- 05 (7). The crosses, plant to plant, were done under greenhouse conditions in autumn-winter of 2012; the evaluation of the crosses and the parents were done in the municipality of General Cepeda, Coahuila, Mexico, in the spring-summer of 2013, under a randomized block design with three repetitions. In yield, the best cross was 3*4, with yields of 47.19 t.ha⁻¹, heterosis of 35.93%, and heterobeltiosis of 20.85%; however the 1*6 cross presented the highest values of heterosis and heterobeltiosis, 117.91 and 117.62% respectively; in number of fruits per plant, crosses 7*3 showed the highest values of heterosis and heterobeltiosis, 109.19 and 89.96% respectively; in terms of average fruit weight, equatorial diameter of fruit, and polar diameter of fruit, the best cross was the 3*4, that presented heterosis of 41.17, 11.40, and 12.56%, and heterobeltiosis of 37.99, 9.26, and 12.03%, respectively, although cross 1*5 values of heterosis and heterobeltiosis in average weight were 115.91 and 107.83% respectively. Among the populations studied there is genetic divergence, since they presented high values of heterosis; in addition, the maternal effects significantly influenced the variables under study, indicating the best direction of the cross.

Introducción

El tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) en México actualmente ocupa el quinto lugar en superficie sembrada entre las hortalizas, con más de 43 000 hectáreas cultivadas, con una producción de 773 350 toneladas y un valor comercial de 3515 millones de pesos. Los estados que más aportan en la producción son Sinaloa, Puebla, Jalisco, Guanajuato, Michoacán y Nayarit [1], aunque esta se distribuye en todos los estados de la República Mexicana, desde los 10 hasta los 2600 m.s.n.m. y crece en forma silvestre, cultivada y domesticada. Esta amplia variabilidad geográfica es consecuencia de que México es el centro de origen, por lo que existen amplia distribución y diversidad genética, que pueden ser útiles en los programas de mejoramiento genético [2]. En México el tomate verde se propaga principalmente con semilla de variedades criollas, aunque el uso de variedades mejoradas e híbridos va en aumento debido a las mejoras en el rendimiento,

El mejoramiento genético del tomate de cáscara se basa principalmente en selección masal, selección familiar de medios hermanos y selección combinada de medios hermanos, ya que la producción de líneas puras para generar híbridos está muy restringida [2], debido a que es una planta alógama obligada porque presenta autoincompatibilidad gametofítica [3] [4]. En tomate de cáscara existe una amplia diversidad genética, por lo tanto, diversidad en cuanto a formas, color, tamaño y tolerancia a factores adversos, por lo que es una fuente de germoplasma valiosa y presenta un largo camino por recorrer en el mejoramiento genético. Los rendimientos promedios de tomate de cáscara en 2012, en condiciones de campo abierto, fueron de 14.36 t.ha⁻¹, mientras que en 2017 fueron de 18.07 t.ha⁻¹, con un incremento de 25% en los últimos 5 años [1], lo que se debe a las innovaciones en la prácticas y técnicas de cultivo y al incremento en el uso de variedades mejoradas; sin embargo se consideran bajos en relación con rendimientos experimentales de hasta 47 t.ha⁻¹. Los bajos rendimientos pueden ser resultado de la falta de conocimiento respecto a ciertas variables y al todavía limitado uso de variedades mejoradas, además del uso de variedades poco adaptadas a las diferentes zonas y regiones de cultivo. Surge entonces la necesidad de trabajar en el mejoramiento genético de la especie, a fin de contribuir en el desarrollo de genotipos con potencial de rendimiento que supere los alcances medios de las variedades más rendidoras que se cultivan actualmente [5].

A pesar de que las variedades mejoradas de tomate de cáscara tienen mejores características agronómicas y son de mayor rendimiento que las nativas [6], la demanda creciente del mercado, requiere de nuevos materiales mejorados y con mayores rendimientos, como son los híbridos intervarietales, que en maíz rinden más que las variedades mejoradas [7] [8], principalmente los de cruce simple de líneas endogámicas [9]. En tomate de cáscara ha sido posible obtener híbridos sobresalientes cruzando progenitores derivados de variedades de las razas Puebla y Rendidora, pues entre estas razas se ha encontrado la mayor heterosis y se han obtenido híbridos planta a planta que superan al mejor progenitor [10] [11] [12]. Además, en cruces intervarietales de tomate de cáscara se han obtenido incrementos en el rendimiento de fruto de 14.3% [10], 40.6% [12] y hasta 138.7% en el primer corte [11]. Sin embargo, como la autoincompatibilidad gametofítica que existe en tomate de cáscara impide la formación de líneas endogámicas para hibridación clásica, en esta investigación se planteó como objetivo, la formación y evaluación de híbridos interpoblacionales de tomate de cáscara por cruce simple planta a planta, así como la estimación de su heterosis y heterobeltiosis, para determinar el potencial genético de los materiales seleccionados como parentales.

Materiales y métodos

El material genético que se utilizó en esta investigación fue proporcionado por el Departamento de Horticultura de la Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”, y es el resultado de colectas

realizadas en diferentes regiones de México y varios ciclos de selección, material como UAN CC-S2 (1), un genotipo de *Physalis angulata* (2), UAN CP-S2 (3), la variedad Gran Esmeralda (4), UAN CJ-S2 (5), la variedad Rendidora (6) y UAN 133-05 (7). Este material genético se utilizó para realizar las cruzas directas y recíprocas; sin embargo, no fue posible obtener todas las combinaciones, debido a problemas de compatibilidad entre progenitores y solo se obtuvieron 26 híbridos interpopulacionales.

Para la formación de los híbridos, los progenitores se sembraron en charolas de poliestireno de 200 cavidades; se usó como sustrato de germinación *Peat moss* + perlita, a razón de 80/20 %, y 35 días después de la siembra. Se trasplantaron 10 plántulas por genotipo en invernadero durante el ciclo otoño-invierno de 2012, en camas elevadas de 25 cm, con una distancia entre camas de 1.80 m. y entre plantas, de 60 cm. Las plantas se cultivaron bajo los procedimientos estándar del cultivo. Cuando se inició la floración, se realizaron las cruzas de forma manual planta a planta, a fin de obtener la mayor cantidad de semilla; las polinizaciones se realizaron diariamente de 9:00 a.m. a 12:00 p.m., tomando polen del genotipo que fungía como macho y colocándolo en el estigma de la flor de las plantas utilizadas como hembra. Estas fueron polinizadas nuevamente al siguiente día (las plantas utilizadas como progenitores son totalmente autoincompatibles, por lo tanto, las plantas hembras no requieren de emasculación). Cuando los frutos (F1) resultantes de las cruzas alcanzaron su madurez fisiológica, se cortaron y almacenaron de 10 a 15 días a la sombra y a temperatura ambiente, para favorecer la madurez de las semillas; luego se procedió a la extracción de la semilla. Estas se secaron a la sombra y a temperatura ambiente por siete días consecutivos y se conservaron en sobres de papel hasta su posterior evaluación.

La siembra de la semilla híbrida fue realizada de la misma forma que la de los progenitores. La evaluación de los progenitores e híbridos resultantes de las cruzas realizadas, se llevó a cabo en el ciclo primavera-verano de 2013 en la localidad de General Cepeda, Coahuila, México, ubicada a 25° 22' 45'' N y 101° 27' 18' O a una altitud de 1465 m.s.n.m. Las plántulas se trasplantaron a camas de cultivo, con acolchado plástico de color negro, con riego por goteo, a una distancia de 1.80 m entre camas, a doble hilera de plantas por cama, en forma de tresbolillo y a 60 cm entre plantas, lo que resultó en un total de 18 515 plantas por hectárea. Se determinó un arreglo experimental de bloques al azar con 3 repeticiones, una repetición por tratamiento y cada uno constituido por 12 plantas, y como parcela útil 8 plantas al centro de la parcela y con competencia completa para reducir el efecto de orilla. La fertilización total del cultivo fue de 180-120-240 kg.ha⁻¹. Para la prevención y control de plagas (mosca blanca, diabrotica y gusano del fruto), se realizaron aplicaciones semanales de metamidofos 48%, cipermetrina 21%, lambda cyalotrina 5% y dimetoato 38%, a razón de 1 ml.L⁻¹, rotando los productos, hasta 10 días antes de la primera cosecha; después de cada cosecha se realizó una aplicación de cipermetrina 21% + lambda cyalotrina 5%.

El primer corte se hizo a los 63 días después del trasplante y posteriormente se realizaron tres cortes de fruto con intervalos de 15 días. El rendimiento total de fruto (RTF, t.ha⁻¹), se estimó con el peso total de frutos por planta cuantificado con una balanza de precisión modelo TS 1352Q37 marca SARTORIUS y expresado en kg.planta⁻¹. El peso promedio de fruto (PPF) se calculó dividiendo el peso total de frutos por planta entre el número total de frutos de la planta, mientras que el diámetro polar y ecuatorial de fruto (DEF y DPF) se estimó tomando al azar cuatro frutos por planta, utilizando para ello un vernier digital marca Autotec®. El contenido de sólidos solubles totales (SST) se determinó en los mismos frutos seleccionados al azar, para medir DEF y DPF; la estimación de sólidos solubles totales (SST) se hizo con un refractómetro de precisión marca Carl Zeiss® modelo 114280.

La estimación de heterosis se realizó mediante la fórmula siguiente, en porcentaje:

$$\text{Heterosis} = \frac{F1 - (P1 + P2) / 2}{(P1 + P2) / 2} * 100$$

Donde

F1= híbrido de la primera cruza

P1= progenitor uno

P2= progenitor dos

La estimación de heterobeltiosis se realizó mediante la fórmula siguiente, en porcentaje:

$$\text{Heterobeltiosis} = \frac{F1 - MP}{MP} * 100$$

Donde

F1= híbrido de la primera cruza

MP= el mejor progenitor

Resultados y discusión

El análisis de varianza para rendimiento total de fruto, número de frutos por planta y peso promedio de fruto muestra diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$) entre cruza y progenitores (cuadro 1), lo cual coincide con lo encontrado por Sahagún *et ál* [11], quienes reportaron diferencias estadísticas altamente significativas en dichas variables. En las variables diámetro ecuatorial de fruto (DEF), diámetro polar de fruto (DPF) y sólidos solubles totales (SST) solo se presentaron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) (cuadro 1); resultados similares encontraron Santiaguillo *et ál* [12] y Peña *et ál* [10] para los caracteres mencionados, excepto para contenido de SST.

Cuadro 1. Cuadrados medios de seis caracteres estimados en genotipos (cruzas y progenitores) de tomate de cáscara, estudiados en General Cepeda, Coahuila, México

Fuentes de variación	Grados de libertad	Cuadrados Medios					
		RTF (t.ha ⁻¹)	NFP	PPF (gr)	DEF (cm)	DPF (cm)	SST °brix
Genotipos	32	206.1 **	732.16 **	484.0 **	1.35 *	0.61 *	0.32 *
Bloques	2	63.18 *	1034.72 *	77.28 *	0.06 NS	0.03 NS	0.26 NS
Error	64	26.27	166.66	25.93	0.04	0.02	0.13
CV (%)		20.02	25.46	15.74	4.57	4.43	6.03

**= significativo ($P \leq 0.01$), * = significativo ($P \leq 0.05$), NS = no significativo, RTF= rendimiento total de fruto, NFP= número de frutos por planta, PPF= peso promedio de frutos, DEF=diámetro ecuatorial de fruto, DPF= diámetro polar de fruto, SST= sólidos solubles totales, CV= coeficiente de variación

La comparación de medias de los progenitores y cruza (cuadro 2) muestra que la cruza más rendidora, aunque estadísticamente igual al híbrido Gran esmeralda, fue la 3*4, con un rendimiento comercial promedio de 47.19 t.ha⁻¹, superando con 8.14 t.ha⁻¹ al mejor progenitor

de la cruce, y un valor de heterosis de 35.93 % (cuadro 3), y de heterobeltiosis de 20.85 % (cuadro 4); de igual forma, en esta cruce se presentaron valores de heterosis y heterobeltiosis positivos en las variables PPF, DPF, DEF y SST, excepto en NFP, donde se presentó una heterobeltiosis negativa de -8.25%. Las cruces 1*6, 3*1, 1*4, 4*3, 4*7, 7*6, 7*5, 4*5 tuvieron rendimientos comerciales promedios entre 30.51 y 38.01, superando el rendimiento medio nacional en más del 112%, y mostraron valores de heteróticos de 117.91, 42.90, 20.72, 1.57, 9.9, 75.67, 102.08 y 17.66 % (cuadro 3) y heterobeltiosis de 117.62, 12.41, -12.71, -9.7, -20.35, 75.24, 74.23 y -21.86 % respectivamente (cuadro 4). Las cruces 1*6 y 7*5 mostraron los más altos valores de heterosis; sin embargo, solo las cruces 1*6, 3*1, 7*5 y 7*6, presentaron rendimientos superiores a 30 t.ha⁻¹ y valores heteróticos, positivos. Resultados similares fueron reportados por Santiaguillo *et ál* [12], con incrementos en rendimiento de hasta un 40.6% respecto a su mejor progenitor, en la cruce de la variedad Verde Puebla * CHF1 Chapingo, mientras que Sahagún *et ál* [11] encontraron incrementos de 138.7% en rendimiento en el primer corte, en la variedad Salamanca*Rendidora. Por su parte Peña *et ál* [10] indicaron un 14.3% de incremento en rendimiento respecto al mejor progenitor en CHF-1 Chapingo * Verde Puebla. En la presente investigación el progenitor Rendidora presentó rendimientos de 17.46 t.ha⁻¹; sin embargo, fue superado por Gran Esmeralda en 126% que fue el mejor progenitor, mientras que el mejor híbrido superó a la variedad Rendidora en 170% y en 20% a Gran Esmeralda; este híbrido superó a la variedad Rendidora en todos los componentes del rendimiento de fruto evaluados, a pesar de que la variedad Rendidora a lo largo de los años se ha mantenido como un genotipo sobresaliente (cuadro 3). La cruce 7*5 presentó el mayor número de frutos por planta, con 100.33, superando a su mejor progenitor, con 47.51 frutos y los valores de heterosis y heterobeltiosis fueron de 109.19 y 89.96% respectivamente, valores significativamente superiores a los reportados por Peña *et ál* [10], quienes señalaron una heterosis media de 10.42% para las cruces en este carácter. Los fenómenos de heterosis observados son consecuencia de efectos genéticos de dominancia y de aptitud combinatoria general en la expresión de estos caracteres [13] [10], además de que en jitomate, también se atribuye la presencia de heterosis en rendimiento a la divergencia genética existente debido al origen del material genético utilizado [14] [15], así como a efectos de aptitud combinatoria general [16] [17]. Por el contrario, en tomatillo, Santiaguillo *et ál* [12] y Sahagún *et ál* [11] atribuyen los efectos heteróticos de rendimiento a acción génica no aditiva.

En cuanto a peso promedio de fruto, la mejor cruce fue 3*4 con 68.18 g, superando a su mejor progenitor en 38%; esta presentó una heterosis y una heterobeltiosis de 41.17 y 37.99% respectivamente (cuadros 3 y 4), si bien, los mayores valores de heterosis y heterobeltiosis para este carácter los presentó la cruce 1*5, con 115.91 y 107.83% respectivamente, que difieren con lo encontrado por Santiaguillo *et ál* [12], quienes reportaron heterosis negativa para peso promedio de fruto, con -5.2 %, en las variedades de CHF1 Chapingo * Verde Puebla, heterosis que está dada por efectos de dominancia principalmente [11] [10]. Sin embargo, esta contrasta con la heterosis en jitomate, pues Moreira *et ál* [18] señalan que los efectos heteróticos en peso promedio de fruto son génicos, no aditivos.

Para diámetro ecuatorial y polar de fruto la mejor cruce fue 3*4, con 4.79 y 6.1 cm respectivamente, y además superó a su mejor progenitor en 38 y 14 % respectivamente, con valores de heterosis y heterobeltiosis de 11.40 y 9.26% en DEF, y 12.56 y 12.03 % en DPF respectivamente (cuadro 3 y 4). Sin embargo, los mayores valores de heterosis y heterobeltiosis en DEF los mostró la cruce 1*5, con 33.59 y 29.34% respectivamente, al igual que en DPF, con heterosis y heterobeltiosis de 27.25 y 24.81% respectivamente, lo que difiere de lo reportado por Santiaguillo *et ál* [12], quienes obtuvieron heterosis negativas de -1.7 y -0.7% respectivamente, para dichos caracteres en CHF1 Chapingo * Verde Puebla. En cuanto al contenido de sólidos solubles totales, la mejor cruce fue 2*6, con un valor medio de 6.87 °brix, y superó a su mejor progenitor cuyo contenido fue de 0.98 ° brix, y valores de heterosis y heterobeltiosis de 16.82 y 16.7% respectivamente, lo

cual probablemente se debió a una buena combinación de caracteres genéticos que controlan esta variable entre *Physalis angulata* y *Physalis ixocarpa* (Rendidora), que ha sido la variedad más cultivada a través del tiempo en México.

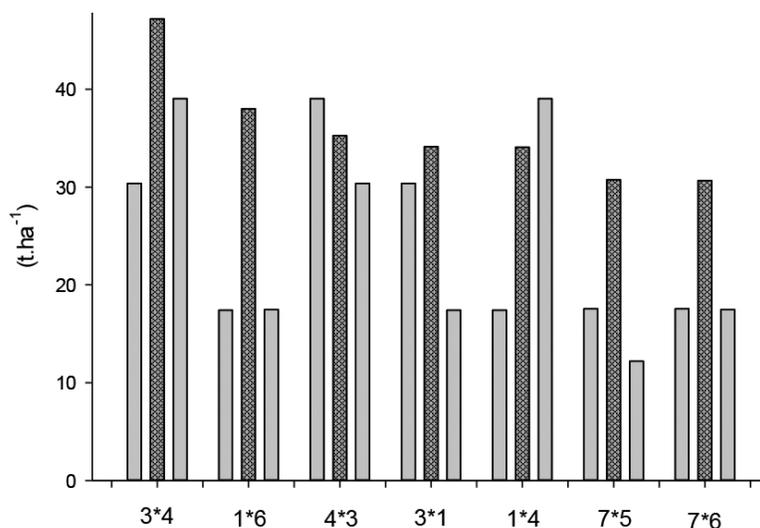


Figura 1. Gráfico de cruzas prometedoras para la variable rendimiento, *= F1 resultante de la cruz de dos progenitores ($X_1 * X_2$)

Los fenómenos de heterosis y heterobeltiosis se presentaron en la mayoría de las cruzas evaluadas en sentido positivo y en la mayoría de los caracteres evaluados; sin embargo, en algunos caracteres también se presentaron en sentido negativo (cuadro 3). La heterosis y la heterobeltiosis variaron ampliamente entre cruzas debido a la diversidad y a la divergencia genética entre progenitores probados, pues provenían de diferentes regiones agroclimáticas del país [19] y presentaban diferencias de aptitud combinatoria específica entre sus genotipos [12].

Dado que en el presente trabajo se presentaron cruzas directas y recíprocas, fue posible comparar los resultados en las variables estudiadas en ambos sentidos, por lo que se encontró diferencias entre estos, lo que indica que existen efectos maternos significativos, por lo que es importante definir la mejor dirección para una cruza interpoblacional, a fin de lograr mayores rendimientos y la calidad de fruto que demanda el mercado actual.

Cuadro 2. Promedios de seis caracteres evaluados en progenitores y cruzas de tomate de cáscara, en General Cepeda, Coahuila, México

Progenitores	RTF	NFP	PPF	DEF	DPF	SST
	(t.ha ⁻¹)		(gr)	(cm)	(cm)	(° Brix)
1)UAN CC-S2	17.42 jkl ^a	70.27 bc	15.42 r	3.77 p-r	3 qr	6.11 b-f
2)P. angulata	28.13 d-h	70.11 bc	23.95 m-q	4.33 m-o	3.36 m-p	5.89 c-f
3)UAN CP-S2	30.38 c-g	36.55 j-i	47.18 b-d	5.58 bc	4.27 bc	6.15 c-f
4)G. Esmeralda	39.05 ab	53.37 d-i	49.41 bc	5.37 b-e	4.23 bcd	5.93 c-f
5)UAN CJ-S2	12.81 l	52.82 c-i	14.26 r	3.53 r	2.88 r	6.09 c-f

Continúa...

