



TECNOLOGÍA *en marcha*

Contenido

Presentación de la Edición Especial de Tecnología en Marcha

Paola Vega-Castillo..... 3

Factores relevantes para el cultivo de huertas caseras utilizando residuos sólidos biodegradables como fuente de abono

Relevant issues regarding the establishment of domestic vegetables gardens through the use of biodegradable solid wastes as a fertilizer source

Rooel Campos-Rodríguez, Laura Brenes-Peralta, María Fernanda Jiménez-Morales, Fiorella Ramírez-Ramírez 5

Evaluación técnica, ambiental y económica de tres tipos de tratamiento para el cultivo de lechuga en huertas caseras de Guácimo, Limón, Costa Rica

Technical, environmental and economical evaluation of three types of treatment for lettuce growing in vegetables gardens, in Santa María de Guácimo, Limón, Costa Rica

Fiorella Ramírez-Ramírez, Rooel Campos-Rodríguez, María Fernanda Jiménez-Morales, Laura Brenes-Peralta..... 14

Evaluación técnica de dos métodos de compostaje para el tratamiento de residuos sólidos biodegradables domiciliarios y su uso en huertas caseras

Technical evaluation of two methods for composting of organic wastes to be used in domestic vegetables gardens

Rooel Campos-Rodríguez, Laura Brenes-Peralta, María Fernanda Jiménez-Morales 25

Regresión lineal simple y múltiple: aplicación en la predicción de variables naturales relacionadas con el crecimiento microalgal

Simple and multiple regression: application in the prediction of natural variables related to microalgae growing process

Arys Carrasquilla-Batista, Alfonso Chacón-Rodríguez, Kattia Núñez-Montero, Olman Gómez-Espinoza, Johnny Valverde, Maritza Guerrero-Barrantes..... 33

Uso de la energía solar en sistemas de producción agropecuaria: producción más limpia y eficiencia energética

Using solar energy in agriculture and livestock: cleaner production and energy efficiency

Tomás de Jesús Guzmán-Hernández, Freddy Araya-Rodríguez, Guillermo Castro-Badilla, Javier M. Obando-Ulloa..... 46

Uso de la espectroscopia Raman en el análisis de fragmentos de pintura automotriz como evidencia forense

Analysis of automotive paint fragments used as forensic evidence by Raman spectroscopy

Dionisio Gutiérrez-Fallas, Ernesto Montero-Zeledón, Natalia Murillo-Quirós, Laura Rojas-Rojas. 57

Situación de la gestión del agua potable en las zonas rurales de la provincia de Cartago, Costa Rica.

Status of Management of drinking water in rural zones of Cartago, Costa Rica

Silvia M. Soto-Córdoba, Lilliana Gaviria-Montoya, Macario Pino-Gómez..... 67

Visualizador 3D de la geografía de Costa Rica

3D visualization of the geography of Costa Rica

Franklin Hernández-Castro, Jorge Monge-Fallas..... 77

Medición automática del metano en biogás, por columnas de desplazamiento

Automatic measurement methane by displacement columns

Nicolás Vaquerano-Pineda, Teresa Salazar-Rojas, María Porrás-Acosta..... 86

Presentación de la Edición Especial de Tecnología en Marcha

Encuentro de Investigación y Extensión 2016

*Dr.-Ing. Paola Vega-Castillo
Vicerrectora de Investigación y Extensión
Instituto Tecnológico de Costa Rica*

Me complace mucho la oportunidad de presentar a ustedes esta edición especial de la revista Tecnología en Marcha. En esta ocasión, presentamos artículos relacionados con proyectos presentados en el VII Encuentro de Investigación y Extensión.