Continuación

Progenitores	RTF	NFP	PPF	DEF	DPF	SST
	(t.ha ⁻¹)		(gr)	(cm)	(cm)	(° Brix)
7)UAN 133-05	17.55 j-l	43.14 f-k	24.36 m-q	4.47 l-n	3.42 l-o	6.16 b-e
Cruzas						
(1*3)	22.81 e-k	33.61 i-k	43.11 c-e	5.2 d-g	4.01 c-g	6.24 b-f
(1*4)	34.08 b-d	43.65 h-k	54.31 b	5.6 b	4.38 b	5.95 c-f
(1*5)	24.72 e-j	45.7 e-k	32.05 g-l	4.87 g-k	3.74 g-j	6.31 a-d
(1*6)	38.01 bc	62.52 b-g	39.37 d-g	5.25 bf	4.26 bc	5.71 d-f
(2*1)	29.85 c-g	51.17 c-j	34.92 e-i	5.15 d-g	3.99 d-h	5.68 ef
(2*5)	25.32 e-j	81.84 ab	19.42 o-r	4.23 no	3.44 l-o	5.91 c-f
(2*6)	16.33 kl	48.04 d-j	19.21 o-r	3.68 qr	3.13 p-r	6.87 a
(2*7)	18.45 j-l	40.76 h-k	29.12 i-n	4.67 j-m	3.47 k-o	6.27 a-e
(3*1)	34.15 b-d	43.65 f-k	42.23 c-f	5.6 bc	4.15 b-f	6.11 b-f
(3*4)	47.19 a	48.96 d-j	68.18 a	6.1 a	4.79 a	6.18 b-e
(3*7)	22.24 g-k	41.55 g-k	33.27 g-k	5.03 e-i	3.72 h-k	5.51 f
(4*1)	24.06 e-k	26.39 k	53.65 b	6.06 a	4.27 bc	5.7 ef
(4*3)	35.26 b-d	60.43 c-h	35.82 e-i	5.24 c-f	4.18 b-e	5.68 ef
(4*5)	30.51 c-g	63.49 b-f	26.18 j-o	4.71 i-l	3.88 g-i	5.99 c-f
(4*6)	25.43 e-j	42.85 f-k	34.45 f-i	4.98 f-j	3.69 i-l	6.14 b-e
(4*7)	31.1 b-e	43.78 f-k	40.15 d-g	5.4 b-d	3.9 f-i	6.46 a-c
(5*1)	27.79 d-i	59.38 c-h	25.53 k-o	4.7 i-l	3.57 j-n	6.46 a-c
(5*3)	15.8 kl	38.15 i-k	24.79 l-k	4.48 l-n	3.44 l-o	5.68 af
(5*7)	19.71 i-l	65.32 b-e	16.85 qr	4.04 op	3.32 n-p	5.95 c-f
(6*1)	28.19 d-h	46.48 e-k	37.7 e-h	5.16 d-g	4.01 c-g	6.34 a-c
(6*3)	20.88 h-l	37.92 i-k	32.97 g-k	5.09 d-h	3.92 e-i	6.7 ab
(6*4)	12.92 l	37.37 i-k	22.44 n-r	4.02 o-q	3.35 m-p	6.85 a
(6*5)	13.42 l	46.99 d-k	17.8 p-r	3.77 p-r	2.98 qr	6.4 a-c
(7*3)	22.35 f-k	41.01 h-k	29.92 h-n	4.59 l-n	3.73 h-k	6.19 b-e
(7*5)	30.68 c-f	100.33 a	18.1 o-r	4.1 op	3.21 o-q	5.91 c-f
(7*6)	30.75 b-e	67.62 b-d	25.61 k-p	4.61 k-m	3.6 j-m	5.92 c-f
C.V. %	20.02	25.46	15.74	4.57	4.43	6.03

&= medias seguidas de la misma letra en las columnas son estadísticamente iguales, DMS ($p \leq 0.05$); C.V.= coeficientes de variación, RTF= rendimiento total de fruto, NFP= número de frutos por planta, PPF= peso promedio de frutos, DEF=diámetro ecuatorial de fruto, DPF= diámetro polar de fruto, SST= sólidos solubles totales

Cuadro 3. Valores de heterosis mostrada por las cruzas de tomate de cáscara evaluadas en General Cepeda, Coahuila, México

Cruza	Heterosis (%)					
	RTF	NFP	PPF	DEF	DPF	SST
(1*3)	-4.56	-37.08	37.74	11.13	10.26	1.76
(1*4)	20.72	-34.22	67.56	22.62	21.23	-1.28
(1*5)	63.54	-25.74	115.91	33.59	27.25	3.40
(1*6)	117.91	23.54	54.12	23.99	24.33	0.02
(2*1)	31.08	-27.10	77.41	27.38	24.12	-0.98
(2*5)	23.67	33.15	1.66	7.66	10.22	-1.24
(2*6)	-28.35	-4.92	-35.55	-19.36	-11.39	16.82
(2*7)	-19.21	-28.01	20.56	6.01	2.38	4.15
(3*1)	42.90	-18.27	34.93	19.73	14.15	-0.28
(3*4)	35.93	8.91	41.17	11.40	12.56	2.34
(3*7)	-7.17	4.28	-6.99	0.05	-3.29	-10.42
(4*1)	-14.77	-57.31	65.53	32.71	18.13	-5.32
(4*3)	1.57	34.41	-25.84	-4.26	-1.69	-5.93
(4*5)	17.66	19.59	-17.77	5.85	9.03	-0.32
(4*6)	-9.98	1.66	-19.01	-1.99	-7.25	3.95
(4*7)	9.90	-9.28	8.85	9.70	1.95	6.80
(5*1)	83.82	-3.51	71.99	22.94	21.31	5.82
(5*3)	-26.86	-14.62	-19.31	-1.66	-3.77	-7.12
(5*7)	29.80	36.15	-12.78	1.19	5.38	-2.95
(6*1)	61.64	-8.16	47.57	20.70	19.27	5.81
(6*3)	-12.70	12.38	-20.40	-3.13	-3.81	13.61
(6*4)	-54.28	-11.34	-47.24	-20.89	-15.62	15.92
(6*5)	-11.36	12.20	-28.68	-9.35	-9.70	6.97
(7*3)	-6.73	2.93	-16.37	-8.75	-2.99	0.52
(7*5)	102.08	109.12	-6.30	0.21	0.37	-5.87
(7*6)	75.67	82.55	-14.68	-0.29	0.72	-1.70

RTF= rendimiento total de fruto, NFP= número de frutos por planta, PPF= peso promedio de frutos, DEF=diámetro ecuatorial de fruto, DPF= diámetro polar de fruto, SST= sólidos solubles totales

Cuadro 4. Valores de heterobeltiosis presentada por las cruzas de tomate de cáscara evaluadas en General Cepeda, Coahuila, México

Heterobeltiosis (%)						
	RTF	NFP	PPF	DEF	DPF	SST
(1*3)	-24.92	-52.18	-8.62	-6.95	-6.15	1.43
(1*4)	-12.71	-42.13	9.93	4.32	3.59	-2.72
(1*5)	41.94	-34.96	107.83	29.34	24.81	3.22
(1*6)	117.62	-11.03	10.37	10.82	12.30	-1.91
(2*1)	6.12	-27.18	45.81	19.04	17.54	-2.79
(2*5)	-10.00	16.74	-18.89	-2.37	2.49	-2.89
(2*6)	-41.94	-31.48	-46.14	-23.13	-15.73	16.70
(2*7)	-34.40	-41.86	19.53	4.44	-6.77	1.83
(3*1)	12.41	-37.88	-10.48	0.26	-2.83	-0.60
(3*4)	20.85	-8.25	37.99	9.26	12.03	0.53
(3*7)	-26.78	-3.68	-29.48	-9.95	-12.93	-10.50
(4*1)	-38.37	-62.44	8.60	12.91	0.95	-6.71
(4*3)	-9.70	13.24	-27.51	-6.09	-2.15	-7.60
(4*5)	-21.86	18.97	-47.01	-12.30	-8.31	-1.61
(4*6)	-34.86	-19.70	-30.27	-7.34	-12.84	3.45
(4*7)	-20.35	-17.97	-18.73	0.48	-7.83	4.82
(5*1)	59.54	-15.49	65.55	24.63	18.99	5.63
(5*3)	-48.00	-27.76	-47.46	-19.77	-19.38	-7.58
(5*7)	12.30	23.68	-30.86	-9.45	-2.85	-3.51
(6*1)	61.43	-33.86	5.68	7.88	7.73	3.77
(6*3)	-31.26	3.75	-30.11	-10.07	-10.01	11.06
(6*4)	-66.91	-29.97	-54.57	-25.21	-20.72	15.36
(6*5)	-23.16	-11.04	-50.08	-21.24	-19.83	5.09
(7*3)	-26.43	-4.93	-36.59	-17.87	-12.66	0.44
(7*5)	74.83	89.96	-25.72	-10.33	-7.47	-6.42
(7*6)	75.24	56.74	-28.20	-3.59	-3.35	-3.98

RTF= rendimiento total de fruto, NFP= número de frutos por planta, PPF= peso promedio de frutos, DEF=diámetro ecuatorial de fruto, DPF= diámetro polar de fruto, SST= sólidos solubles totales

Conclusión

En las poblaciones de tomate de cáscara utilizadas en la presente investigación se encontraron características genéticas deseables que favorecen la presencia de heterosis y heterobeltiosis positivas en los híbridos interpoblacionales resultantes de las cruzas y para los caracteres estudiados, lo que da la pauta para continuar con el mejoramiento genético de esta especie, con el objeto de desarrollar variedades superiores, con mejores atributos en calidad del fruto y mejor adaptadas a las condiciones agroclimáticas locales y regionales.

En las poblaciones de tomate de cáscara estudiadas se encontró que los efectos genéticos maternos tienen influencia significativa sobre las variables en estudio. Estos permiten definir el material parental y la mejor dirección de la cruce y del programa de mejoramiento genético.

Referencias

- [1] SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera) http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=350 2017.
- [2] L. A. Peña y F. Márquez, "Mejoramiento genético en tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.)", *Revista Chapingo*, Serie Horticultura, 71/72: 84-88, 1990.
- [3] P. Zamora, P. Vargas, M. Sánchez, and D. Cabrera, "Diversity and genetic structure of the husk tomato (*Physalis philadelphica* Lam.) in Western Mexico," *Genet. Resour. Crop Evol.*, 62: 141-153, 2015. Doi:10.1007/s10722-014-0163-9.
- [4] K. Pandey, "Genetics of self-incompatibility in *Physalis ixocarpa* Brot. A new system," *American Journal of Botany*, 44: 879- 887, 1957. <https://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1957.tb08275.x>
- [5] V. Robledo, F. Ramírez, R. Foroughbakhch, A. Benavides, G. Hernandez, and H. Reyes, "Development of tomatillo (*Physalis ixocarpa* Brot.) autotetraploids and their chromosome and phenotypic characterization," *Breeding Science*, 61: 288-293, 2011. DOI: 10.1270/jsbbs.61.288
- [6] A. Peña, J. F. Santiaguillo, D. Montalvo y M. Pérez, "Intervalos de cosecha en la variedad CHF1- Chapingo de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.), *Revista Chapingo*, Serie Horticultura, 3(1): 31-38, 1997. <http://dx.doi.org/0000>
- [7] A. Russell, "Genetic improvement of maize yields," *Advances in Agronomy* 46: 245-398, 1991. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60582-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60582-9)
- [8] C. Hoegemeyer and R. Hallauer, "Selection among and within fullsib families to develop single-crosses of maize," 16(1): 76-81. 1976. doi:10.2135/cropsci1976.0011183X001600010019x
- [9] H. Weatherspoon, "Comparative yield of single, three-way and double crosses of maize," *Crop Science*, 10: 157-159, 1970. doi:10.2135/cropsci1970.0011183X001000020011x
- [10] A. Peña, J. Molina, T. Cervantes, S. Márquez, J. Sahagún y J. Ortiz. "Heterosis intervarietal en tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.)", *Revista Chapingo*, Serie Horticultura, 4(1): 31-37. 1998. <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchsh.1997.12.093>
- [11] J. Sahagún, F. Gómez y A. Peña. "Efectos de aptitud combinatoria en poblaciones de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.)", *Revista Chapingo*, Serie Horticultura 5(1): 23-27, 1999. <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchsh.1998.07.050>
- [12] J. Santiaguillo, T. Cervantes y A. Peña. Selección para rendimiento y calidad de fruto de cruza planta * planta entre variedades de tomate de cáscara", *Rev. Fitotec. Mex.*, 27(1): 85-91, 2004. <https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/27-1/1a.pdf>
- [13] M. Moreno, A. Peña, J. Sahagun, J. Rodríguez y A. Mora, "Varianza aditiva, heredabilidad y correlaciones en la variedad M1-fitotecnia de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.)", 25(3): 231-237, 2002. <https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/25-3/1a.pdf>
- [14] S. Falconer, *Introducción a la genética cuantitativa* [trad. de F. Márquez S.], 2.a ed. México, D. F.: Editorial CECSA, 383 p., 1986.
- [15] H. Moll, H. Lonquist, F. Vélez, and C. Johnson, "The relationship of heterosis and genetic divergence in maize," *Genetics* 52: 139-144, 1965. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1210832/pdf/139.pdf>
- [16] E. Martínez, R. Lobato, J. J. García y D. Reyes, Heterosis de cruza entre líneas de tomate (*Solanum Lycopersicum* L.) nativo mexicano tipo pimienta y líneas tipo *saladette*", *Revista Fitotecnia Mexicana*, 39(1): 67-77, 2016. <https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/39-1/8a.pdf>
- [17] V. Mendoza, J. Sahagun, J. Rodríguez, P. Legaria, A. Peña y M. Perez, "Heterosis intervarietal en jitomate de crecimiento indeterminado tipo *saladette*", *Revista Chapingo*, Serie Horticultura, 16(1): 57-66, 2010. <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchsh.2010.16.007>
- [18] C. Moreira, A. Echandi y R. Méndez "Heterosis y habilidad combinatoria en líneas de tomate para mesa, con adaptación a altas temperaturas", *Revista Agrícola Tropical*, 33: 19-26, 2003. <https://www.metabase.net/docs/bn-cr-r/030534.html>
- [19] L. E. Valdivia, F. A. Rodríguez, J. Sánchez, and O. Vargas, "Phenology, agronomic and nutritional potential of three wild husk tomato species (*Physalis*, *Solanaceae*) from Mexico," *Sci. Hort.*, 200: 83-94, 2016. doi:10.1016/j.scienta.2016.01.005

Producción de siete genotipos de pepino (*Cucumis sativus* L.) cultivados en ambiente protegido*

Production of seven cucumber (*Cucumis sativus* L.) genotypes grown under greenhouse conditions

José Aníbal Cruz-Coronado¹, José Eladio Monge-Pérez²

Cruz-Coronado, J; Monge-Pérez, J. Producción de siete genotipos de pepino (*Cucumis sativus* L.) cultivados en ambiente protegido. *Tecnología en Marcha*. Vol. 33-2. Abril-Junio 2020. Pág 102-118.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v33i2.4343>

Fecha de recepción: 13 de mayo de 2019
Fecha de aprobación: 30 de agosto de 2019

* Este trabajo forma parte de la tesis de licenciatura en Agronomía del primer autor, Sede de Guanacaste, Universidad de Costa Rica.

1 Licenciado en Agronomía, Universidad de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: cruzcsanibal@gmail.com.

 <https://orcid.org/0000-0002-8290-3443>

2 Máster en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales, Docente de la Sede de Guanacaste e investigador de la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Universidad de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: melonescr@yahoo.com.mx.

 <https://orcid.org/0000-0002-5384-507X>



Palabras clave

Cucumis sativus; genotipos; pepino; invernadero; partenocárpico; rendimiento; longitud del fruto; diámetro del fruto; peso del fruto; calidad.

Resumen

El objetivo del estudio fue evaluar el rendimiento y la calidad de siete genotipos de pepino partenocárpico de tipo mediano (Corinto, Katrina, Macario, Modan, Paraíso, Primavera y 22-20-782), cultivados en condiciones de invernadero en la Estación Experimental Agrícola “Fabio Baudrit Moreno”, en Alajuela, Costa Rica. El cultivo se manejó con fertirrigación en sustrato de fibra de coco, y con poda a un tallo por planta. Los datos muestran una amplia variabilidad entre los genotipos en cuanto a edad al inicio de la floración (17 - 20 días después del trasplante -d.d.t.-), edad al inicio de la cosecha (28 - 30 d.d.t.), longitud del fruto (16,56 - 21,30 cm), diámetro del fruto (42,94 - 54,09 mm), número total de frutos por planta (26,31 - 49,41), peso del fruto (215,41 - 269,89 g), rendimiento comercial (13,66 - 22,66 kg/m²), rendimiento total (18,11 - 28,41 kg/m²) y porcentaje de sólidos solubles totales (2,89 - 3,22 °Brix). En términos generales, los frutos de pepino de primera calidad mostraron mayor longitud, diámetro y porcentaje de sólidos solubles totales que los de segunda calidad y de rechazo. Los genotipos 22-20-782 y Katrina obtuvieron el mayor rendimiento comercial (20,89 y 22,66 kg/m², respectivamente) y primera calidad (12,48 y 12,49 kg/m², respectivamente), por lo que se consideran los mejor adaptados a las condiciones en que se desarrolló la investigación; sin embargo, sus frutos son más pequeños (menor longitud, diámetro y peso) en comparación con los de otros genotipos, lo que podría afectar su potencial de comercialización en Costa Rica.

Keywords

Cucumis sativus; genotypes; cucumber; greenhouse; parthenocarpic; yield; fruit length; fruit diameter; fruit weight; quality.

Abstract

The objective of the study was to evaluate yield and quality of seven medium fruit size parthenocarpic cucumber genotypes (Corinto, Katrina, Macario, Modan, Paraíso, Primavera and 22-20-782) grown under greenhouse conditions at the Agricultural Experimental Station Fabio Baudrit Moreno, located in Alajuela, Costa Rica. The crop was planted on coconut fiber as substrate, pruned to one stem per plant and managed with fertigation. Data show a wide variability among genotypes with respect to days to start of flowering (17 - 20 days after transplant -d.a.t.-), days to start of harvest (28 - 30 d.a.t.), fruit length (16,56 - 21,30 cm), fruit diameter (42,94 - 54,09 mm), total number of fruits per plant (26,31 - 49,41), fruit weight (215,41 - 269,89 g), commercial yield (13,66 - 22,66 kg/m²), total yield (18,11 - 28,41 kg/m²), and percentage of total soluble solids (2,89 - 3,22 °Brix). In general, first quality cucumber fruits showed higher length, diameter and percentage of total soluble solids than second quality and waste quality fruits. 22-20-782 and Katrina genotypes produced the highest commercial (20,89 and 22,66 kg/m², respectively) and first quality yield (12,48 and 12,49 kg/m², respectively), so they were the best adapted to the conditions of the trial; however, their fruits were smaller (lower length, diameter and weight) compared to the other genotypes, which could affect their commercial potential in Costa Rica.

Introducción

El pepino, *Cucumis sativus* L., pertenece a la familia de plantas cucurbitáceas y es una hortaliza que se cultiva en condiciones tropicales y subtropicales alrededor del mundo; es una especie nativa del norte de India [1]; la planta es herbácea, anual, de hábito rastrero o trepador cuando se le proporciona un tutorado, y de crecimiento indeterminado [2]. Sus frutos se consideran una buena fuente de minerales y vitaminas [3], tales como calcio, cloro, potasio, hierro, vitamina C y pequeñas cantidades del complejo vitamínico B [4].

En Costa Rica, las variedades de pepino más utilizadas por los productores eran hasta hace unos pocos años Dasher II, Poinsett 76 y General Lee, debido al buen resultado productivo que presentaban [5]; sin embargo, en este país se ha señalado la necesidad de investigar sobre productos hortícolas y variedades innovadores y de altos rendimientos, que permitan a los productores lograr una buena rentabilidad [6] [7].

Según el Programa Nacional Sectorial de Producción Agrícola bajo Ambientes Protegidos (PRONAP), entre 2008 y 2009 Costa Rica contaba con un total de 684 unidades productivas en ambiente protegido, para un total de 687 ha, de las cuales 13 ha correspondían al cultivo de cucurbitáceas [8].

El cultivo de pepino en Costa Rica está distribuido en varias zonas del país y está dirigido principalmente a satisfacer la demanda nacional. Sin embargo, entre los años 2007 y 2010 surgió en Zarcero un proyecto de producción de pepino holandés para exportación, el cual comprendía 10,5 ha [9]; la poca experiencia en producción de pepino para exportación en invernadero afectó dicho proyecto, y no se logró la permanencia en el mercado debido a varias razones, entre las que destacan la poca investigación sobre cultivares y materiales promisorios [10], así como la baja productividad y rentabilidad logradas durante el desarrollo del proyecto [9].

La producción de pepino en Costa Rica fue de 1500 toneladas métricas (ton) en 2010, pero bajó a 1000 ton en 2011 y 2012, y a 940 ton en 2013. Dicha producción representó un rendimiento promedio de 9,1 ton/ha en 2010, 2011 y 2012, y cayó a 8,9 ton/ha en 2013 [11].

Las condiciones óptimas de temperatura para el desarrollo del pepino se encuentran en un rango de 18 a 28 °C [12]; incluso, la FAO indica que el pepino se desarrolla de manera óptima en un rango de temperatura entre 18 y 25 °C, y una humedad relativa entre 70 y 90 % [13]. El pepino se adapta a climas cálidos y templados, y se cultiva desde las zonas costeras hasta los 1200 metros sobre el nivel del mar. Por encima de 40 °C el crecimiento se detiene, y lo mismo sucede con temperaturas inferiores a 14 °C. Es una planta con elevados requerimientos de humedad debido a su gran superficie foliar, por lo que la humedad relativa óptima durante el día es de 60 a 70 %, y durante la noche de 70 a 90 % [14]. Las temperaturas muy altas durante el periodo de floración disminuyen la viabilidad del polen [15], por lo que la producción se ve afectada. Asimismo, se considera que las temperaturas de 20 a 30 °C durante el día apenas tienen incidencia sobre la producción; a temperaturas hasta de 25 °C, se alcanza la máxima producción precoz, pero por encima de 30 °C se pueden observar desequilibrios en las plantas [16].