Para honrar nuestra misión como universidad y la confianza que la sociedad costarricense deposita en nosotros, utilizamos la investigación y la extensión como medio para construir nuestra relación con la sociedad y ponernos al servicio de Costa Rica. Deseamos que nuestro quehacer impacte más allá de las aulas universitarias, pues entendemos que el conocimiento, junto con la conciencia social, es poder para cambiar vidas. Como costarricenses, estamos conscientes de que Costa Rica enfrenta grandes retos de índole económica, técnica y social. El Plan Nacional de Desarrollo nos revela la urgente necesidad de unir esfuerzos con los ciudadanos, el sector privado, las instituciones públicas y el gobierno para lograr una sociedad más próspera y orientada a los valores de justicia, equidad, solidaridad, honestidad, respeto e inclusión. Es nuestra responsabilidad generar bienestar e impulsar el desarrollo tecnológico, económico y social del país de forma sinérgica con la sociedad.

Con el Encuentro de Investigación y Extensión rendimos cuentas a los ciudadanos costarricenses y reiteramos nuestro compromiso para contribuir a mejorar la calidad de vida del pueblo costarricense. Con nuestra investigación y extensión impulsamos a Costa Rica a su meta de carbono neutralidad y la protección ambiental, introduciendo el uso de energías limpias en los procesos productivos, la reforestación, conservación y el manejo adecuado de los bosques y plantaciones forestales; promovemos prácticas ganaderas y la agrícolas sostenibles; capacitamos sobre el adecuado manejo del suelo, el recurso hídrico y los residuos sólidos; y estudiamos el cambio climático y sus efectos en nuestro territorio.

En el 2015 trabajamos con más de 55 comunidades a lo largo del territorio nacional, entre las cuales se incluyen comunidades indígenas. Impulsamos el emprendimiento y trabajamos de la mano de las comunidades y el sector productivo para crear y fortalecer encadenamientos productivos, mejorar sus capacidades y competitividad en actividades como el turismo, ganadería, elaboración de productos lácteos, agricultura, industria forestal, el uso y explotación comercial de la biotecnología y las tecnologías de información y comunicación. También los apoyamos para que, además de reducir sus desechos, los aprovechen para producir energía o nuevos productos. Estudiamos las causas de las pérdidas y desperdicios de alimentos en la industria y hogares costarricenses, con el fin de reducirlas y concientizar sobre su impacto económico y ambiental; apoyamos a las comunidades para mejorar el abastecimiento y la calidad del agua.

Desarrollamos ciencia y tecnología enfocada en aplicaciones para la salud, el monitoreo ambiental, la industria, la comprensión de los desastres naturales, la biodiversidad, las ciencias forenses, sistemas de información geográfica para el ordenamiento territorial, el voto electrónico y la educación, especialmente en ciencia, tecnología y matemática; la accesibilidad e inclusión, entre otros. Impulsamos la innovación y el desarrollo de capacidades en tecnología avanzada en los campos de las tecnologías de información y comunicación, tecnología satelital, biotecnología, ingeniería de plasmas, ingeniería biomédica y otros campos de la ingeniería.

Les invito a conocer algunos de los exitosos ejemplos de nuestro quehacer presentados por medio de los artículos contenidos en esta edición especial. Reitero la mayor disposición del Instituto Tecnológico de Costa Rica de colaborar con comunidades, industria e instituciones, así como nuestra apertura a propiciar y albergar espacios de divulgación, interacción y trabajo conjunto con la sociedad.



Uso de la energía solar en sistemas de producción agropecuaria: producción más limpia y eficiencia energética

Programa local piloto en la región Huetar Norte
Con este proyecto se ha logrado diseñar, construir, instalar y comenzar a generar datos que muestran la potencialidad de la generación energética a partir de la energía solar en actividades agropecuarias en la región Huetar Norte de Costa Rica (RHN). Para ello, se utilizan sistemas de captación de energía solar térmica y fotovoltaicos. Ambos sistemas sirven para dos funciones básicas: el calentamiento de agua y la generación de energía eléctrica.
Las unidades productivas seleccionadas en la RHN son lecherías y plantas de producción de lácteos. Las lecherías seleccionadas son: la de la Sede Regional del EC en San Carlos; la de la Escuela Técnica Agrícola e Industrial de Santa Clara (ETAJ); y la de un productor independiente de Dos Ríos; además, dos plantas procesadoras de quesos de Santa Rosa de Foccosol.
El uso de estos sistemas permite sustituir entre un 30 y un 50 por ciento del consumo de energía eléctrica de la unidad productiva. En el caso de la producción de energía para calentar agua para esterilizar equipos y pasteurizar leche, entre otros, el sistema solar aporta entre 20 y 37 °C adicionales.