El pepino posee varios cultivares en el mercado, con frutos de diferente tamaño, forma y coloración, cáscara de diferente textura, sabor y características vegetativas distintos [17]. Algunos autores identifican cinco grupos: pepino para ensalada, el tipo *caipira*, el tipo japonés, el tipo holandés y el tipo industrial (para conserva) [18]. Otros investigadores informan que los tipos más comunes de pepino son el americano, el europeo, el del este medio, el holandés y el oriental [19].

Una forma de clasificar los pepinos es según las características físicas del fruto: el pepino tipo español, cuyo fruto alcanza una longitud máxima de 15 cm, es de color verde y se puede usar para encurtido o consumo fresco; el pepino tipo francés, cuyos frutos tienen una longitud de 20

a 25 cm, pueden presentar espinas en la piel; y el pepino tipo holandés o Almería, cuyos frutos superan los 25 cm de longitud, presenta plantas ginoicas y frutos totalmente partenocárpico y de piel lisa, más o menos asurcada [20].

Según su uso, se pueden clasificar en pepino para encurtido (de procesamiento), pepino de mesa o para ensalada (o de consumo fresco) y cultivares de invernadero: el armenio, el oriental (japonés o asiático), el Beit Alfa (persa) y el europeo [15]. En otra de las clasificaciones se utiliza como criterio el origen, como es el caso de los tipos holandés y francés (también llamados europeos), y el tipo asiático. Un criterio adicional es el tamaño del fruto: largo (tipo holandés), mediano (tipo americano o *slicer*, y francés) y pequeño (tipo Beit Alpha, “mini” o pepinillo). Los pepinos tipo americano (*slicer*) son de color oscuro y cáscara gruesa, por lo que tienen un buen comportamiento poscosecha; se cosechan de 18 a 23 cm de longitud [17] [21].

El pepino es una hortaliza de alta demanda en países desarrollados, principalmente para la industria de vegetales procesados o para encurtido, e incluso para consumo fresco [22]. De ahí la importancia de evaluar nuevos materiales de pepino que les sirvan a los productores para mantenerse en el mercado nacional e, incluso, incursionar en la actividad de exportación, con variedades vigorosas, precoces, de altos rendimientos y de buena calidad.

Es importante tomar en cuenta varios aspectos al escoger variedades de pepino que se adapten a las zonas de cultivo, para un mercado de destino. Entre los aspectos más importantes por considerar destacan una producción comercial, el vigor de la planta, un buen nivel de resistencia a enfermedades y la uniformidad de la cosecha [16].

El objetivo de esta investigación fue evaluar el rendimiento y la calidad de siete genotipos de pepino partenocárpico de tipo mediano, cultivados en ambiente protegido, en condiciones hidropónicas, en Alajuela, Costa Rica.

Materiales y métodos

Se sembraron siete genotipos híbridos de pepino (*Cucumis sativus* L.) partenocárpico, con frutos de mediana longitud (cuadro 1). El cultivo se realizó en condiciones hidropónicas, en el invernadero de hortalizas de la Estación Experimental Agrícola “Fabio Baudrit Moreno” (EEAFBM), ubicada en Barrio San José de Alajuela, Costa Rica, a una altitud de 883 msnm.

El cultivo se realizó en sacos plásticos rellenos con fibra de coco, de 1 m de largo, 20 cm de ancho y 15 cm de altura. La distancia de siembra fue de 25 cm entre plantas, y de 1,54 m entre hileras, para una densidad de 2,60 plantas/m². Las plantas se manejaron a un solo tallo, eliminando todos los tallos secundarios. Las labores de amarre de la planta, deshijas y deshojas se realizaron en forma periódica. Se eliminaron los primeros cuatro frutos de cada planta, con el fin de lograr una cosecha más uniforme.

Durante este ensayo, las condiciones ambientales dentro del invernadero fueron las siguientes: la temperatura diurna promedio fue de 27,1 °C, con un valor mínimo promedio de 20,7 °C, y uno máximo promedio de 33,4 °C, mientras que la temperatura nocturna promedio fue de 21,4 °C, con un valor mínimo promedio de 19,8 °C y uno máximo promedio de 23,9 °C. La humedad relativa promedio durante el día fue de 72,3 % y durante la noche fue de 89,2 %. La radiación fotosintéticamente activa diurna promedio fue de 494,0 W/m².

El almácigo se sembró el 3 de julio de 2015; se usaron bandejas de 98 celdas y turba (*peat moss*) como sustrato. El trasplante se realizó 12 días después de la siembra, cuando las plántulas tenían una hoja verdadera. El período de cultivo abarcó desde el 15 de julio hasta el 20 de octubre de 2015, es decir, hasta los 97 días después del trasplante (d.d.t.).

El suministro hídrico y la fertilización se hicieron mediante un sistema de fertirriego automático, controlado por un dispositivo marca iGrow 1400. El plan de fertirriego se presenta en el cuadro 2.

Cuadro 1. Genotipos de pepino utilizados en el ensayo

Genotipo	Casa comercial
22-20-782	Pandia Seeds
Corinto	Enza Zaden
Katrina	Enza Zaden
Macario	Enza Zaden
Modan	Rijk Zwaan
Paraíso	Enza Zaden
Primavera	Enza Zaden

Cuadro 2. Plan de fertirriego utilizado para la producción de genotipos de pepino

Etapa del cultivo	Concentración del nutriente (mg/l)											
	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Zn	Mn	Mo	B
0-15 d.d.t.	150	53	240	165	40	50	0,16	2,9	0,3	0,6	0,9	0,8
15-30 d.d.t.	161	53	265	175	50	50	0,16	2,9	0,3	0,6	0,9	0,8
30 d.d.t. en adelante	172,5	53	290	175	55	50	0,16	2,9	0,3	0,6	0,9	0,8

Se clasificó la cosecha según tres categorías de calidad (cuadro 3).

Cuadro 3. Parámetros de calidad de pepino utilizados en el ensayo

Parámetro	Categoría de calidad		
	Primera	Segunda	Rechazo
Deformación de frutos	Ausente	Leve	Severa
Daños en la cáscara del fruto	Ausente	Menor o igual a 1 cm ²	Mayor a 1 cm ²

Se evaluaron las siguientes variables:

- a) Edad al inicio de la floración (d.d.t.): esta variable se midió en días después del trasplante, cuando el 50 % de las plantas mostraban al menos una flor completamente abierta.
- b) Edad al inicio de la cosecha (d.d.t.): esta variable se registró en días después del trasplante al realizar la primera cosecha, cuando los frutos habían alcanzado un estado de desarrollo óptimo para la comercialización.
- c) Presencia de espinas: se determinó en forma cualitativa en cada genotipo, mediante las siguientes categorías: “ausencia de espinas”, “cantidad intermedia de espinas” y “muchas espinas”.
- d) Número de frutos por planta: se contabilizó el número total de frutos producidos por parcela y se dividió entre el número de plantas de la parcela.
- e) Longitud del fruto (cm): se evaluó esta característica en 20 frutos de cada categoría de calidad en cada repetición, y se obtuvo el promedio; se determinó con una cinta métrica marca Assist 32G–8025, con una capacidad de $800,0 \pm 0,1$ cm.
- f) Diámetro del fruto (mm): se evaluó esta característica en la parte media de 20 frutos de cada categoría de calidad por repetición, y se obtuvo el promedio; se midió con un calibrador digital marca Mitutoyo modelo CD-6”CS, con una capacidad de $15,00 \pm 0,01$ cm.
- g) Porcentaje de sólidos solubles totales (°Brix): se evaluó esta característica a partir de un macerado de la pulpa y la placenta del fruto, en 20 frutos por cada repetición y categoría de calidad, y se obtuvo el promedio; se midió con un refractómetro manual marca BOECO, con una capacidad de $0-32,0 \pm 0,2$ °Brix.
- h) Peso del fruto (g): se midió el peso total de los frutos producidos por repetición y categoría de calidad, y se dividió entre el número total de frutos obtenidos; se determinó por medio de una balanza electrónica marca OCONY UWE HGM-20, con una capacidad de 20000 ± 1 g.
- i) Rendimiento (kg/m^2): se estimó a partir del peso de la producción obtenida por parcela y de la densidad de siembra, por cada categoría de calidad. Se consideró como rendimiento comercial la suma de los rendimientos de las categorías de primera y segunda calidad, y como rendimiento total la suma de los rendimientos de las tres categorías de calidad.

Se utilizó un diseño experimental irrestricto al azar, con siete tratamientos (genotipos) y cuatro repeticiones. Cada parcela contó con ocho plantas (dos sacos), y todos los datos se obtuvieron a partir de los frutos totales producidos en dicha parcela. De las variables cuantitativas se realizó un análisis estadístico de variancia, y se utilizó la prueba de LSD Fisher con una significancia de 5 % para determinar diferencias entre los tratamientos.

Resultados y discusión

Edad al inicio de la floración y la cosecha

En el cuadro 4 se muestran los resultados en edad al inicio de la floración y al inicio de la cosecha, para los genotipos de pepino evaluados. La floración inició entre los 17 y 20 d.d.t., y la cosecha, entre los 28 y 30 d.d.t.; los genotipos Corinto y Primavera mostraron la mayor precocidad respecto a los demás, en el inicio de la floración, y ambos formaron parte también, junto con el Katrina y el 22-20-782, del grupo de genotipos cuya cosecha se inició a los 28 d.d.t.

Según diversos investigadores, la edad al inicio de la cosecha oscila entre 31 y 90 d.d.t. para el pepino tipo mediano (cuadro 5); los resultados obtenidos en el presente ensayo fueron menores a dicho rango, es decir que las plantas mostraron una producción más precoz.

Cuadro 4. Edad de genotipos de pepino al inicio de la floración y al inicio de la cosecha

Genotipo	Edad al inicio de floración (d.d.t.)	Edad al inicio de cosecha (d.d.t.)
Corinto	17	28
Primavera	17	28
Katrina	18	28
22-20-782	18	28
Modan	19	30
Macario	19	30
Paraíso	20	30

Cuadro 5. Edad al inicio de la cosecha, informada en la literatura, para producción de pepino tipo mediano en invernadero

Edad al inicio de cosecha (d.d.t.)	Referencia
31	[23]
35	[24]
37	[25]
39	[26]
49	[27]
50	[28]
67 – 72	[19]
86 – 90	[29]

Esta precocidad pudo haber sido inducida por la alta temperatura y la alta radiación en que se desarrolló el cultivo en el presente ensayo, lo cual pudo haber ocasionado un aceleramiento en el metabolismo de las plantas. Los distintos valores de edad al inicio de la cosecha en pepino de diferentes sitios o épocas de siembra se deben generalmente a las diferencias en la temperatura dentro del invernadero, ya que las temperaturas bajas provocan una disminución en el ritmo de crecimiento de la planta y un retraso en la maduración del fruto, mientras que mayores temperaturas aceleran ambos procesos [30].

Presencia de espinas

Los resultados de presencia de espinas en los frutos de los genotipos de pepino estudiados se muestran en el cuadro 6. Todos los genotipos presentaron frutos con un nivel intermedio de espinas, con excepción del Katrina y el 22-20-782, que no poseen espinas. En el caso de los genotipos con espinas, estas fueron de color blanco, con excepción del Macario, cuyas espinas mostraron un color marrón.

Básicamente, la presencia de espinas está asociada al tipo de cáscara de cada genotipo. Los pepinos tipo largo (holandés) y tipo pequeño (“mini” o Beit Alpha) son de cáscara suave y delgada, con estrías o arrugas levemente marcadas y no poseen espinas, mientras que los tipo mediano (*slicer*) presentan una cáscara gruesa y tienen una cantidad media de espinas [21]. El Katrina y el 22-20-782 no poseen espinas, dado que son pepinos tipo Beit Alpha, pero de tamaño mediano.

Cuadro 6. Presencia de espinas en el fruto de genotipos de pepino

Genotipo	Presencia de espinas	Color de espinas
22-20-782	Ausencia	No aplica
Corinto	Intermedio	Blanco
Katrina	Ausencia	No aplica
Macario	Intermedio	Marrón
Modan	Intermedio	Blanco
Paraíso	Intermedio	Blanco
Primavera	Intermedio	Blanco

Longitud del fruto

En el cuadro 7 se presentan los resultados de longitud del fruto de los genotipos evaluados.

Cuadro 7. Longitud del fruto de genotipos de pepino

Genotipo	Longitud del fruto (cm), según categoría de calidad			
	Total	Primera	Segunda	Rechazo
Katrina	16,56 a	17,54 a	16,28 a	15,85 a
22-20-782	18,53 b	18,99 b	18,65 b	17,95 b
Macario	20,23 c	21,84 c	19,42 c	19,43 c
Primavera	20,58 d	21,95 c	20,31 d	19,46 c
Corinto	20,60 d	21,60 c	20,13 d	20,06 d
Paraíso	21,02 e	23,27 e	20,36 d	19,45 c
Modan	21,30 f	22,66 d	21,50 e	19,75 cd
Categoría de calidad				
Primera	21,12 c			
Segunda	19,52 b			
Rechazo	18,85 a			

Nota: Valores con una letra en común no son significativamente diferentes, según prueba LSD Fisher ($p \leq 0,05$).

Los genotipos Modan y Paraíso presentaron el fruto de mayor longitud, con más de 21 cm, mientras que el Macario, el Corinto y el Primavera alcanzaron valores intermedios; el 22-20-782 alcanzó 18,53 cm y el Katrina fue el de menor longitud (16,56 cm). En términos generales, los frutos de primera calidad mostraron una mayor longitud que los de segunda calidad y los de rechazo; los de segunda calidad alcanzaron también una mayor longitud que los de rechazo.

Según diversos autores, la longitud del fruto varía entre 21,10 y 26,55 cm en pepino tipo mediano (cuadro 8); los resultados obtenidos en la presente investigación se ubicaron por debajo de dicho rango (frutos con menor longitud), con excepción del genotipo Modan.

Cuadro 8. Longitud del fruto informada en la literatura, para producción de pepino tipo mediano en invernadero

Longitud del fruto (cm)	Referencia
21,10 – 23,85	[23]
21,50 – 25,33	[27]
21,70 – 23,50	[25]
21,84 – 22,86	[26]
22,60 – 26,55	[24]
22,90 – 23,50	[31]
25,30 – 25,70	[19]

Con respecto a otro ensayo llevado a cabo en el invernadero de la EEAFBM en la época seca [23], en el presente ensayo los genotipos Modan, Primavera, Paraíso, Corinto y Macario alcanzaron menor longitud del fruto.

Diámetro del fruto

En el cuadro 9 se presentan los resultados de diámetro del fruto de los genotipos evaluados.

Cuadro 9. Diámetro del fruto de genotipos de pepino

Genotipo	Diámetro del fruto (mm), según categoría de calidad			
	Total	Primera	Segunda	Rechazo
Katrina	42,94 a	47,64 a	41,99 a	39,18 a
22-20-782	47,40 b	49,22 b	48,06 b	44,90 b
Modan	49,95 c	50,77 c	50,78 c	48,31 c
Primavera	52,13 d	56,07 de	51,68 c	48,62 c
Paraíso	52,56 d	57,54 f	51,63 c	48,50 c
Corinto	53,50 e	55,81 d	52,82 d	51,88 d
Macario	54,09 e	57,22 ef	53,97 e	51,07 d
Categoría de calidad				
Primera	53,47 c			
Segunda	50,13 b			
Rechazo	47,50 a			

Nota: Valores con una letra en común no son significativamente diferentes, según prueba LSD Fisher ($p \leq 0,05$).

Los genotipos Corinto y Macario obtuvieron los mayores valores para esta característica, con 53,50 y 54,09 mm, respectivamente. Con valores intermedios se ubicaron el Primavera y el Paraíso, y con valores inferiores a 50 mm el Modan, el 22-20-782 y el Katrina; este último genotipo obtuvo el menor valor para esta característica (42,94 mm). Por otra parte, en forma general, los frutos de primera calidad presentaron mayor diámetro que los de segunda calidad y los de rechazo, y asimismo, los de segunda calidad mostraron mayor diámetro que los de rechazo.

Según diversos investigadores, el diámetro del fruto oscila entre 24,20 y 60,70 mm en pepino tipo mediano (cuadro 10); los resultados hallados en el presente ensayo se ubicaron dentro de dicho rango. En relación con otro ensayo realizado en el invernadero de la EEAFBM en la época seca [23], en el presente trabajo los genotipos Modan, Primavera, Paraíso, Corinto y Macario alcanzaron mayor diámetro del fruto.

Cuadro 10. Diámetro del fruto informado en la literatura, para producción de pepino tipo mediano en invernadero

Diámetro del fruto (mm)	Referencia
24,20 – 28,30	[24]
29,70 – 29,90	[25]
45,00 – 60,70	[27]
48,57 – 49,97	[23]
49,00 – 51,00	[31]
50,80 – 53,34	[26]
51,00 – 53,00	[19]

Número de frutos por planta

Los datos de número de frutos por planta se presentan en el cuadro 11.

Cuadro 11. Número de frutos por planta, de genotipos de pepino

Genotipo	Número de frutos por planta, según categoría de calidad			
	Total	Primera	Segunda	Rechazo
Primavera	26,31 a	10,72 a	8,28 a	7,31 a
Corinto	29,77 ab	10,16 a	11,18 b	8,43 ab
Macario	30,57 b	10,75 a	10,91 b	8,91 b
Paraíso	30,97 b	11,53 a	11,50 b	7,94 ab
Modan	31,60 b	11,41 a	12,19 b	8,00 ab
22-20-782	43,91 c	19,44 b	13,09 b	11,38 c
Katrina	49,41 d	19,28 b	16,91 c	13,22 d

Nota: Valores con una letra en común no son significativamente diferentes, según prueba LSD Fisher ($p \leq 0,05$).

Los genotipos Katrina y 22-20-782 fueron los que presentaron la mayor cantidad de frutos por planta, tanto en total, como en la categoría de primera calidad; con respecto a la producción

de frutos de primera calidad, ambos genotipos alcanzaron valores superiores a 19 frutos por planta, mientras que los demás genotipos produjeron entre 10,16 y 11,53 frutos por planta. Esto se debe a que las plantas de Katrina y 22-20-782 son multifruto, es decir, que producen de tres a cinco frutos por cada nudo, lo que explica su alta prolificidad. Con respecto al número total de frutos por planta, el genotipo Primavera fue el menos productivo (26,31 frutos por planta), mientras que el 22-20-782 produjo 43,91 frutos por planta; el Katrina fue el más productivo (49,41 frutos por planta).

Según diversos autores, la producción total de frutos varía entre 5,52 y 24,31 frutos por planta en pepino tipo mediano (cuadro 12); los resultados obtenidos en la presente investigación superaron dicho rango, lo que indica mayor prolificidad.

Cuadro 12. Número de frutos por planta informado en la literatura, para producción de pepino tipo mediano en invernadero

Número de frutos por planta	Referencia
5,52 – 8,44	[32]
8,00	[17]
12,50 – 15,48	[33]
15,00 – 16,80	[31]
15,40 – 17,20	[25]
16,40 – 17,40	[19]
18,38 – 19,88	[26]
21,63 – 24,31	[23]

Se ha informado que la incidencia de alta temperatura (mayor a 30 °C) provoca desequilibrios en las plantas de pepino, dando lugar a malformaciones de hojas y frutos defectuosos [30]. Esto probablemente se presentó en este ensayo, donde la temperatura máxima dentro del invernadero alcanzó inclusive los 37,4 °C, lo que pudo haber favorecido la producción de frutos de calidad de rechazo (entre 7,31 y 13,22 frutos por planta).

En otro ensayo llevado a cabo con varios genotipos de pepino en el invernadero de la EEAFBM en la época seca [23], Modan obtuvo 22,04 frutos totales por planta, mientras que en el presente trabajo (época lluviosa), dicho genotipo fue más prolífico (31,60 frutos totales por planta); de la misma forma, la producción de frutos por planta también fue mayor con Primavera, Paraíso, Macario y Corinto. Esto parece sugerir que todos estos genotipos, al ser cultivados bajo invernadero, se comportan mejor en la época lluviosa que en la época seca.

En Sonora, México, y en producción de otoño-invierno, unos autores reportaron una producción comercial de 14,9 frutos por planta del genotipo Modan con un manejo a un tallo, y de 15,1 frutos por planta con un manejo a dos tallos [31], mientras que la producción comercial de ese genotipo en el presente ensayo fue mucho más alta (23,6 frutos por planta); este resultado se podría explicar por la mayor temperatura que se presentó en la EEAFBM, lo que favoreció la producción de una mayor cantidad de frutos por planta.

Peso del fruto

En el cuadro 13 se presentan los datos de peso del fruto de los genotipos evaluados.

Cuadro 13. Peso del fruto de genotipos de pepino.

Genotipo	Peso del fruto (g), según categoría de calidad			
	Total	Primera	Segunda	Rechazo
Katrina	215,41 a	248,33 a	229,49 a	168,40 a
22-20-782	242,21 b	247,89 a	247,47 c	231,27 cd
Modan	254,52 c	298,92 b	240,70 b	223,93 b
Corinto	258,50 d	302,95 b	242,63 bc	229,91 c
Paraíso	259,12 d	304,70 b	242,13 bc	230,52 cd
Primavera	259,60 d	302,83 b	242,48 bc	233,50 d
Macario	269,89 e	333,37 c	245,68 bc	230,64 cd

Nota: Valores con una letra en común no son significativamente diferentes, según prueba LSD Fisher ($p \leq 0,05$).

El genotipo Macario fue el que alcanzó el mayor peso del fruto, tanto en los frutos de primera calidad como en el promedio del total (333,37 y 269,89 g, respectivamente), mientras que el Katrina fue el que alcanzó el menor peso en promedio del total de los frutos (215,41 g).

Según diversos investigadores, el peso del fruto oscila entre 103,70 y 415,66 g para pepino tipo mediano (cuadro 14); los resultados hallados en el presente ensayo se ubicaron dentro de dicho rango.

Cuadro 14. Peso del fruto informado en la literatura, para producción de pepino tipo mediano en invernadero.

Peso del fruto (g)	Referencia
103,70 – 149,90	[24]
209,00	[17]
304,51 – 378,51	[23]
324,00 – 337,00	[31]
336,90 – 372,50	[26]
342,60 – 361,97	[33]
372,00 – 388,00	[19]
396,12 – 415,66	[28]

Algunos investigadores encontraron para el fruto de la variedad Paraíso un peso de 396,12 g cuando cultivaron el pepino bajo malla-sombra, y cuando utilizaron sombreado con encalado, un peso de 415,66 g [28]; sin embargo, en el presente trabajo dicho genotipo produjo un fruto de peso mucho menor (259,12 g). Por otra parte, los genotipos Modan, Primavera, Paraíso, Corinto y Macario también obtuvieron, en el presente ensayo, fruto de menor peso en comparación a otra prueba realizada en la época seca en la EEAFBM [23]. Ambos resultados evidencian la importante influencia del factor ambiental sobre esta característica.

Rendimiento

En el cuadro 15 se presentan los datos de rendimiento de los genotipos evaluados.

Cuadro 15. Rendimiento de genotipos de pepino

Genotipo	Rendimiento (kg/m ²), según categoría de calidad				
	Total	Comercial	Primera	Segunda	Rechazo
Primavera	18,11 a	13,66 a	8,46 ab	5,20 a	4,45 a
Corinto	20,05 ab	15,02 ab	7,98 a	7,04 b	5,03 ab
Paraíso	21,12 b	16,36 b	9,14 ab	7,22 b	4,76 ab
Modan	21,13 b	16,48 b	8,87 ab	7,61 b	4,65 a
Macario	21,56 b	16,23 b	9,26 b	6,97 b	5,33 bc
22-20-782	27,69 c	20,89 c	12,48 c	8,41 b	6,80 d
Katrina	28,41 c	22,66 c	12,49 c	10,17 c	5,75 c

Nota: Valores con una letra en común no son significativamente diferentes, según prueba LSD Fisher ($p \leq 0,05$).

Los genotipos que obtuvieron mayor rendimiento en la categoría de primera calidad, así como mayor rendimiento comercial y total, fueron el 22-20-782 y el Katrina, cuyos rendimientos comerciales fueron de 20,89 y 22,66 kg/m², respectivamente; hay que tomar en cuenta que estos genotipos son multifruto, lo que explica estos altos valores. Por otra parte, el Primavera fue el genotipo menos productivo, con 18,11 y 13,66 kg/m² de rendimiento total y comercial respectivamente.

Según diversos investigadores, el rendimiento por área oscila entre 3,34 y 27,33 kg/m² para pepino tipo mediano (cuadro 16); los resultados hallados en el presente ensayo se ubicaron dentro de dicho rango, excepto para los genotipos 22-20-782 y Katrina, cuya producción fue superior a la indicada, es decir, que fueron más productivos.

Cuadro 16. Rendimiento informado en la literatura, para producción de pepino tipo mediano en invernadero

Rendimiento (kg/m ²)	Referencia
3,34 – 4,84	[32]
6,00 – 7,90	[29]
8,86 – 9,48	[34]
9,11 – 18,11	[35]
11,33 – 13,00	[24]
14,70 – 17,70	[19]
15,80 – 17,30	[31]
17,42 – 23,46	[28]
17,53 – 22,18	[23]
21,27 – 27,33	[36]

Otros investigadores obtuvieron un rendimiento total de 18,11 kg/m² en pepinos *slicer* a una densidad de 6,0 plantas/m², mientras que con 2,0 plantas/m² obtuvieron solo 9,11 kg/m² [35]; los rendimientos totales obtenidos en la presente investigación, con 2,6 plantas/m², fueron superiores a dichos resultados (excepto en el caso del genotipo Primavera).

En la época de verano en la EEAFBM, otros autores informaron que el mayor rendimiento comercial se obtuvo con el genotipo Primavera (19,04 kg/m²), y el menor rendimiento comercial, con el Modan (15,12 kg/m²) [23]. Sin embargo, en el presente trabajo, el Modan obtuvo un rendimiento comercial mayor (16,48 kg/m²), y el Primavera un rendimiento menor (13,66 kg/m²). Esto sugiere que el Modan puede ser un genotipo sensible a las altas temperaturas, como las que se presentaron en la época de verano en la EEAFBM, mientras que el Primavera puede ser un genotipo que se comporta mucho mejor al crecer bajo condiciones de mayor temperatura y menor humedad relativa.

Porcentaje de sólidos solubles totales

En el cuadro 17 se presentan los resultados de porcentaje de sólidos solubles totales del fruto de los genotipos evaluados. Los genotipos Macario y Paraíso alcanzaron los mayores valores para esta característica, con 3,16 y 3,22 °Brix, respectivamente, mientras que el Modan y el 22-20-782 obtuvieron los valores más bajos (entre 2,89 y 2,90 °Brix). Además, en términos generales, los frutos de primera calidad obtuvieron un valor mayor para esta característica que los de segunda calidad y de rechazo; y los de segunda calidad presentaron también un valor mayor que los de rechazo.

Cuadro 17. Porcentaje de sólidos solubles totales del fruto de genotipos de pepino

Genotipo	Porcentaje de sólidos solubles totales (°Brix), según categoría de calidad			
	Total	Primera	Segunda	Rechazo
Modan	2,89 a	2,88 a	2,87 a	2,91 a
22-20-782	2,90 a	2,90 a	2,92 ab	2,89 a
Primavera	2,98 b	3,00 b	2,97 b	2,98 b
Katrina	3,00 b	3,04 bc	2,97 b	2,99 bc
Corinto	3,05 c	3,09 c	3,05 c	3,02 bc
Macario	3,16 d	3,27 d	3,18 d	3,04 bc
Paraíso	3,22 e	3,38 e	3,22 d	3,06 c
Categoría de calidad				
Primera	3,08 c			
Segunda	3,03 b			
Rechazo	2,98 a			

Nota: Valores con una letra en común no son significativamente diferentes, según prueba LSD Fisher ($p \leq 0,05$).

Según diversos autores, el porcentaje de sólidos solubles totales varía entre 3,00 y 4,08 °Brix para pepino tipo mediano (cuadro 18); los resultados obtenidos en la presente investigación se ubicaron dentro de dicho rango, excepto para los genotipos 22-20-782, Modan y Primavera, que obtuvieron valores menores que el indicado.

Cuadro 18. Porcentaje de sólidos solubles totales informado en la literatura, para producción de pepino tipo mediano en invernadero

Porcentaje de sólidos solubles totales (°Brix)	Referencia
3,00 – 3,70	[19]
3,40 – 3,89	[23]
3,60 – 4,07	[27]
3,60 – 4,08	[33]

Conclusiones

En términos generales, los frutos de pepino de primera calidad mostraron mayor longitud, diámetro y porcentaje de sólidos solubles totales, que los de segunda calidad y de rechazo.

Los genotipos 22-20-782 y Katrina obtuvieron el mayor rendimiento comercial (20,89 y 22,66 kg/m², respectivamente) y de primera calidad (12,48 y 12,49 kg/m², respectivamente), por lo que se consideran los mejor adaptados a las condiciones en que se desarrolló la investigación; sin embargo, sus frutos fueron más pequeños (menor longitud, diámetro y peso) en comparación con los de los otros genotipos estudiados, lo que podría afectar su potencial de comercialización en Costa Rica.

Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento recibido de CONARE, así como de la Universidad de Costa Rica, para la realización de este trabajo. Asimismo, agradecen la colaboración de Ana Julia Sánchez, Karla Chacón, Ana Rebeca Zeledón, Carolina Ramírez, Werner Salazar, Julio Loáiciga, Julio Vega, Andrés Oviedo y Carlos González en el trabajo de campo, y de Mario Monge en la revisión de la traducción del resumen al idioma inglés.

Referencias

- [1] V. K. Kapuriya, K. D. Ameta, S. K. Teli, A. Chittora, S. Gathala and S. Yadav, «Effect of spacing and training on growth and yield of polyhouse grown cucumber (*Cucumis sativus* L.),» *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, vol. 6, no. 8, pp. 299-304, 2017.
- [2] J. Reche, *Cultivo de pepino en invernadero*. Madrid, España: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011, p. 50.
- [3] T. Z. Sarhan y S. F. Ismael, «Effect of low temperature and seaweed extracts on flowering and yield of two cucumber cultivars (*Cucumis sativus* L.),» *International Journal of Agricultural and Food Research*, vol. 3, no. 1, pp. 41-54, 2014.
- [4] V. Rozano, C. Quiróz, J. C. Acosta, L. A. Pimentel y E. I. Quiñones, «Hortalizas, las llaves de la energía,» *Revista Digital Universitaria*, vol. 6, no. 9, pp. 1-30, 2004.
- [5] S. Torres, «Valoración agronómica de dos variedades de mostaza (*Brassica juncea*), pepino (*Cucumis sativus*) y rábano (*Raphanus sativus*)», Escuela de Agricultura de la Región Tropical Húmeda, Guácimo, Costa Rica, 2007.
- [6] J. E. Monge-Pérez, «Caracterización de 14 genotipos de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivados bajo invernadero en Costa Rica», *Tecnología en Marcha*, vol. 27, n.º 4, pp. 58-68, 2014.
- [7] J. E. Monge-Pérez, «Evaluación preliminar de 201 genotipos de ocho diferentes hortalizas (berenjena, chile dulce, zucchini, ayote, sandía, pepino, tomate y melón) cultivados bajo invernadero en Costa Rica», de *La investigación en Guanacaste II*, (Nuevas Perspectivas), San José, Costa Rica, , 2016, pp. 277-300.

- [8] F. Marín, «Cuantificación y valoración de estructuras y procesos de producción agrícola bajo ambientes protegidos en Costa Rica», Programa Nacional Sectorial de Producción Agrícola bajo Ambientes Protegidos, Ministerio de Agricultura y Ganadería, San José, Costa Rica, 2010. [En línea]. Disponible en <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/a00290.pdf>.
- [9] J. A. Valenciano, A. M. Salas y R. Díaz, «Sistemas de financiamiento en cadenas agrícolas rurales: un caso no exitoso en la producción de pepino en Zarcero, Costa Rica,» *Revista ABRA*, vol. 33, n.º 46, pp. 13-29, 2013.
- [10] N. Mora, H. Campos, J. F. Fernández y S. Morales, *Caracterización de la agrocadena pepino holandés* Dirección Regional Central Occidental, Ministerio de Agricultura y Ganadería, Alajuela, Costa Rica, 2007.
- [11] FAO, «Estadísticas de producción de pepino», 2015. [En línea]. Disponible en <http://faostat3.fao.org/browse/T/TP/S>.
- [12] C. Bojacá y O. Monsalve, *Manual de producción de pepino bajo invernadero*, Bogotá, Colombia: Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 2012.
- [13] FAO, «El cultivo protegido en clima mediterráneo: pepino», 2002. [En línea]. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/005/s8630s/s8630s08.htm#bm08..2.4.5>.
- [14] A. Casaca, «El cultivo del pepino», en *Guías tecnológicas de frutas y vegetales*, 2005. [En línea]. Disponible en <http://www.innovacion.gob.sv/inventa/attachments/article/2286/pepino.pdf>.
- [15] Haifa, «Nutritional recommendations for cucumber in open fields, tunnels and greenhouse,» 2011. [En línea]. Available: <http://www.haifa-group.com/files/Guides/Cucumber.pdf>.
- [16] R. Vasco, «El cultivo de pepino bajo invernadero,» de *Técnicas de producción en cultivos protegidos*, Tomo 2. Madrid, España: Caja Rural Intermediterránea (Cajamar), 2003, pp. 691-722.
- [17] L. C. Crosby, «Growth and consumer evaluation of *Cucumis sativus* L. cultivated in controlled environments,» 2008.
- [18] M. A. N. Sedyama, J. L. M. Nascimento, I. P. C. Lopes, P. C. Lima y S. M. Vidigal, «Tipos de poda em pepino dos grupos aodai, japonés e caipira,» *Horticultura Brasileira*, vol. 32, n.º 4, pp. 491-496, 2014.
- [19] J. López-Elías, S. Garza, M. A. Huez, J. Jiménez, E. O. Rueda y B. Murillo, «Producción de pepino (*Cucumis sativus* L.) en función de la densidad de plantación en condiciones de invernadero,» *European Scientific Journal*, vol. 11, n.º 24, pp. 25-36, 2015.
- [20] Centro de Exportación e Inversión de la República Dominicana, «Perfil económico del pepino (*Cucumis sativus* L.)», 2008. [En línea]. Disponible en http://cei-rd.gov.do/estudios_economicos/estudios_productos/perfiles/PEPINO.pdf.
- [21] Johnny's Selected Seeds, «Cucumber types and terminology,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.johnny-seeds.com/assets/information/cucumbers-types-terminology-8989.pdf>.
- [22] A. Musmade y U. Desai, *Tratado de ciencia y tecnología de las hortalizas: el pepino y el melón*. Zaragoza, España: Acribia, 2003.
- [23] K. Chacón-Padilla y J. E. Monge-Pérez, «Rendimiento y calidad de pepino (*Cucumis sativus* L.) cultivado bajo invernadero,» *Revista Pensamiento Actual*, vol. 17, n.º 29, pp. 39-50, 2017.
- [24] S. A. A. M. Hossain, L. Wang, and H. Liu, «Improved greenhouse cucumber production under deficit water and fertilization in Northern China,» *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 11, no. 4, pp. 58-64, 2018.
- [25] A. I. I. Cardoso, «Avaliação de linhagens e híbridos experimentais de pepino do grupo varietal japonês sob ambiente protegido,» *Bragantia*, vol. 66, n.º 3, pp. 469-475, 2007.
- [26] A. Nair, B. H. Carpenter, and L. K. Weieneth, «Effect of plastic mulch and trellises on cucumber production in high tunnels,» 2013. [En línea]. Available: http://lib.dr.iastate.edu/farms_reports/1909.
- [27] F. V. Barraza-Álvarez, «Calidad morfológica y fisiológica de pepinos cultivados en diferentes concentraciones nutrimentales,» *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, vol. 9, n.º 1, pp. 60-71, 2015.
- [28] G. Ramírez, E. Rico, A. Mercado, R. Ocampo, R. G. Guevara, G. M. Soto y H. Godoy, «Efecto del manejo cultural y sombreado sobre la productividad del cultivo del pepino (*Cucumis sativus* L.)», *Ciencia@UAQ*, vol. 5, n.º 1, pp. 1-9, 2012.
- [29] O. I. Monsalve, H. A. Casilimas y C. R. Bojacá, «Evaluación técnica y económica del pepino y el pimentón como alternativas al tomate bajo invernadero,» *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, vol. 5, n.º 1, pp. 69-82, 2011.
- [30] R. L. Grijalva, R. Macías, S. A. Grijalva y F. Robles, «Evaluación del efecto de la fecha de siembra en la productividad y calidad de híbridos de pepino europeo bajo condiciones de invernadero en el noroeste de Sonora,» *Biotécnica*, vol. 13, n.º 1, pp. 29-36, 2011.

- [31] J. López-Elías, J. C. Rodríguez, M. A. Huez, S. Garza, J. Jiménez y E. I. Leyva, «Producción y calidad de pepino (*Cucumis sativus* L.) bajo condiciones de invernadero usando dos sistemas de poda», *IDESIA*, vol. 29, n.º 2, pp. 21-27, 2011.
- [32] C. Ramírez-Vargas, «Extracción de nutrientes, crecimiento y producción del cultivo de pepino bajo sistema de cultivo protegido hidropónico», *Tecnología en Marcha*, vol. 32, n.º 1, pp. 107-117, 2019.
- [33] C. G. Sandí, «Crecimiento, producción y absorción nutricional del cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.) con dos soluciones nutritivas en ambiente protegido en la zona de San Carlos, Costa Rica», 2016.
- [34] V. M. Olalde, A. A. Mastache, E. Carreño, J. Martínez y M. Ramírez, «El sistema de tutorado y poda sobre el rendimiento de pepino en ambiente protegido», *Interciencia*, vol. 39, n.º 10, pp. 712-717, 2014.
- [35] L. Rojas y V. Alfaro, «Densidad de plantación en tomate y pepino ensalada,» s.f.. [En línea]. Disponible en <http://www2.inia.cl/medios/biblioteca/ta/NR18315.pdf>.
- [36] F. V. Barraza, «Acumulación de materia seca del cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.) en invernadero», *Temas Agrarios*, vol. 17, n.º 2, pp. 18-29, 2012.

Plan de acción para la gestión de las aguas residuales especiales de la ciudad de La Libertad, El Salvador

Action plan for the management of special wastewater in the city La Libertad, El Salvador

Francisco Rosales-Ayala¹, Cristian Moreira-Segura²,
Roel Campos-Rodríguez³

Rosales-Ayala, F; Moreira-Segura, C; Campos-Rodríguez, R.
Plan de acción para la gestión de las aguas residuales especiales de la ciudad de La Libertad, El Salvador. *Tecnología en Marcha*. Vol. 33-2. Abril-Junio 2020. Pág 119-136.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v33i2.4344>

Fecha de recepción: 28 de junio de 2019
Fecha de aprobación: 19 de setiembre de 2019



- 1 Investigador. Universidad Estatal a Distancia, Costa Rica. Correo electrónico: francisco.rosales@attechs.com.
 <https://orcid.org/0000-0001-9422-8046>
- 2 Doctor en Ciencias Naturales para el Desarrollo. Profesor-investigador de la Escuela de Idiomas y Ciencias Sociales. Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: cmoreira@tec.ac.cr.
 <https://orcid.org/0000-0003-3047-2415>
- 3 Doctor en Ciencias Naturales para el Desarrollo. Profesor-investigador de la Escuela de Agronegocios y coordinador del Área Académica Agroforestal, Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: rocampos@tec.ac.cr.
 <https://orcid.org/0000-0003-4460-2313>

Palabras clave

Plan de Acción; aguas residuales de tipo especial; competencias; barreras ambientales.

Resumen

Este artículo describe el proceso de elaboración de un plan de acción que contribuya a mejorar la gestión de las aguas residuales de tipo especial que se generan en el sector comercial de la ciudad de La Libertad, en El Salvador, como un aporte académico a la construcción de competencias para la gestión ambiental en general y la gestión de las aguas residuales de tipo especial, en particular.

La metodología de elaboración del plan de acción fue participativa, de ahí que se conformó un grupo gestor constituido por los actores directamente vinculados a la generación y gestión de las aguas residuales.

El plan de acción se formuló con el objetivo de reducir la contaminación ambiental por las aguas residuales especiales y está estructurado en tres ejes de intervención: político, educación ambiental y técnico-científico. Dada la importancia de la educación ambiental, se desarrolló una prueba piloto que consistió en talleres de capacitación con los sectores directamente relacionados con la generación y gestión de las aguas residuales de tipo especial.

Keywords

Action plan; wastewater of special type; competencies; environmental barriers.

Abstract

This article describes the preparation of an action plan to improve the management of wastewater of special type generated in the commercial sector of the city La Libertad, in El Salvador; as an academic contribution to development of competencies for environmental management in general and management of special type wastewater, in particular.

The methodology for the preparation of the action plan was participatory; as a result, a management group was formed by stakeholders directly involved in the generation and management of wastewater

The objective of the action plan is to reduce environmental pollution by special wastewater generated by the economic activity of the city La Libertad; and the plan is structured according to three areas of intervention: political, environmental education, and technical-scientific. Given the importance of environmental education, a pilot test was developed, that consisted of training workshops with sectors directly related to the generation and management of wastewater of special type.

Introducción

Los procesos de planificación territorial a escala local comenzaron a desarrollarse en El Salvador desde principios de los años 90, después de los Acuerdos de Paz de 1992. Justo por el contexto de postguerra, estos procesos de planificación estaban centrados principalmente en atender necesidades de infraestructura y servicios básicos en las poblaciones locales [1].