iReal 3.0: visualización de placas tectónicas

El Observatorio Volcanológico y Sísmológico de Costa Rica (Ovisocor), está recogiendo datos de la actividad sísmica en nuestro país desde 1984. Muchos de estos datos históricos son generados por el roce o deslizamiento de puntos de acumulación de energía entre las placas tectónicas.
El proyecto propone tomar los datos almacenados en estos 30 años y usar el clave iReal para generar una visualización inmersiva y tridimensional de las placas tectónicas de nuestro país. Ello permite hacer análisis detallados de su geometría.

Análisis de fragmentos de pintura automotriz como evidencia forense

En muchos accidentes de tránsito involucrados se reúnen del lugar fragmentos de pintura automotriz con características físicas de identificación del vehículo. Sin embargo, con frecuencia, estas un tamaño reducido, del orden de milímetros, lo cual requiere que se analicen propiedades físicas no destructivas, como los análisis microscópicos y espectroscópicos.

Investigadores
Ernesto Montero-Zeledón, coordinador
Laura Rojas-Rojas
Natalia Murillo-Quiros
Dionisio Gutiérrez-Fallas
del Organismo de Ciencias Forenses del Poder Judicial (OJF)
Laboratorio de Ciencias Forenses

Implementación de huertas caseras utilizando residuos sólidos municipales para un grupo piloto de la comunidad de Santa María de Guácimo

El objetivo es implementar huertas caseras en las que se puedan reutilizar los residuos, que se generan en la comunidad de Santa María de Río Jiménez de Guácimo, en la provincia de Limón.

Además, se busca evaluar la eficiencia técnica, ambiental y económica de distintos sustratos hechos a base de residuos sólidos biodegradables, que se podrían utilizar en las huertas caseras; su vez, se busca capacitar a los líderes comunales con el fin de que la información generada se divulgue a toda la comunidad beneficiaria.

Cuantificador automático de metano para la estimación del potencial energético de un sustrato celulósico

A nivel mundial existe una gran problemática para la disposición adecuada de residuos celulósicos porque presentan poca biodegradabilidad en condiciones normales. Sin embargo, bajo condiciones específicas, existen microorganismos que logran descomponer este material celulósico.

Ello originó esta investigación sobre la actividad metanogénica de un sustrato determinado y el desarrollo de un equipo de medición del biogás que no se ve alterado por los cambios en la composición del flujo propios de la producción del biogás, lo que permite la medición de la calidad del biogás mediante un método automatizado, exento de los inconvenientes económicos y operacionales de la cromatografía.

Factores relevantes para el cultivo de huertas caseras utilizando residuos sólidos biodegradables como fuente de abono

Relevant issues regarding the establishment of domestic vegetables gardens through the use of biodegradable solid wastes as a fertilizer source

Rooel Campos-Rodríguez¹, Laura Brenes-Peralta², María Fernanda Jiménez-Morales³, Fiorella Ramírez-Ramírez⁴

Fecha de recepción: 1 de febrero de 2016
Fecha de aprobación: 3 de abril de 2016

Campos-Rodríguez, R; Brenes-Peralta, L; Jiménez-Morales, M; Ramírez-Ramírez, F. Factores relevantes para el cultivo de huertas caseras utilizando residuos sólidos biodegradables como fuente de abono. *Tecnología en Marcha*. Encuentro de Investigación y Extensión 2016. Pág 5-13.