Hacia finales de los años 90, tras el Huracán Mitch, que afectó la región centroamericana y el país, los planes de desarrollo local comenzaron a tocar otros temas vinculados a la gestión

ambiental, el ordenamiento territorial, la gestión de riesgos y el desarrollo económico local. Sobre la gestión ambiental, los planes de desarrollo municipal han abordado desde entonces temáticas clave como la gestión de los residuos sólidos; sin embargo, poco se ha tratado la temática de los vertidos líquidos [1].

La ciudad de La Libertad es la cabecera del municipio del mismo nombre (figura 1). Sus principales actividades se concentran en el turismo y el comercio. La Libertad es la ciudad costera más importante de El Salvador por sus playas, belleza escénica, gastronomía y su cercanía a la ciudad capital, San Salvador (30,4 km). Tiene una extensión de 8 km² y el municipio al cual pertenece, de 162 km² [2] [3].



Figura 1. Vista de la ciudad de La Libertad.

El municipio tiene una población total de 40 867 habitantes, de los cuales 7 980 viven en la ciudad de La Libertad; esta cuenta con servicios básicos y equipamiento urbano que convierten al municipio en un centro para el comercio con los municipios que lo rodean [2].

El municipio de La Libertad se rige por el Plan Estratégico Participativo, elaborado en el año 2014, el cual establece nueve ejes estratégicos, estructurados en cuatro ámbitos de intervención: político-institucional, ambiental, económico y sociocultural. En el ambiental, el Plan incluye dos programas de intervención: el primero para la gestión de riesgos y el segundo la mejora de las condiciones ambientales del municipio.

En este último programa, las actividades planificadas se centran en el desarrollo de jornadas de educación ambiental y la construcción de infraestructura de saneamiento básico (letrinas). La priorización de estos dos proyectos evidencia la problemática existente en el municipio debido a una deficiente gestión de los vertidos líquidos [3].

En la investigación “Evaluación de la gestión de las aguas residuales de tipo especial generadas en el sector comercial de la ciudad de La Libertad” [2], se determinó que la presión sobre los recursos naturales procede t de los habitantes del municipio, como de los turistas nacionales e internacionales que visitan las playas y restaurantes de la zona, y de los pobladores de los territorios aledaños, quienes comercializan productos y buscan servicios sociales en la ciudad de La Libertad.

Esta presión social, unida a las condiciones precarias del sistema de alcantarillado, la baja eficiencia de los sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales, la debilidad institucional de la Municipalidad y la poca participación ciudadana inciden fuertemente en el deterioro de las condiciones ambientales de la ciudad [4].

Los estudios realizados a las aguas residuales provenientes de los restaurantes y del Mercado Municipal muestran valores muy por arriba de los establecidos en la normativa nacional salvadoreña para parámetros como DBO₅ (Demanda Biológica de Oxígeno, mg/l), DQO (Demanda Química de Oxígeno, mg/l), Aceites y Grasas, y Sólidos Suspendidos Totales, lo cual claramente está generando impactos negativos en la salud de los habitantes y turistas, así como daños en los ecosistemas acuáticos y terrestres, y afectación al sector económico de La Libertad [5].

Un factor determinante para generar cambios sostenibles es el nivel de involucramiento de los pobladores locales en la gestión de los vertidos líquidos. De acuerdo con la investigación de Rosales, Moreira y Campos [6], existen mayores conocimientos sobre gestión integral de aguas residuales en el personal técnico de la Municipalidad (61%); disminuyen en los actores políticos, que para este caso son los miembros del Concejo Municipal, (51%) y, son menores entre los responsables de los restaurantes y negocios del Mercado Municipal (38%).

En cuanto a las actitudes, todos los sectores estudiados en la misma investigación presentan tendencias positivas, tal es así que el 92% de los encuestados consideran que la gestión actual de las aguas residuales está ocasionando un problema ambiental; el 89% estaría dispuesto a asistir a capacitaciones, y el 97% muestra una actitud positiva para el trabajo colaborativo con los otros actores [6].

La investigación también demuestra que existen barreras conceptuales, actitudinales y de control. Los tres estratos estudiados señalaron no conocer con certeza las consecuencias negativas de una inadecuada gestión de las aguas residuales (barreras conceptuales); expresaron que no cuentan con mecanismos que faciliten una adecuada gestión de las aguas residuales, dado que carecen de recipientes y espacios adecuados para realizar la separación de los residuos (barreras de control), además de la falta de interés por separarlos (barreras actitudinales), y, si bien es cierto hay actitudes positivas hacia las capacitaciones, expresaron que la falta de tiempo es una barrera para ellos [6].

Para generar impactos positivos en la gestión integral de las aguas residuales, es necesario incorporar un componente de educación ambiental en el plan de acción, de tal forma que se puedan derribar las barreras de conocimiento, actitudinales y de control que actualmente existen para los tres grupos de actores directamente relacionados con la gestión de las aguas residuales de tipo especial ya mencionados: actores políticos, el personal técnico y los representantes de los restaurantes y negocios en el Mercado Municipal.

En este artículo se presenta un plan de acción que contribuya a la gestión de las aguas residuales de tipo especial que se generan en el sector comercial de la ciudad de La Libertad, que incorpora el componente educacional, como un aporte académico a la construcción de competencias para la gestión ambiental en general y la gestión de los vertidos líquidos en particular.

Planificación, participación ciudadana y desarrollo de competencias

Los tres conceptos centrales que orientan el proceso de construcción del plan de acción para aguas residuales de la ciudad La Libertad son planificación, participación ciudadana y competencias.

Sobre el primer concepto, una de las definiciones más sencillas y claras es la de Sandoval [7], “la planificación es el pensamiento que precede a la acción”, según esta, la planificación es parte de un proceso amplio y tiene como objetivo orientar la implementación de iniciativas concretas.

Ampliando el concepto, Sandoval [7] establece que la planificación es “el conjunto de procedimientos para relacionar lo que se quiere lograr (objetivos) con la forma de lograrlo (estrategia) y los instrumentos de que se dispone para tales propósitos (políticas, programas, presupuestos)”.

En este sentido, plan de acción es una herramienta concreta, en concreto responde a la problemática que se quiere atender, e implica la definición de objetivos, ejes de acción, actividades, metas y responsables.

Para desarrollar los procesos de planificación, se pueden utilizar una serie de metodologías. Una de ellas es la metodología de Marco Lógico, que de acuerdo con Ortegón, Pacheco y Prieto [8] es “una herramienta para facilitar el proceso de conceptualización, diseño, ejecución y evaluación de proyectos”. Se basa en el análisis de la problemática a la cual se quiere dar solución, y permite priorizar objetivos y establecer acciones y metas concretas para alcanzarlos.

Según Aldunate y Córdoba [9], la metodología de Marco Lógico “recoge lo propuesto por la Escuela Conductual –fijar resultados y dejar actuar–, y lo combina con otro aporte de la visión sistémica: el desglose analítico de objetivos”. Este proceso habitualmente implica la construcción del árbol de problemas y del árbol de objetivos, como parte de lo que los autores denominan desglose analítico.

Dicho desglose supone identificar la relación causa-efecto, tanto en la definición de los problemas, como en la identificación de los objetivos; los cuales organiza por orden de prioridad, estableciendo también las relaciones existentes entre ellos. Luego de efectuar este desglose analítico, se procede a la construcción de la Matriz de Marco Lógico.

Un elemento sustancial para lograr que estos procesos de planificación sean realmente efectivos y pasen de ser instrumentos técnicamente bien formulados, a herramientas útiles que realmente orienten la gestión municipal, es lograr una buena articulación entre lo técnico y lo participativo [10] [11].

Así lo expresan Sánchez y Terrones [12]: “la participación ciudadana es uno de los elementos que contribuyen a profundizar la democracia, pero sobre todo que posibilita la mejora en las condiciones de vida de la población, ante la ineficiencia en los procesos de planeación y falta de representatividad del sistema de planeación tradicional, que se caracteriza por diseñar, ejecutar y dar seguimiento a lineamientos establecidos, de manera unilateral”.

De acuerdo con González y Velásquez [13], la participación ciudadana es “el proceso a través del cual distintos sujetos sociales y colectivos, en función de sus respectivos intereses y de la lectura que hacen de su entorno, intervienen en la marcha de los asuntos colectivos con el fin de mantener, reformar o transformar el orden social y político”.

Esta participación, la formulación de un plan de acción para el manejo de los vertidos líquidos, supone el compromiso de los actores y sectores que tienen una relación directa con la generación de aguas residuales especiales; quienes, en el municipio de La Libertad, son los dueños y colaboradores de los restaurantes locales y del Mercado Municipal.

También se requiere la participación de los actores técnicos y políticos de la Municipalidad, quienes deben asumir un rol protagónico en la formulación, implementación y evaluación del plan de acción.

En la medida que se logre una buena participación en la formulación e implementación del plan de acción de los vertidos líquidos en la ciudad de La Libertad, se contribuirá a la generación

de las competencias necesarias en estos tres grupos de actores, entendiendo “competencias” como “la capacidad o conjunto de capacidades que se consiguen por la movilización combinada e interrelacionada de conocimientos, habilidades, actitudes, valores, motivaciones y destrezas, además de ciertas disposiciones para aprender y saber” [14].

Metodología

Se utilizó una metodología participativa, siguiendo las fases del Marco Lógico: desglose analítico y formulación de la Matriz de Marco Lógico.

El desglose analítico incluyó la construcción participativa de un árbol de problemas y de un árbol de objetivos, con base en los resultados de la investigación “Evaluación de la gestión de las aguas residuales de tipo especial generadas en el sector comercial de la ciudad de La Libertad” [2].

Para la formulación del plan se conformó un grupo gestor constituido por quince personas: cuatro técnicos de la Alcaldía Municipal, un representante del Alcalde Municipal, un concejal, cuatro representantes del sector restaurantes y dos del Mercado Municipal, un consultor externo y dos especialistas del área académica. Los técnicos municipales participantes fueron representantes de las unidades de “Medio Ambiente”, “Saneamiento”, “Planificación” y “Catastro”.

Se realizaron 21 reuniones de planificación entre los meses de diciembre 2018 a marzo 2019. A finales de este último mes, se realizó una presentación preliminar a los miembros del Concejo Municipal.

El proceso de formulación del plan se realizó en seis etapas (figura 2):

1. Caracterización de la gestión de las aguas residuales de la Administración Municipal [4];
2. Caracterización de los efluentes de restaurantes y evaluación de la planta de tratamiento municipal y su impacto en el río Chilama [5];
3. Encuesta sobre conocimientos, actitudes y barreras ambientales en el sector político y técnico de la Alcaldía Municipal y los representantes de restaurantes y negocios del Mercado Municipal (persona mayor de edad que estaba disponible en ese momento y era la encargada del negocio) [6];
4. Desglose analítico, que incluyó la formulación del árbol de problemas y del árbol de objetivos, con los insumos de las etapas previamente realizadas;
5. Identificación de ámbitos de intervención, actividades, metas e indicadores tomando como referencia el Marco Lógico, y
6. Presentación preliminar al Concejo Municipal de La Libertad.

Etapa 1. Caracterización de la gestión de aguas residuales

Para la realización de esta fase se realizaron consultas en fuentes secundarias y entrevistas semiestructuradas al personal técnico y político de la Alcaldía Municipal. El instrumento de entrevistas fue validado por criterio experto con especialistas en gestión de vertidos líquidos, educación ambiental y gestión territorial y se realizó una prueba piloto para depurarlo. Las personas que participaron en la validación no fueron tomadas en cuenta en la entrevista final.

Además, se realizaron visitas a diferentes puntos de la ciudad para constatar los problemas de salubridad, falta de mantenimiento de trampas de grasas, alcantarillado de aguas lluvias y las condiciones de la planta de tratamiento municipal [4].

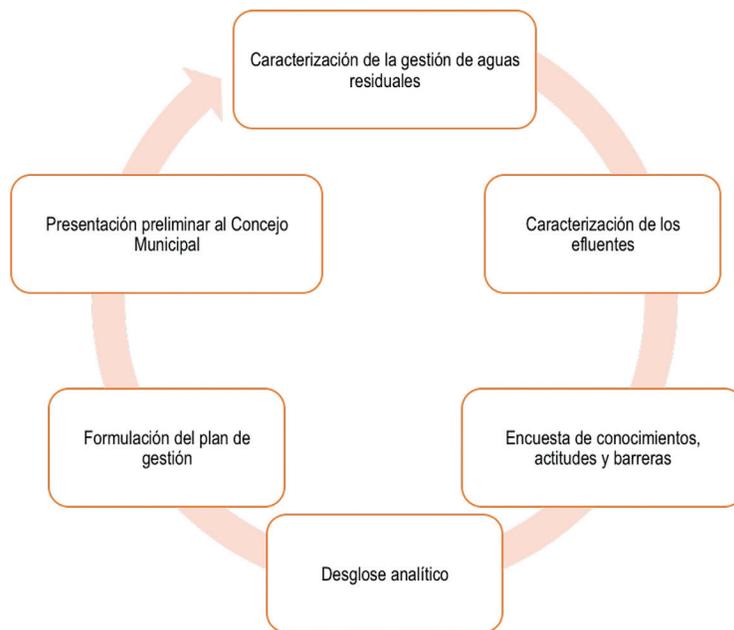


Figura 2. Metodología de planificación

Etapa 2. Caracterización de los efluentes

En esta etapa se realizaron muestreos compuestos en las descargas de restaurantes y Mercado Municipal, en el influente y efluente de la planta de tratamiento municipal y en el río Chilama en donde descarga la planta de tratamiento [5].

Etapa 3. Encuesta de conocimientos, actitudes y barreras

Se definieron los siguientes tres estratos de trabajo: a) Restaurantes y negocios del Mercado Municipal, b) personal técnico, conformado por actores involucrados en la gestión ambiental de la ciudad de La Libertad y c) actores políticos, constituido por todas las personas del Concejo Municipal y el alcalde.

Se realizaron dos tipos de encuestas: una aplicada a los representantes de restaurantes y negocios del Mercado Municipal y otra, aplicada a los otros dos estratos. Las respuestas conseguidas permitieron obtener información sobre conocimientos, actitudes y barreras ambientales [6].

Etapa 4. Desglose analítico

En esta etapa participaron activamente los miembros del equipo gestor. El proceso tomó como insumos los resultados de las investigaciones realizadas en las tres etapas anteriores, con lo cual el equipo gestor trabajó de forma participativa en la construcción del árbol de problemas y el árbol de objetivos, siguiendo la metodología de Marco Lógico.

Etapa 5. Formulación del plan de acción

Retomando los planteamientos del desglose analítico, se trabajó en una matriz de planificación, siguiendo los elementos definidos por la Matriz de Marco Lógico, pero incorporando una columna para incluir la fuente de financiamiento.

Además se trabajó en un cronograma y un presupuesto general, con el cual el Gobierno municipal puede realizar la gestión financiera para implementar las propuestas del plan. Todos

estos productos fueron desarrollados en un total de veintiún talleres participativos, con las quince personas que conformaron el grupo gestor, entre los meses de diciembre de 2018 y marzo de 2019.

Etapa 6. Presentación al Concejo Municipal

Se realizó una presentación preliminar del plan de acción para aguas residuales especiales en la ciudad de La Libertad al Concejo Municipal en marzo 2019. La presentación fue acompañada por el grupo gestor del proceso de planificación.

Resultados

El árbol de problemas elaborado como parte del proceso de análisis de la situación actual de las aguas residuales en la ciudad de La Libertad muestra como problema central el incremento de la contaminación ambiental por aguas residuales especiales (figura 3), el cual se debe a tres principales causas:

La ciudad cuenta con una infraestructura sanitaria deficiente debido a que la planta de tratamiento municipal alcanza solo un 50% de remoción de la carga orgánica; la red de alcantarillado está en malas condiciones y ya cumplió su vida útil, y hay muy pocas trampas de grasa en los negocios generadores de aguas residuales especiales [4].

Existe poco conocimiento entre los responsables de restaurantes y negocios del Mercado Municipal, y los actores técnicos y políticos de la municipalidad de La Libertad sobre temáticas vinculadas a la gestión ambiental (un promedio de 50%); también indica que hay otras barreras actitudinales y de control, que generan una educación ambiental escasa [6].

Hay una gestión ambiental municipal insuficiente, que se manifiesta en la debilidad institucional para aplicar las normativas ambientales vigentes, recursos técnicos y financieros insuficientes, débil articulación con el Gobierno nacional y mobiliario urbano insuficiente para el saneamiento ambiental [4].

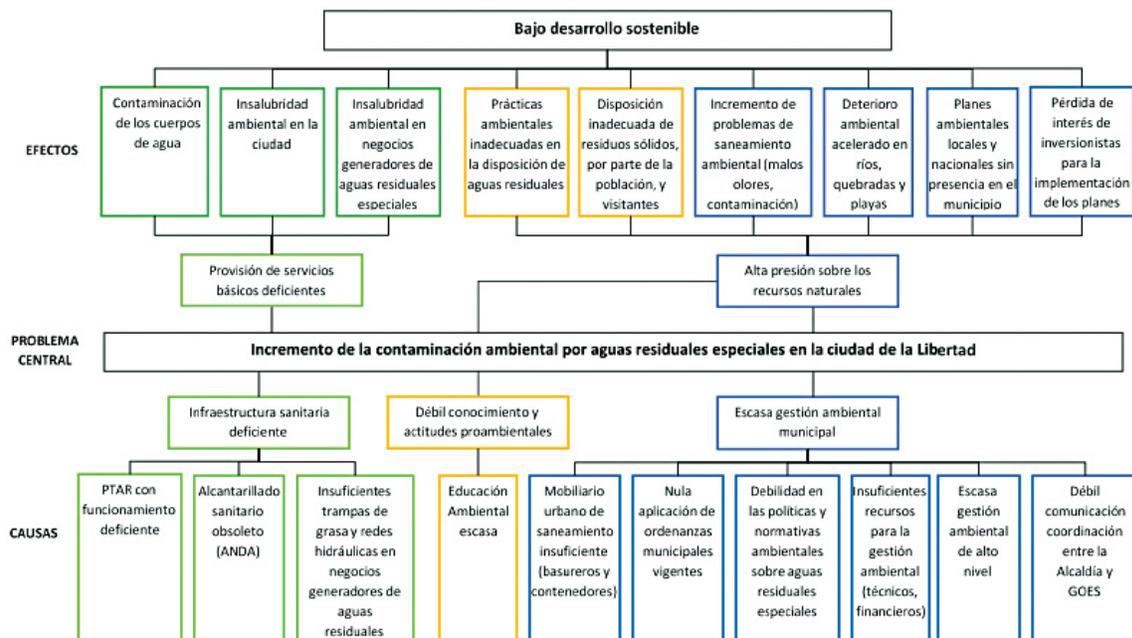


Figura 3. Árbol de problemas

Los efectos generados a partir de los tres problemas se han agrupado en dos: primero, la provisión de servicios básicos deficiente, lo cual provoca insalubridad ambiental en la ciudad y en los negocios generadores de agua, y segundo, una alta presión sobre los recursos naturales, debido a las prácticas ambientales inadecuadas; el incremento de problemas que dificultan el saneamiento ambiental, como malos olores y contaminación visual, y el deterioro acelerado de los recursos, como ríos, quebradas y playas. Todo esto impacta fuertemente en la actividad turística y la calidad de vida de los habitantes de la ciudad, generando finalmente un bajo desarrollo sostenible.

Con base en este análisis, el equipo gestor trabajó en la formulación del árbol de objetivos (figura 4), el cual establece como objetivo central el de reducir la contaminación ambiental por aguas residuales especiales, que se logrará mediante el cumplimiento de tres objetivos específicos:

1. Fortalecer de manera eficaz la gestión ambiental municipal
2. Mejorar las competencias ambientales de los responsables de restaurantes y negocios del Mercado Municipal y de los actores técnicos y políticos de la Municipalidad de La Libertad
3. Incrementar la eficiencia de la infraestructura sanitaria

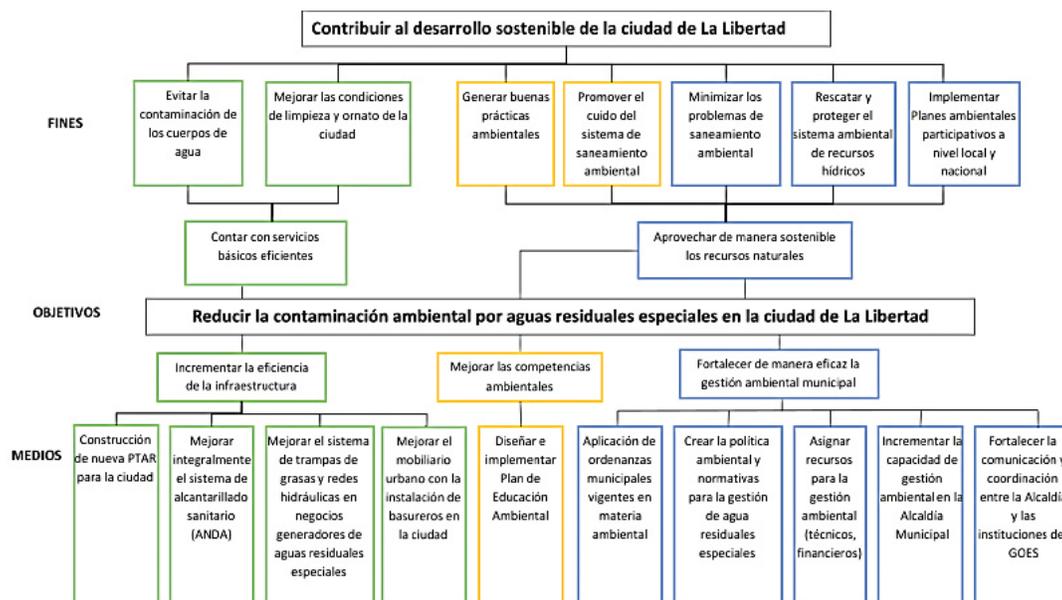


Figura 4. Árbol de objetivos

Con la implementación de estos objetivos se espera alcanzar dos grandes fines: contar con servicios básicos eficientes y aprovechar de manera sostenible los recursos naturales, de tal forma que se logre contribuir al desarrollo sostenible de la ciudad de La Libertad.

Plan de Acción para la gestión de las aguas residuales especiales

El plan de acción que aquí se presenta comprende un período de duración de seis años, equivalentes a dos períodos de gestión municipal, debido a que el grupo gestor del plan consideró que un período de tres años es corto y no permite cambios sustanciales en la gestión municipal.

Objetivos del plan de acción

Tal como se ha dicho anteriormente, el objetivo central del plan de acción es contribuir a la reducción de la contaminación ambiental por las aguas residuales especiales en la ciudad de La Libertad; se desglosa en tres objetivos específicos: fortalecer de manera eficaz la gestión ambiental municipal; mejorar las competencias ambientales de los responsables de los restaurantes y negocios del mercado municipal, así como de los actores técnicos y políticos de la municipalidad; e incrementar la eficiencia de la infraestructura sanitaria.

Cada uno de estos objetivos específicos responde a tres competencias generales que se espera desarrollar en los actores:

- Establecer mecanismos de comunicación, asignación de recursos y formulación de políticas para la gestión de las aguas residuales especiales en el ámbito de toma de decisiones municipales.
- Impulsar planes y talleres de capacitación y sensibilización en educación ambiental.
- Dotar con la infraestructura sanitaria necesaria y monitorear la calidad de los vertidos en los efluentes y cuerpos de agua directamente impactados.

Estos objetivos específicos y competencias por desarrollar se concretan en tres ejes estratégicos de intervención: político, educación ambiental y técnico-científico (Figura 5).



Figura 5. Relación entre problemas, objetivos, competencias y ejes de intervención.

Ejes estratégicos de intervención

A continuación, se presenta cada uno de estos ejes de intervención, siguiendo la estructura de la Matriz de Marco Lógico, que incluye actividades, metas, indicadores, medios de verificación, tiempo, fuentes de financiamiento y responsables.

Eje político

Las actividades previstas en este eje están orientadas al fortalecimiento de la gestión ambiental de los actores técnicos y políticos de la Municipalidad, mediante el desarrollo de

las competencias necesarias para favorecer la articulación con instituciones del Gobierno central en un comité interinstitucional, el cual estaría formado por entidades como el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA), el Ministerio de Salud y Asistencia Social (MINSAL), el Ministerio de Turismo (MITUR), la Policía Nacional Civil (PNC) y la Alcaldía Municipal.

Dicho comité tendrá como propósito el de promover el desarrollo sostenible de la ciudad.

En este eje se incluyen también actividades clave como la elaboración de la Política de Gestión Ambiental (cuadro 1), que tiene como finalidad proporcionar los lineamientos estratégicos para la gestión ambiental, tal cual lo establece el MARN [15]; la creación de ordenanzas municipales para lograr instaurar un marco legal regulatorio de las actividades económicas que influyen en el estado de los recursos naturales, y la asignación de recursos técnicos y financieros, como aspecto importante para el desarrollo de todas las actividades en el plan.

Cuadro 1. Planificación en el eje político

Competencia por desarrollar Establecer mecanismos de comunicación, asignación de recursos y formulación de políticas para la gestión de las aguas residuales especiales en el ámbito de toma de decisiones municipales						
Objetivo específico 1 Fortalecer de manera eficaz la gestión ambiental de la Municipalidad de La Libertad						
Actividades	Meta	Indicadores	Medios de verificación	Tiempo	Fuentes de financiamiento	Responsable
Fortalecer la comunicación entre Alcaldía y las instituciones del Gobierno Central (GOES)	Conformación del comité interinstitucional Reuniones bimensuales	Comité interinstitucional conformado Actas de reuniones	Acta de juramentación Listado de asistencia Registro fotográfico Libro de actas	3 meses para conformar 6 años	Recursos propios y de instituciones del GOES participantes	Alcaldía
Capacitar al Concejo Municipal y jefaturas en materia de políticas para la gestión ambiental	Dos talleres sobre políticas y gestión ambientales impartidos a miembros del Concejo Municipal y jefaturas	Número de asistentes a los talleres	Listado de asistencia Registro fotográfico Encuesta de satisfacción	1 año	Gestión con Instituto Salvadoreño de Desarrollo Municipal – ISDEM	Alcaldía
Asignar recursos técnicos y financieros para la gestión ambiental municipal	Recursos técnicos y financieros para la implementación del Plan de Acción.	Porcentaje de incremento de recursos financieros Número de técnicos vinculados a la gestión ambiental municipal	Planillas de personal y presupuesto municipal	3 años	Gestión con ISDEM y con Cooperación Internacional	Alcaldía

Continúa...

Continuación

Competencia por desarrollar Establecer mecanismos de comunicación, asignación de recursos y formulación de políticas para la gestión de las aguas residuales especiales en el ámbito de toma de decisiones municipales						
Objetivo específico 1 Fortalecer de manera eficaz la gestión ambiental de la Municipalidad de La Libertad						
Actividades	Meta	Indicadores	Medios de verificación	Tiempo	Fuentes de financiamiento	Responsable
Elaborar la Política de Gestión Ambiental, e instrumentos legales para la gestión de aguas residuales especiales	Política de Gestión Ambiental e instrumentos legales formulados y aprobados por el Concejo Municipal.	Política ambiental formulada y aprobada Instrumentos legales formulados y aprobados Listados de participantes en consultas ciudadanas Número de participantes en consultas ciudadanas	Política ambiental publicada en Diario Oficial Instrumentos legales publicados en el Diario Oficial Listados de participantes en consultas ciudadanas	1 año	Recursos propios y Cooperación Internacional	Alcaldía y MARN
Aplicar ordenanzas municipales vigentes	100% de las ordenanzas en vigencia en 3 años	Número de hallazgos por incumplimiento 33% de reducción anual	Informes trimestrales de monitoreo de cumplimiento	6 años	Recursos propios	Alcaldía

Eje de educación ambiental

Las actividades en este eje buscan incidir en la mejora de las competencias en sostenibilidad ambiental de los actores que directamente son generadores de aguas residuales especiales y de aquellos que tienen bajo su responsabilidad la gestión del manejo de dichos vertidos.

Para ello se ha incluido una actividad fundamental como es la formulación de un plan de educación ambiental (cuadro 2), el cual reúne el diseño y difusión de material educativo y de sensibilización, y la realización de talleres de formación para el desarrollo de competencias ambientales.

Dada la importancia de este eje de intervención, se realizó una prueba piloto que consistió en la realización de talleres de formación para los tres grupos de actores meta, con el objeto de incidir directamente en la superación de las barreras de conocimiento, actitudinales y de control identificadas en el proceso de investigación.

En el siguiente apartado se describe con mayor detalle en qué consistió y qué resultados se obtuvieron de esta prueba piloto.

Eje técnico-científico

Las acciones previstas en este eje de intervención buscan generar las condiciones necesarias para incrementar la eficiencia de la infraestructura sanitaria, de tal manera que se superen las barreras de control que actualmente existen en la ciudad.

Cuadro 2. Planificación en el eje de educación ambiental

Competencia por desarrollar						
Impulsan planes y talleres de capacitación y sensibilización en educación ambiental						
Objetivo específico 2						
Mejorar las competencias en los temas ambientales de los responsables de restaurantes y de negocios del Mercado Municipal, así como de actores políticos y técnicos de la Municipalidad						
Actividades	Meta	Indicadores	Medios de verificación	Tiempo	Fuentes de Financiamiento	Responsable
Diseñar plan de educación ambiental	Plan de educación ambiental diseñado e implementado.	Plan de educación acción ambiental avalado por el Concejo Municipal.	Acta de aceptación	6 meses	Recursos propios y Cooperación Internacional	Alcaldía
Diseñar y difundir material educativo y de sensibilización	Cuatro talleres anuales, para atender al 100% de la población objetivo	Un taller trimestral	Listado de asistencia y registro fotográfico	2 años	Recursos propios y Cooperación Internacional	Alcaldía
Realizar talleres de formación para el desarrollo de competencias en temas ambientales, con el sector político y técnico de la Alcaldía, propietarios y colaboradores de los restaurantes	Cuatro talleres anuales, para atender al 100% de la población objetivo	Un taller trimestral Cantidad de participantes	Listado de asistencia y registro fotográfico	2 años	Recursos propios y Cooperación Internacional.	Alcaldía

Cuatro de las actividades programadas están orientadas a aspectos de construcción de infraestructura sanitaria y dotación de mobiliario urbano para la segregación y recolección de residuos sólidos (cuadro 3). Esto es importante, ya que el mal manejo genera problemas de contaminación en ríos, quebradas y playa.

Se incluyen además tres actividades vinculadas al monitoreo de descargas de agua residual especial al alcantarillado sanitario, descargas de la planta de tratamiento municipal y monitoreo de los cuerpos de agua superficiales sobre los cuales descarga la planta.

Los actores responsables de las actividades previstas en este eje estratégico de intervención son la Alcaldía Municipal, el MARN, el ANDA y los responsables de los restaurantes y negocios del Mercado Municipal, generadores de aguas residuales.

El proceso de implementación del Plan de Acción requiere que la Municipalidad de La Libertad priorice las acciones programadas y destine los recursos económicos y técnicos necesarios para su desarrollo; además demanda un esfuerzo importante de gestión con el Gobierno central y con organismos de cooperación internacional, de tal manera que se logre cubrir las inversiones previstas.

Cuadro 3. Planificación den el eje técnico-científico

Competencia por desarrollar						
Dotar con la infraestructura sanitaria necesaria y monitorear la calidad de los vertidos en los efluentes y cuerpos de agua directamente impactados						
Objetivo específico 3						
Incrementar la eficiencia de la infraestructura sanitaria						
Actividades	Meta	Indicadores	Medios de verificación	Tiempo	Fuentes de Financiamiento	Responsable
Gestionar y construir nueva planta de tratamiento de aguas residuales municipales	Construcción de planta de tratamiento	100% de obra terminada Cumplimiento de 100% de normativa nacional en cuanto a parámetros fisicoquímicos	Informes de supervisión de avances del proyecto Informes de monitoreo	3 años	Gestión internacional.	Alcaldía – ANDA
Aumentar la capacidad y la cobertura del sistema de alcantarillado sanitario.	Cobertura en un 100% de la ciudad	33% de avance anual en la cobertura del sistema de alcantarillado	Informes de supervisión de avances del proyecto	3 años	Gestión internacional	ANDA y Alcaldía
Mejorar el sistema de trampas de grasa y redes hidráulicas en los restaurantes y en el Mercado Municipal	100% de los negocios con trampa de grasa y redes hidráulicas, cuando aplique.	Número de negocios con trampas de grasa Redes hidráulicas instaladas por año en 33% de negocios identificados con deficiencias	Informes de supervisión de avances de la instalación	3 años	Inversión privada Fondos propios	Alcaldía, responsables de restaurantes y negocios del Mercado Municipal
Mejorar mobiliario urbano con basureros y contenedores para residuos sólidos	Basureros para distintos tipos de residuos, instalados en principales calles y avenidas	100% de basureros y contenedores instalados	Informes de supervisión y registros fotográficos	1 año	Fondos propios	Alcaldía Municipal
Monitorear la descarga de la planta de tratamiento existente	Cumplimiento de la norma de aguas residuales para la descarga a cuerpo receptor NSO13.49.01:09	Cumplimiento mensual del 100% de parámetros exigidos por la norma	Informes de laboratorio	6 años	Fondos propios	Alcaldía, MARN y ANDA

Continúa....

Continuación

Competencia por desarrollar						
Dotan con la infraestructura sanitaria necesaria y monitorear la calidad de los vertidos en los efluentes y cuerpos de agua directamente impactados						
Objetivo específico 3						
Incrementar la eficiencia de la infraestructura sanitaria						
Actividades	Meta	Indicadores	Medios de verificación	Tiempo	Fuentes de Financiamiento	Responsable
Monitorear aguas arriba y aguas abajo de la descarga de la planta de tratamiento	Cumplimiento de los valores guía de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos adoptados por MARN, para uso recreacional directo	Cumplimiento del 100% de parámetros guía	Informes de laboratorio	6 años	Fondos propios	MARN y Alcaldía
Monitorear descargas de aguas residuales de restaurantes	Cumplimiento de los valores guía de los parámetros fisicoquímicos para descarga a alcantarillado sanitario, adoptados por ANDA	Cumplimiento del 100% de parámetros guía	Informes de laboratorio	6 años	Restaurantes y otros negocios	ANDA y Alcaldía

Prueba piloto

Como se explicó previamente, se implementó una prueba piloto que consistió en el desarrollo de talleres de capacitación con los tres grupos de actores directamente relacionados con la generación y gestión de las aguas residuales de tipo especial, con la finalidad de contribuir a la superación de barreras conceptuales, actitudinales y de control.

Los contenidos temáticos de estos talleres de capacitación fueron orientados a la superación de las barreras identificadas en el estudio “Caracterización de aguas residuales de tipo especial” [5], con especial énfasis en aquellas áreas señaladas como deficientes: conocimientos ambientales relacionados al agua, desarrollo sostenible, gestión de aguas residuales especiales en los puntos de origen, prácticas de producción más limpia, gestión de residuos sólidos.

Dado que los estudios estadísticos muestran que no hay diferencias significativas ($P=0,07$) entre los tres grupos de actores, se desarrollaron las capacitaciones de forma conjunta [5]. Para facilitar la participación de más personas se habilitaron dos horarios, uno por la mañana y otro por la tarde.

Se desarrollaron ocho sesiones de trabajo, de cuatro horas cada una. Participaron un total de 77 personas, de las cuales 43 (55,84%) eran personal técnico y político de la Municipalidad y 34 (44,16%) eran los responsables de 29 restaurantes y negocios del Mercado Municipal.

Se desarrollaron cuatro áreas temáticas (cuadro 4) y se contó con el apoyo del Centro Nacional de Producción Más Limpia.

Cuadro 4. Contenido temático del proceso de capacitaciones

Fechas	Objetivo	Temas	Facilitador
16 – enero – 2019	Informar sobre el impacto de las aguas residuales sobre los recursos naturales	<ul style="list-style-type: none"> • El agua y su importancia • Ciclo del agua y su afectación por el cambio climático • Situación hídrica en El Salvador y en la ciudad de La Libertad • Contaminación de ríos y mares y su capacidad depurativa. 	Francisco Rosales
23 – enero-2019	Dar a conocer sobre la aportación a la contaminación ambiental y la afectación al desarrollo de la ciudad	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminación del agua y sus formas • Normativas nacionales para la descarga de aguas residuales • Tratamiento en sitio: separación de sólidos y usos de trampas de grasa • Sistema de tratamiento de aguas 	Francisco Rosales
30 - enero – 2019	Comprender la relación entre la buena gestión de aguas residuales y la economía de sus negocios	<ul style="list-style-type: none"> • ¿Qué es producción más limpia? • ¿Qué es desarrollo sostenible? • Buenas prácticas para la gestión de aguas • Gestión de residuos sólidos 	Francisco Rosales Luis Umanzor, Producción más Limpia
6- febrero – 2019	Conocer elementos importantes sobre educación ambiental que inciden en su cultura	<ul style="list-style-type: none"> • La educación ambiental y su importancia para el desarrollo sostenible • Conceptos clave: conocimientos, creencias, actitudes, valores y cultura ambiental • Barreras ambientales y sus tipos • Competencias ambientales 	Francisco Rosales

Para valorar si las capacitaciones generaron cambios para la superación de las barreras, se elaboró una lista de cotejo de cinco puntos, en la cual se incluyeron las prácticas que contribuyen a la reducción de la contaminación de las aguas residuales de tipo especial, a saber: el mantenimiento de trampas de grasa, la limpieza en seco de utensilios de cocina y vajillas antes del lavado, la recolección de sólidos en el lavatrastos, la segregación de residuos y la disposición adecuada de grasas y aceites en los restaurantes y negocios del Mercado Municipal.

Dos semanas después de las capacitaciones, se realizó una visita a los restaurantes y negocios del mercado municipal participantes en la prueba piloto y se identificaron 5 negocios con trampas de grasas, de los cuales ninguno realizaba el mantenimiento correcto antes de las capacitaciones. En las visitas se encontró que tres de los cinco lo estaban realizando correctamente; además, se encontró evidencia de que de 6 negocios que antes hacían la limpieza en seco de los utensilios de cocina y vajillas antes del lavado el número aumentó a 21; igualmente, el número de negocios que recolectaban los residuos sólidos en coladores, en los resumideros de los lavatrastos, aumentó de 7 a 16, y el de los que disponían en forma adecuada de grasas y aceites también aumentó de 4 a 26, después de los talleres de capacitación.

En los talleres los participantes compartieron información sobre algunas empresas dedicadas a la compra de aceite usado. En la visita realizada, se comprobó que 18 empresas más, de las cuatro que ya lo hacían, estaban recogiendo el aceite para su posterior venta.

Por su parte, la Municipalidad colocó basureros para segregar y recolectar los residuos sólidos, en algunos puntos clave del Mercado Municipal y plazas de restaurantes, así como dentro de las instalaciones de la Alcaldía Municipal. También se encontró que están realizando de forma periódica (una vez a la semana), y de acuerdo con el procedimiento, la limpieza de las trampas de grasa del Mercado Municipal. Otro elemento significativo es que la Municipalidad gestionó, junto con otras instituciones, la reparación de algunos tramos importantes del alcantarillado sanitario de la ciudad.

Estos cambios en las prácticas de los participantes gracias a las capacitaciones de la prueba piloto demuestran que las personas están en el proceso de superar las barreras conceptuales, actitudinales y de control, puesto que están realizando acciones concretas de cuidado ambiental. Sin embargo, es necesario que el personal de la Unidad Medioambiental de la Municipalidad dé seguimiento a estas acciones para lograr que estos cambios sean sostenibles en el tiempo.

Conclusiones

El plan de acción para la gestión de las aguas residuales especiales responde a los principales problemas que limitan el desarrollo sostenible de la ciudad de La Libertad, caracterizada por la escasa gestión ambiental municipal, el poco conocimiento y las débiles actitudes pro-ambientales entre los actores directamente vinculados con la generación y gestión de las aguas residuales, y la deficiente infraestructura sanitaria con la que cuenta el municipio.

El proceso de formulación del plan de acción mostró que entre las causas importantes que originan los problemas de gestión de las aguas residuales en la ciudad están aquellas vinculadas directamente con la escasa educación ambiental y la ausencia de políticas públicas ambientales en el ámbito municipal. De ahí que las acciones previstas en estos dos ejes son imprescindibles para garantizar la sostenibilidad a largo plazo del proceso.

El eje de intervención política requiere necesariamente de la articulación entre la Municipalidad y el Gobierno central, con sus diferentes carteras de Estado; por ello se vuelve estratégica la creación del Comité Interinstitucional, para articular los esfuerzos previstos en el plan de acción.

Los resultados de los talleres de capacitación desarrollados como parte de la prueba piloto demuestran que es posible mejorar los procedimientos aplicados en los restaurantes y negocios del Mercado Municipal, de tal forma que disminuya el impacto ambiental negativo sobre los cuerpos de agua y los recursos estratégicos para el desarrollo turístico de la ciudad.

El estudio revela que los monitoreos periódicos de aguas en diferentes puntos –descargas de restaurantes, Mercado Municipal, planta de tratamiento y río Chilama– constituyen un medio para velar por la buena gestión de las aguas residuales de tipo especial, de tal forma que mejoran los niveles de calidad de los cuerpos de agua superficiales, permitiendo su uso recreacional de contacto directo.

Los resultados de la investigación demuestran que es imprescindible la inversión en la mejora de la infraestructura sanitaria, con la construcción de una nueva planta de tratamiento municipal, la reparación y ampliación de la red de alcantarillado sanitario, la colocación de basureros para la segregación y recolección de residuos sólidos, el equipamiento de los negocios con trampas de grasa y la mejora de las redes sanitarias internas, para lograr un menor impacto de la actividad económica en los recursos naturales.

Referencias

- [1] Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas” (UCA), “Factores críticos de la planificación del desarrollo territorial en El Salvador”, Editorial, *Revista Estudios Centroamericanos (ECA)*, vol. 70, n.º 743, Antiguo Cuscatlán, El Salvador.
- [2] F. Rosales, “Evaluación de la gestión de las aguas residuales de tipo especial generadas en el sector comercial de la ciudad de La Libertad”, Tesis para optar al grado de doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo, no publicada. Costa Rica, 2019.
- [3] Sacdel, “Plan Estratégico Participativo del municipio de La Libertad”, La Libertad, El Salvador, noviembre 2014.
- [4] F. Rosales-Ayala y Campos-RodríguezR., «Gestión de las aguas residuales en la ciudad La Libertad, El Salvador», *Tecnología en marcha*, vol. 32, n.º 2, pp. Pág. 43-53, may 2019.
- [5] FF. Rosales-Ayala, D. Rovira-Quezada, y R. Campos-Rodríguez, «Calidad de las aguas residuales de tipo especial en la ciudad La Libertad, El Salvador», *Tecnología en marcha*, vol. 32, n.º 3, pp. Pág. 135-145, jul. 2019.
- [6] F. Rosales-Ayala, R. Campos-Rodríguez, y C. Moreira-Segura, «Conocimientos, actitudes y barreras respecto a la gestión de aguas residuales en el sector comercial de la ciudad de La Libertad, El Salvador», *Tecnología en marcha*, vol. 33, n.º 1, pp. Pág. 111-121, feb. 2020.
- [7] C. Sandoval, *Métodos y aplicaciones de la planificación regional y local en América Latina*, Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social (ILPES), Serie Desarrollo Territorial, n.º 17. Santiago de Chile, 2014. [En línea] Disponible en https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/36967/S201436_es.pdf;jsessionid=8112F85D870BB7286B4B9DC3F9215A02?sequence=1 [Recuperado el 12 de marzo, 2019]
- [8] E. Ortegón, J. Pacheco y A. Prieto, *Metodología del Marco Lógico para la planificación, el seguimiento y la evaluación de proyectos y programas*, Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social (ILPES), Serie Manuales. Santiago de Chile, julio 2005. [En línea]. Disponible en https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=r_lrVhgf1akC&oi=fnd&pg=PA2&dq=marco+l%C3%B3gico&ots=soTvTQ5fFu&sig=E869MMWmNWeHQpXS0F6WvjRCSUs#v=onepage&q=marco%20%C3%B3gico&f=false [Recuperado 20 de marzo de 2019]
- [9] E. Aldunate y J. Córdoba, *Formulación de programas con la metodología de marco lógico*, Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social (ILPES), Serie Manuales, n.º 68. Santiago de Chile, 2011. [En línea] Disponible en http://bibliotecadigital.planejamento.gov.br/xmlui/bitstream/handle/ிடitem/500/05%20Marco%20Logico_ILPES.pdf?sequence=1 [Accedido 20 de marzo de 2019]
- [10] M. Canto Chac, “Gobernanza y participación ciudadana en las políticas públicas frente al reto del desarrollo”. [En línea]. Disponible en <http://www.scielo.org.mx/pdf/polcul/n30/n30a2.pdf> [Recuperado el 22 de marzo de 2019].
- [11] A. Terrones-Cordero, “Planeación participativa para elaborar un plan de desarrollo municipal: el caso de Acaxochitlán, Hidalgo”, *Economía, Sociedad y Desarrollo*, vol.13, n.º.42. México, 2013. [En línea] Disponible en http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-84212013000200009 [Recuperado el 15 de marzo de 2019]
- [12] Y. Sánchez y A. Terrones, “Estrategias participativas para el desarrollo integral de la producción forraje-leche en la región de Tulancingo (México)”, *Gestión y Análisis de Políticas Públicas (GAPP)*, *Nueva Época*, n.º 13, enero-julio, 2015. [En línea]. Disponible en <https://revistasonline.inap.es/index.php?journal=GAPP&page=articulo&op=view&path%5B%5D=10233&path%5B%5D=10721> [Recuperado el 20 de marzo de 2019].
- [13] E. González y F. Velásquez, “La planeación participativa en Bogotá. Análisis y Propuestas”, Bogotá, Colombia, enero 2004. [En línea]. Disponible en http://www.institutodeestudiosurbanos.info/dmdocuments/cendocieu/coleccion_digital/Planeacion_Participativa_Bogota/PlaneacionParticipativaBogota_2004.pdf [Recuperado el 22 de marzo de 2019].
- [14] E. Perrusquía, L. Carranza, M. Vásquez, M. García y F. Meza, *Curso básico de formación continua para maestros en servicio. El enfoque por competencias en la Educación Básica*. Secretaría de Educación Pública, México, 2009.
- [15] Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), “Guía para elaborar la política institucional de gestión ambiental”, El Salvador, 2017.

Discovery of Meaningful Rules by using DTW based on Cubic Spline Interpolation

Descubrimiento de reglas significativas mediante el uso de DTW basado en Interpolación Spline Cúbico

Luis-Alexander Calvo-Valverde¹, David-Eías Alfaro-Barboza²

Calvo-Valverde, L; Alfaro-Barboza, D. Discovery Of Meaningful Rules By Using DTW Based On Cubic Spline Interpolation. *Tecnología en Marcha*. Vol. 33-2. Abril-Junio 2020. Pág 137-149.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v33i2.4073>

Fecha de recepción: 19 de abril de 2019
Fecha de aprobación: 3 de agosto de 2019



1 DOCINADE. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. Correo electrónico: lcalvo@tec.ac.cr.

 <https://orcid.org/0000-0003-3802-9944>

2 Maestría en Computación. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: dalfaro@ic-itcr.ac.cr.

Keywords

DTW; SIDTW; Time Series; Rule Discovery; Motif.

Abstract

The ability to make short or long term predictions is at the heart of much of science. In the last decade, the data science community have been highly interested in foretelling real life events, using data mining techniques to discover meaningful rules or patterns, from different data types, including *Time Series*. Short-term predictions based on “*the shape*” of meaningful rules lead to a vast number of applications. The discovery of *meaningful* rules is achieved through efficient algorithms, equipped with a robust and accurate distance measure. Consequently, it is important to wisely choose a distance measure that can deal with noise, entropy and other technical constraints, to get accurate outcomes of similarity from the comparison between two time series. In this work, we do believe that *Dynamic Time Warping* based on *Cubic Spline Interpolation* (SIDTW), can be useful to carry out the similarity computation for two specific algorithms: 1- *DiscoverRules()* and 2- *TestRules()*. Mohammad Shokoohi-Yekta et al developed a framework, using these two algorithms, to find and test meaningful rules from time series. Our research expanded the scope of their project, adding a set of well-known similarity search measures, including SIDTW as novel and enhanced version of DTW.

Palabras clave

DTW; SIDTW; Series de tiempo; Descubrimiento de reglas; Motif.

Resumen

La capacidad de hacer predicciones a corto o largo plazo está en el corazón de gran parte de la ciencia. En la última década, la comunidad de ciencia de datos ha estado muy interesada en predecir eventos de la vida real, utilizando técnicas de minería de datos para descubrir reglas o patrones significativos, de diferentes tipos de datos, incluidas las series temporales. Las predicciones a corto plazo basadas en “la forma” de reglas significativas conducen a una gran cantidad de aplicaciones. El descubrimiento de reglas significativas se logra a través de algoritmos eficientes, equipados con una medida de distancia robusta y precisa. En consecuencia, es importante elegir sabiamente una medida de distancia que pueda lidiar con el ruido, la entropía y otras restricciones técnicas, para obtener resultados precisos de similitud a partir de la comparación entre dos series de tiempo. En este trabajo, creemos que *Dynamic Time Warping* (DTW) basada en la interpolación de splines cúbicos (SIDTW) puede ser útil para llevar a cabo el cálculo de similitud para dos algoritmos específicos: 1- *DiscoverRules()* y 2- *TestRules()*. Mohammad Shokoohi-Yekta et al. desarrollaron un marco, utilizando estos dos algoritmos, para encontrar y probar reglas significativas de series de tiempo. Nuestra investigación amplió el alcance de su proyecto, agregando un conjunto de medidas de búsqueda de similitud bien conocidas, incluyendo SIDTW como una versión novedosa y mejorada de DTW.

Introduction

Prediction and forecasting have been a topic of great interest in the data mining community. Most of the work in the literature has dealt with discrete objects such as: keystrokes, database queries, medical interventions and web clicks [19, 32]. However, prediction may also have

great utility in real-valued time series. We briefly consider two clear examples. The first one fits in the robotic interaction field, where researchers noted the importance of enabling robots with a *short-term predictive capacity*, to control the impedance forces generated by its interaction with humans [10]. Secondly, mining real time weather data to discover predictive rules. The Doppler radar technology introduced in the last two decades, has increased the mean lead time for tornado warnings from 5.3 to 9.5 minutes. But progress seems to have stalled. Around 26% of tornados within the US occurs without warning [3]. McGovern et al in [3], argued that further improvements will come not only from new sensors, but also from yet-to-be-invented algorithms that can examine existing data to discover *predictive rules*.

Most of the current work has attempted to predict the future based on the *current value* of a stream [21]. The actual values are, in fact, nearly irrelevant, but *the shape* of the current pattern may generate better predictive rules.

There is a critical distinction between forecasting and rule-based prediction. The forecasting approach is typically always-on, it predicts values at every time step. In contrast, “*rule-based*” predictions monitor the incoming data at each time step, but only occasionally, makes a prediction about an imminent occurrence of a pattern. On this line, Mohammad Shokoohi-Yekta et al in [28], proposed a rule discovery framework to identify patterns in time series. All these discovered rules, are generated from a ranked candidate list of motifs: a subsequence of the time series is identified twice or more. The motif classification algorithm is computed using Euclidean distance, a widely-known similarity measure [7].

The present work makes four main contributions. First, we upgraded the rule discovery framework created by Mohammad Shokoohi-Yekta et al [28], by incorporating three well-known similarity measures: 1- Manhattan, 2- Minkowski and 3- Dynamic Time Warping.

Second, we added an enhanced and novel version of Dynamic Time Warping (DTW), proposed by the authors in [14], which uses a Cubic Spline Interpolation technique that is capable to produce much less singularities and obtain the best warping path; especially when time series are not suitable for the standard DTW.

Third, we utilized the upgraded version of the framework to carry out a benchmarking for all the these similarity measures. This effort intended to proof that DTW based on Cubic Spline Interpolation (*SIDTW*), can be as efficient as the Euclidean distance to discover meaningful rules in time series.

Finally, we developed a new functional layer upon the framework, to automate the discovery and testing of rules from time series, given a particular similarity distance.

The remainder of the paper is structured as follows. Section two introduces the related work and the intuition behind this shape-based mechanism to identify potential rules in time series. The rule discovery framework is detailed in section three. The experiments have been developed to characterized each similarity measure running upon this framework, its results are discussed in section four. Finally, the conclusions of this research and its speculation about the future work are proposed in section five.

Background

In a set of papers ending in [25], Park and Chu suggested a rule finding mechanism for time series. Their algorithm was evaluated for speed, using random walk data. No evidence was reported that the algorithm could actually find generalizable rules in time series. The research done by Wu and colleagues in [33], did use a piecewise linear representation to support rule discovery in time series. They tested their algorithm on real (financial) data, reporting roughly 68% “*correctness of trend prediction*”. The authors ran their algorithm on data provided by

others. When they ran their program using pure random walk data, they claimed to get again about same 68% correctness of trend prediction. The latter suggests that their original results did not outperform random guessing.

Probably of the most cited rule finding method found in the literature is [6]. This research quantizes the data with K-means clustering. The whole training dataset passes data over to the typical association rule discovery algorithm. A further set of corrective articles showed that there is an evident problem with the quantization step. In summary, any method that involves clustering the whole set of subsequences, is mis-driven to produce cluster centers that are independent of the data [16].

The work of Mohammad Shokoohi-Yekta et al, cited in [28], is the backbone of this research. They created a framework to discover and test rules on time series. The solution was designed to identify *potential* rules known as subsequence motifs (*discoverRules()*). A classification algorithm powered by Euclidean distance, produces *predictive* rules (*testRules()*) from all the motifs identified.

While there are a vast list of distance measures in the literature, recent empirical evidence suggests that Euclidean distance is very difficult to beat [7]. The Euclidean distance is simple to implement, parameter free, fast to compute and also amiable to various data mining optimizations, such as indexing and early abandoning computation [23].

The authors in [28] also considered other distance measures such as: DTW, Swale, Spade and EPR [7]. They empirically claimed that none of these similarity measures actually helped to improve the accuracy, and even worse, most of them required a runtime at least an order of magnitude longer.

In [35] the authors introduce an approximate algorithm called Hierarchical based Motif Enumeration (HIME) to detect variable-length motifs with a large enumeration range in million-scale time series. The authors show in the experiments that the scalability of the proposed algorithm is significantly better than that of the state-of-the-art algorithm. Moreover, the motif length range detected by HIME is considerably larger than previous sequence-matching based approximate variable-length motif discovery approach. They demonstrate that HIME can efficiently detect meaningful variable-length motifs in long, real world time series.

In this project, we study the accuracy obtained by different similarity measures, particularly through the implementation of DTW and SIDTW [27, 14].

The details about the rule discovery framework are presented in the following section.

Rule discovery framework

We are now in a position to develop all the required concepts to explain the rule discovery framework. First, we define a time series "*antecedent*" as a subsequence is triggered only if it is similar to the current sliding window.

In order for a candidate antecedent to be even considered as a rule precursor, it must occur at least twice. We cannot generalize from a single instance of an event. This is the most basic definition of a time series motif [22].

As an antecedent is a precursor to an event, a predicted subsequence shape, which follows an antecedent within a specified time (*the maxlag*), is called the *antecedent's consequent*.

The *maxlag* parameter encodes the fact that for a time series subsequence to be a meaningful consequent in a rule, it must occur within some acceptable time, after the rule's antecedent has been detected. Without such a constraint on time, a consequent's occurrence may be a mere coincidence.

In principle, the threshold, the maxlag and antecedent could be hand chosen by a domain expert.

All the concepts described above can be formally summarized in 5 simple definitions:

- Definition 1: the monitoring tasks over a time series is carry out by continuously extracting the sliding window, W . Given a positive constant t (threshold), and an antecedent time series R_a , a binary flag fired is set to *TRUE* if $D(R_a, W) < t$.
- Definition 2: a consequent is a time series subsequence that is predicted, to follow the detection of an antecedent within a given maxlag time step.
- Definition 3: the maxlag, is the maximum number of time steps allowed between a detected antecedent and its consequent.
- Definition 4: a time series rule, R , is a 4-tuple of $R_a, R_c, maxlag, t$.
- Definition 5: the *split point* is a ratio in the range (0, 1), which indicates the end point of the antecedent and the beginning of the consequent.

Having defined time series rules and the supporting notation, we can describe the mechanism behind the rule discovery task.

The Required Intuition Behind The Rule Discovery Process

A simple application example explains the basic cognitive process towards the discovery of meaningful rules in time series. We utilized an accelerometer to collect data from a device worn by a person, as he or she goes about daily activities. Let's say, for instance, walk and use an elevator, as it is shown in Figure 1.

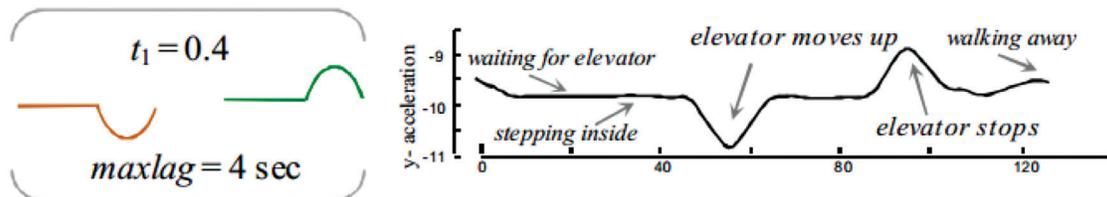


Figure 1. A rule found from an accelerometer dataset by using an elevator.

A rule for an accelerometer dataset identifies the initial acceleration “bump” as going up in an elevator. Which must be eventually matched by the elevator stopping at a floor. This example shows a very easy rule to spot. The semicircular bump (antecedent subsequence - red highlighted) created by an elevator accelerating, must eventually be matched up, by a bump in the opposite direction (consequent subsequence - green highlighted) when the elevator brakes. The time lag (*maxLag*, set to 4 seconds) between these two events is highly variable. It depends on the number of floors serviced by the elevator.

The Rule Discovery Framework

Once the above concepts have been defined, the rule discovery framework can be logically divided into two main basic modules. The first one, called “*Discover Rules*”, was created to *search rules* from a given input training set, a split point value and a maxLag value. As it is shown in figure 2, the first section of the algorithm will invoke a discretization process, to extract all the potential rules (motifs). The evaluated subsequences are divided into antecedent and

consequent (using a *split-point*). The algorithm will slide each antecedent subsequence across the entire data set, searching for a similar shape, identified at least twice.

This motif identification process is obtained as a result of a *similarity computation* between both subsequences: 1- a subset of the training set and 2- the antecedent subsequence that is being compared [28].

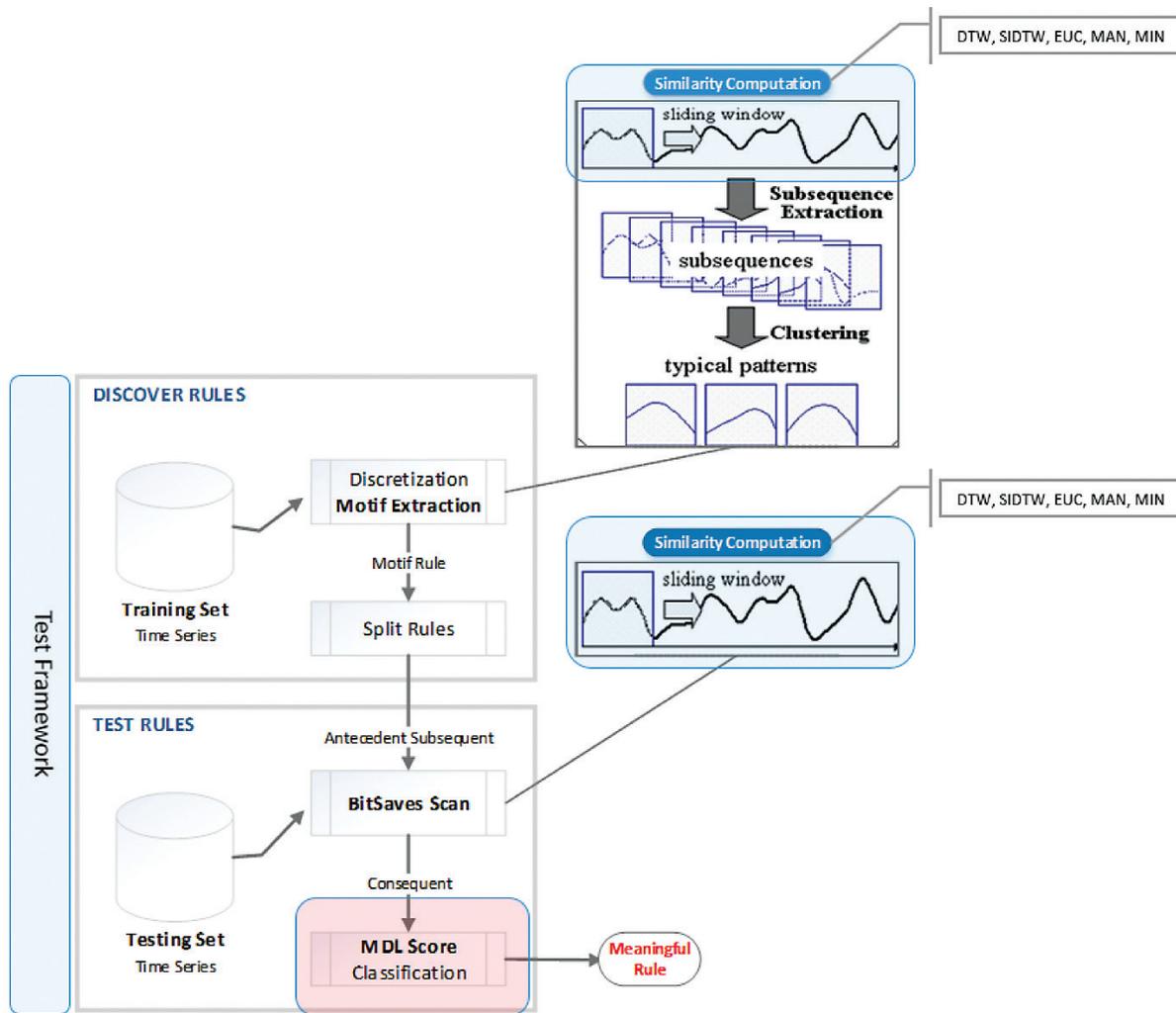


Figure 2. Diagram of the framework designed to discover and test rules.

The second module, called “*Test Rules*”, also detailed in figure 2, was created to score and classify any antecedent subsequence extracted from the “*Discover Rules*” module.

The scoring algorithm uses minimum description length (MDL). It uses two inputs parameters: 1- a candidate time series and 2- an expected maxlag value. The function then returns three objects: an antecedent, a consequent and the “quality” score value of the resulting rule [28]. In the subroutine, we use a similarity distance measure to create a large set of candidate rules with their observed outcomes on the training data. We move from Euclidean distance to MDL to score these rules.

We consider the consequent of R , as a model (a set of hypothesis) to calculate the total number of bit-saves to predict other consequents segments. A larger number of bit-saves indicates

more accurate predictions. After discovering antecedent candidates, we consider their following subsequences as consequents. The procedure calculates the number of bits needed to record the differences between the consequent saved as a model and the subsequences following antecedent candidates [28].

Finally, the number of firings depends on the distance threshold chosen. A conservative (small) threshold is more likely to produce an accurate rule, but, it may miss opportunities when it could have fired and produce predictions that are at least much more better than random [28]. The motifs that fire the most during the testing process are the ones suggested as a meaningful rule.

Our Contribution To The Framework

There are four major contributions in this work. First, we endowed the existing framework with three well-known similarity distances: Manhattan, Minkowski, Dynamic Time Warping (DTW). Second, we added an enhanced and novel version of DTW called SIDTW, which was proposed by the authors in [14]. Third, we ran a benchmarking analysis to study the *accuracy* produced by all of these similarity distances. Finally, we developed an automated way to discover and test rules from time series, given a particular similarity distance.

The framework was initially implemented by using the Euclidean distance [7]. Given two time series Q and C of length n , where $Q = q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ and $C = c_1, c_2, c_3, \dots, c_n$, the Euclidean distance is defined as $DE(Q, C) \equiv \sqrt{\sum_{i=1}^n (q_i - c_i)^2}$. As was mentioned, the framework was also equipped with two L_p shaped-based distances, the Manhattan distance [7], defined as: $DM(Q, C) \equiv \sum_{i=1}^n |q_i - c_i|$. The Minkowski distance, formally implemented as $DM(Q, C) \equiv \sum_{i=1}^n (|q_i - c_i|^p)^{1/p}$, where p is an integer threshold.

In addition to the previous L_p shaped-based distances, we implemented an elastic-based version of DTW [27]. This efficient implementation of DTW was written in *C* language. This standard version of DTW taken from [27], can be formally defined as $DTW(C, Q) = \min_W [\sum_{k=1}^p \delta(w_k)]$, where W is the minimum path.

As it is known, this distance finds an optimal match between two sequences of feature vectors, which allows for stretched and compressed sections of the sequence [27].

Why SIDTW was proposed in this project?

Dynamic time warping (DTW) and derivative dynamic time warping (DDTW) are two robust distance measures for time series. The algorithm allows similar shapes to match even if they are out of phase in the time axis [27].

We added a new version of DTW based on cubic spline interpolation (SIDTW) [14], mainly based the educated assumption that its the level of accuracy was way superior than the other distance measures.

How does it work? The derivative of every point of the time series is computed by cubic spline interpolation. This method is utilized to replace the estimated derivatives in DDTW. After interpolation, SIDTW uses derivative-based sequences to represent the original time series, which is way better to describe the trend of the original time series and more reasonable to warp [14]. The authors in [14], empirically indicate that the quality of similarity measure, for the three warping methods, is nothing to do with the amount of warping [14]. They experimentally perform the proposed method and compared with the existing ones, which demonstrates that in most cases their approach not only can produce much less singularities and obtain the best warping path with shorter length but also, is an alternative version of DTW when time series datasets are not suitable for DTW to be measured.

There is an index W proposed in [14] to indicate the warping level implied in the algorithm. For instance: $W = \frac{K-m}{m}$, $W \in [0,1]$ where K is the number of warping and m is the length of time series. In this formula, it is clear that W is in direct proportion to K due to the constant length m . In addition to that, the small W is, the less amount of warping will be produced. The DTW algorithm will run prior any cubic spline interpolation activity. That should happens in order to avoid unnecessary warping.

The SIDTW algorithm can be presented as follows:

- Step 1. Input two time series data sets, Q of length n and C of length m . Note that x_i represents the time of X-axis and y_j the data point value of the time series.
- Step 2. Let boundary derivatives of Q and C be $M_{q_1} = q_2 - q_1$, $M_{q_n} = q_n - q_{n-1}$, $M_{c_1} = c_2 - c_1$ and $M_{c_m} = c_m - c_{m-1}$ respectively. Step 3. Bring these parameters into the new cubic spline interpolation accordingly.
- Step 4. Compute the derivatives function $QS'(y)$ and $CS'(y)$ for every point of both time series.
- Step 5. Replace the values of $d_i(q)$ and $d_j(c)$.
- Step 6. Calculate the distance matrix and use the dynamic programming to figure out the minimum warping cost.

There are at least three main benefits in SIDTW: 1- the points with positive derivative in one sequence will align each other on the same trend, 2- in most cases, the length of the warping path will be shorter than the DDTW and DTW, including a less number of singularities as was already mentioned and 3- SIDTW is an alternative version of DTW. Therefore, the SIDTW measure the similarity of most of time series datasets but in any other case, DTW can be also use instead.

The experimental evaluation of all these distance measures is presented in the next section.

Experiments

In this section we evaluate the performance of each similarity measure that was ran to discover and test rules in time series in the upgraded framework. We compared both algorithms (*discoveryRules* and *testRules*). That allowed us to determine which similarity measures were generating the best possible results on each data set.

All of our experiments have ran on an Intel64 processor with approximately 2295 MHz, upon MS Windows 8.1 OS. In order to reproduce these experiments, the following software is required: IDE: Matrix Laboratory (MATLAB), version 9.1.0.44, 64-bit, IDE: RStudio, version 1.0.136, 64-bit, Libraries: PMCMR, nortest, TSdist version 3.3, proxy version 0.4-17, sampenc and RunRcode.

About the data sets that were utilized in this project

We did use the seven different datasets provided in [28]. There are two specific reasons for making that decision. The first one, is mainly to proof the veracity of their results, using the Euclidean distance as a reference. The second and most important reason, was lead by the consistency and the simplicity of studying the behavior of new distance measures against the same datasets.

A new dataset was generated to increase the impartiality level of the experiment. To achieve the latter, we use a time series generator described in [12]. The tool captures *daily activity data* in a time series format. This new dataset offer a new level of complexity, which can be defined by two different characteristics: 1- is the dataset with the smallest amount of data points and 2- it contains the highest degree of data level disorder or noise. The permutation entropy obtained from this dataset is observed in *Figure 3*. This metric was very useful to measure the degree of disorder found on each time series [31].

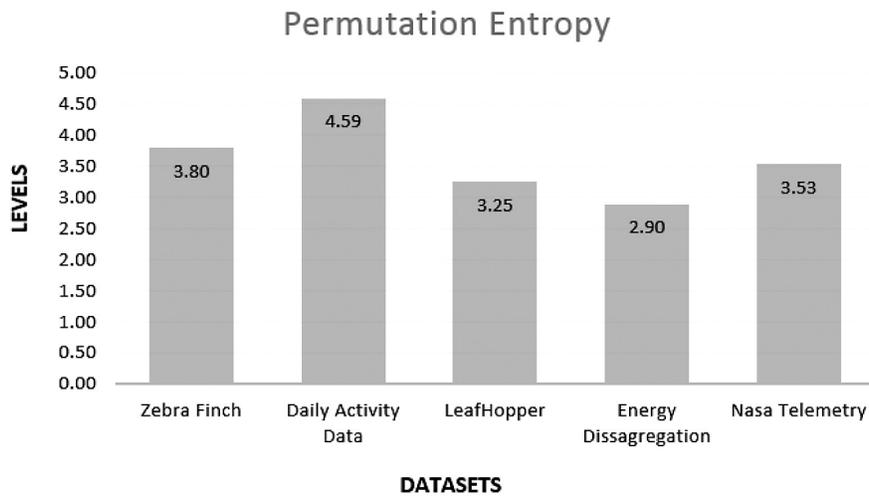


Figure 3. Permutation entropy levels computed on each dataset.

An impartial sample of experimental datasets, should consider a variation in the number of data points of each dataset and different levels of disorder and permutation entropy. This combination of factors are imperatively required to categorize the complexity of each dataset and then quality of the experiment. [31]. The *Figure 4*, describes for instance, the number of data points on each dataset in this experiment. [31].

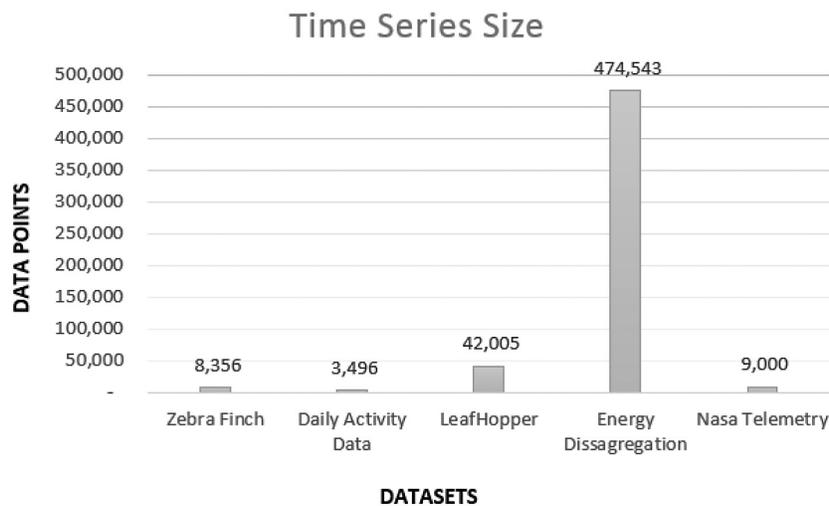


Figure 4. The number of data points on each dataset.

We are in a position to present the results that were obtained from each distance measure on every single dataset. In the more general case, we use a given distance between the predicted consequent and the F matching locations where the rule fired, a value we denote as F_{error} (this is essentially the root-mean-squared error). Because this number is difficult to interpret by itself, we do the following: on the same testing set, using the same consequent, we fire the rule randomly, F times, and measure the distant between the predicted consequent and the F random locations. We denote this value as R_{error} (which is averaged over 1.000 random runs).

The reported measure of quality then is just ($Q = F_{error}/R_{error}$). Values *close to one* suggest the rules are no better than random guessing and values *significantly less than one* indicate that there is a true structure in the data.

The hypothesis Q , is defined as *the accuracy* reported by the distance measure to find a meaningful rule in a particular dataset. Again, the size and the complexity of each dataset are considered relevant factors to achieve the expected quality in this experiment. Our hypothesis was tested by using the nonparametric test called Kruskal-Wallis [34]. The assumptions of one-way ANOVA were not met (p-value = 0.4409, using $\alpha = 0.05$). Due to the obtained results, we do believe that there is no strong statistical evidence to categorically support our hypothesis. The margins of these results are not significant.

Despite the above given outcome, we want to highlight some interesting observations. In the *Figure 5*, the SIDTW distance measure did report higher accuracy levels (where Q average values close to zero, suggest a higher accuracy level), particularly when the number of data points on each dataset tended to increase. For instance, SIDTW has reported better results than the Euclidean distance, including the standard version of DTW.

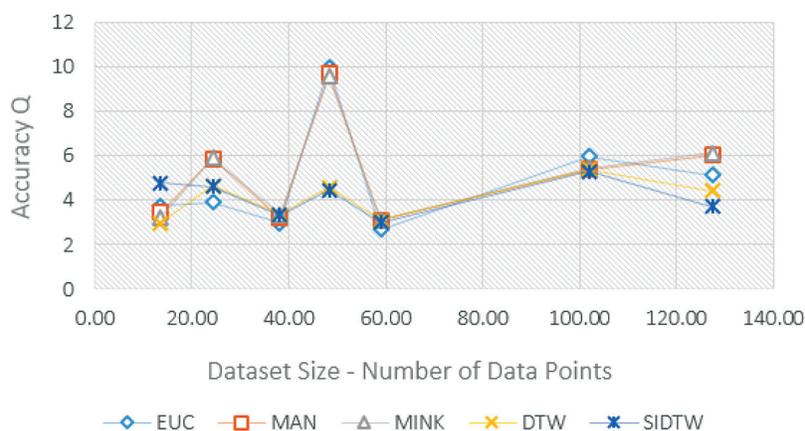


Figure 5. Accuracy per distance measure.

The SIDTW did report also better results in presence of highest degrees of permutation entropy. As was shown in the *Figure 6*, this novel similarity measure, was even more tolerant than the Euclidean distance, to deal with higher entropy levels and report out, at the same time, the best average values of Q on each dataset.

We ran the *testRules()* algorithm (based on the values obtained from *discoverRules()*), using all the distance measures on each dataset. As was mentioned, every distance measure was executed 1000 times on each dataset for this algorithm as well, in order to control the factors of the experiment and its consistency. Finally, we did a simple data normalization process (without losing precision), in order to get the average value of Q , for each combination of factors.

In *Table 1*, we present the average values of Q , for every factor. The green highlighted Q figures, on every row, represent the best results of a given similarity measure executed on each dataset. The red highlighted figure correspond to the worst possible value. As the Euclidean distance, SIDTW did report the best results of Q in three times. DTW in general, shows to be a reliable distance measure. At least as good as the Euclidean distance.

Table 1. Average result of Q , per every combination of factors resulted from the *testRules()* algorithm.

Distance	DataSets						
	Energy Disaggregation	Zebra Finch 40 Days	Zebra Finch 50 Days	Zebra Finch 100 Days	Nasa Telemetry	LeafHopper	Data Activity Telemetry
Euclidean	0.5122	0.3915	0.2967	1.0000	0.2674	0.5981	0.3739
LP Manhattan	0.6047	0.5856	0.3214	0.9698	0.3097	0.5401	0.3456
LP Minkowsky	0.6140	0.5912	0.3353	0.9572	0.3096	0.5465	0.3234
DTW	0.4432	0.4635	0.3354	0.4570	0.3100	0.5375	0.2969
SIDTW	0.3724	0.4600	0.3330	0.4469	0.3010	0.5288	0.4771

Conclusions and future work

We have presented an upgraded version of a framework created in [28]. The tool discovers meaningful rules in time series using SIDTW. The major contribution of this research is the implementation of four new similarity measures: L_p Norm Manhattan, L_p Norm Minkowski, DTW and DTW based on Cubic Spline Interpolation (SIDTW). A brand new dataset was generated from the scratch to support the veracity of the experiments reported by the authors in [28] and increase the quality of our experiments. The experiments have been uploaded at [11]. The automated testing of motifs was integrated as a new module.

We ran a hypothesis testing to study the accuracy levels (Q), obtained from the utilization of SIDTW, as a novel distance measure proposed in [14]. This analysis showed that SIDTW is as good as the widely implemented Euclidean distance.

Finally, many other avenues can boots this research initiative to the next level. For example, exploring the insertion of new types of similarity distances, such as: elastic, lock-step and threshold-based [7]. Further metrics can be added: *execution time*, *precision levels* and *efficiency*. We considered to increase the scope of the framework adding others data mining duties such as outliers detection and clustering.

Acknowledgment

In the first place, we thank Mohammad Shokoohi-Yekta et al, for providing us with a well-documented, debugged and available on-line version of the framework written in MatLab.

We also thank to Cindy Calderón Arce, from the Instituto Tecnológico de Costa Rica, for her valuable help, to guide us in the right track of knowledge and references, to resolve the challenge of dealing with time series with different lengths; a fundamental data preparation activity, required before applying any similarity computation.

Finally, the authors would like to thank the *Maestría en Computación* program at *Instituto Tecnológico de Costa Rica* for providing the occasion for this research.

References

- [1] Barron, A., Rissanen, J., and Yu, B., The minimum description length principle in coding and modeling. *IEEE Trans. Information Theory*, vol. 44, no. 6. 1998.
- [16] Brainard, M. S. & Doupe, A. J. Auditory feedback in learning and maintenance of vocal behaviour. *Nature Rev. Neurosci.* 1, 31-40 (2000).
- [3] Brotzge, J. and Erickson, S., Tornadoes without NWS warning. *Weather Forecasting*, 25, 159-172. 2010.
- [4] Cohen, P.R and Adams, N.M. An Algorithm for Segmenting Categorical Time Series into Meaningful Episodes. *ICAIDA 2001*, p.198-207, 2001.
- [5] Das, G., Lin, K., Mannila, H., Renganathan, G., Smyth, P. Rule Discovery from Time Series. *KDD 1998*.
- [6] Denton, A., Besemann, C., Dorr, D. H.: Pattern-based timeseries subsequence clustering using radial distribution functions. *Knowl. Inf. Syst.* 18(1): 1-27 (2009)
- [7] Ding, H., et al. Querying and mining of time series data: experimental comparison of representations and distance measures. *PVLDB* 1(2): 1542-1552. 2008.
- [8] Dudley, R. Sample Functions of the Gaussian Process. *The Annals of Probability*, Vol. 1, No. 1, pp. 66-103, 1973.
- [9] Ferrell, B., and Santuro, S., NASA shuttle valve data. <http://cs.fit.edu/pkc/nasa/data/>. 2005.
- [10] Gribovskaya, E., Kheddar, A., and Billard, A. Motion Learning and Adaptive Impedance for Robot Control during Physical Interaction with Humans. *ICRA 2011*.
- [11] Google web page - Rule Discovery in Time Series by using SIDTW. <https://sites.google.com/view/rule-discovery-sidtw/home>
- [12] Google Initiative, Science Journal App. URL: <https://makingscience.withgoogle.com/science-journal?lang=en>.
- [13] Hu, B., et al. Discovering the Intrinsic Cardinality and Dimensionality of Time Series Using MDL. *ICDM 2011*:
- [14] H. Li, X. Wan, Y. Liang, and S. Gao. "Dynamic Time Warping Based on Cubic Spline Interpolation for Time Series Data Mining." 2014 IEEE Conference. 19-26, 2014.
- [15] J. Han, M. Kamber, *Data Mining: Concepts and Techniques*, Morgan Kaufmann Publisher, San Francisco, USA, 2001.
- [16] Keogh, E., Lin, J. Clustering of time-series subsequences is meaningless: implications for previous and future research. *Knowl. Inf. Syst.* 8(2). 2005. 154-177.
- [17] Kojima, S. and Doupe, A. (2011). Social performance reveals unexpected vocal competency in young songbirds. *Proc Natl Acad Sci USA*. Vol 108 pp 1687-92.
- [18] Kornai, A., *Mathematical Linguistics*, Springer. 2008. Grunwald, P.D., Myung, I. J. *Advances in Minimum Description Length Theory and Applications*. 2003.
- [19] Li, G., Ji, S., Li, C., and Feng, J. Efficient type-ahead search on relational data: a TASTIER approach. *SIGMOD Conference 2009*: 695-706.
- [20] Makonin, S., Popowich, F., Bartram, L., Gill, B., and Baijic, I. AMPDs: A Public Dataset for Load Disaggregation and Eco-Feedback Research. *Electrical Power and Energy Conference (EPEC), 2013 IEEE*, pp. 1-6, 2013.
- [21] Makridakis, S., Wheelwright, S., and Hyndman, R. J., *Forecasting: methods and applications*. New York: John Wiley & Sons. ISBN 0-471-53233-9. 1998.
- [22] McGovern, et al. Identifying Predictive Multi-Dimensional Time Series Motifs: An application to severe weather prediction. *Data Mining and Knowledge Discovery*. 2010.
- [23] Mueen, A., Keogh, E., Zhu, Q., Cash, S. and Westover, B. Exact Discovery of Time Series Motif. *SDM 2009*.
- [24] Parnandi, A., Le, K., Vaghela, P., Kolli, A., Dantu, K., Poduri, S., and Sukhatme, G. Coarse In-building Localization with Smartphones. *Mobicase 2009*.
- [25] Park, S., and Chu, S.W. Discovering and Matching Elastic Rules from Sequence Databases. *Fundam. Inform.* 47, 2001.
- [26] Ricardo C., et al. The Opportunity challenge: A benchmark database for on-body sensor-based activity recognition. *Pattern Recognition Letters*, 2013.
- [27] Shokoohi-Yekta, M., Wang, J., and Keogh, E. On the NonTrivial Generalization of Dynamic Time Warping to the Multi-Dimensional Case. *SDM 2015*.

- [28] Shokoohi-Yekta, Chen, Bilson, Bing Hu, Zakaria and Eamonn Keogh. University of California, Riverside. *"Discovery of Meaningful Rules in Time Series"*. KDD, Proceedings of the 21th ACM SIGKDD. International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. Pages 1085-1094. 2015.
- [29] Tanaka, Y., Iwamoto, K., and Uehara, K. Discovery of timeseries motif from multi-dimensional data based on MDL principle. *Machine Learning*. 58(2), 2005.
- [30] UCR Time Series, Classification and Clustering. http://www.cs.ucr.edu/~eamonn/time_series_data/
- [31] Wallace, C., and Dowe, D. Minimum message length and Kolmogorov complexity. *Computer Journal* vol. 42-4, 1999.
- [32] Weiss, S., Indurkha, N., and Apte, C., Predictive Rule Discovery from Electronic Health Records. ACM IHI, 2010.
- [33] Wu, H., Salzberg, B., and Zhang, D., Online Event-driven Subsequence Matching over Financial Data Streams, SIGMOD Conference, 2004: 23-34.
- [34] Yvonne Chan, Roy P Walmsley. Learning and Understanding the Kruskal-Wallis One-Way Analysis-of-Variance-by-Ranks Test for Differences Among Three or More Independent Groups. 1997.
- [35] Yifeng Gao, J. L., Efficient Discovery of Time Series Motifs with Large Length Range in Million Scale Time Series, IEEE International Conference on Data Mining (ICDM) Efficient, vol. November, pp. 1213-1222, 2017.