DOI: 10.18845/tm.v29i8.2980



1. Doctor en Ciencias Naturales para el Desarrollo, docente e investigador de la Escuela de Agronegocios. Coordinador de la Maestría en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de Producción. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: rocampos@itcr.ac.cr
2. Ingeniera Agropecuaria Administrativa y máster en Gerencia Ambiental. Profesora Investigadora. Escuela de Agronegocios. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: labrenes@tec.ac.cr
3. Profesora Investigadora. Ingeniera Agropecuaria Administrativa y máster en Sistemas Modernos de Manufactura. Escuela de Agronegocios. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: maria.jimenez@tec.ac.cr
4. Ingeniera en Agronegocios. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: fioramirezrz@gmail.com

Palabras clave

Residuos sólidos biodegradables; huertas caseras; conocimientos; actitudes; barreras.

Resumen

La Municipalidad de Guácimo ha realizado varios estudios sobre la situación de la gestión integral de residuos sólidos en el cantón, pero no ha establecido todavía acciones concretas para el aprovechamiento de los residuos sólidos biodegradables. Por tal razón, en este artículo se da a conocer la percepción de una muestra de estudio sobre los conocimientos, actitudes, comportamientos y barreras de los habitantes del cantón en relación con la implementación del uso de abono generado a partir de residuos sólidos biodegradables en huertas caseras. .

Mediante el análisis estadístico, se denota una intención positiva entre los pobladores de aprovechar los residuos sólidos y plantar huertas caseras en sus hogares, y su disposición para adquirir y redefinir conocimientos, cambiar o afianzar comportamientos, superar barreras y realizar acciones en favor del ambiente.

Keywords

Biodegradable solid wastes; home vegetables gardens; knowledge; mind-set; barriers.

Abstract

Guacimo's Local Government developed studies in the past concerning solid waste management in its area of influence, but lacks of specific actions oriented to using of biodegradable solid wastes. This article relates to knowledge, mind-set and behavior of a studied sample of individuals from Guácimo regarding to the use of biodegradable solid wastes in the establishment of domestic vegetables gardens, and the barriers they find to improve it.

The result shows an intention from Guacimo's inhabitants to use solid wastes and establish vegetables gardens in their homes, and their disposition to acquire knowledge or redefine their prior one, as well as to modify their behaviors, to surpass existing barriers and to develop actions driven towards environmental preservation.

Introducción

A partir del año 2010, cuando entró en vigencia la Ley para la Gestión Integral de Residuos, n.º 8839, *La Gaceta* n.º 135 del 13 de julio, donde se indica que las municipalidades se encuentran en la obligación de tratar de manera responsable los residuos sólidos de su localidad, todos los municipios de Costa Rica iniciaron la búsqueda de alianzas estratégicas para poder cumplir con el cometido que dicta la ley.

Por tal razón, la Municipalidad de Guácimo estableció la necesidad de brindar una opción para la utilización adecuada de los residuos sólidos biodegradables y que estos no fueran directo al lugar de acumulación final, y fue así como se decidió por el aprovechamiento de estos residuos sólidos por medio de compostaje, para ser utilizado en huertas caseras en las diferentes comunidades de este cantón.

Campos y Soto (2014a) se refieren al compromiso de este municipio respecto a la gestión integral de residuos y advierten que debe ser un trabajo conjunto entre los diferentes actores sociales.

En Guácimo se depositan en el lugar de destino final 7600 toneladas al año, de las cuales 2482 corresponden a residuos biodegradables de las viviendas. Esto significa 6,8 toneladas diarias, y si se toma en cuenta que el costo de disposición de este material en el vertedero ronda los US \$20 / tonelada, en un año el municipio tendría que disponer de cerca de US \$ 50 000 más los costos de transporte, que generalmente son el triple de los costos del vertido; todo lo cual asciende a un total de US \$200 000 anuales (Campos y Soto, 2014b).

Por lo anterior, un compostaje de los residuos sólidos biodegradables para su utilización en huertas caseras se podría convertir en una opción viable, siempre y cuando se acompañe de programas de educación ambiental para la comunidad, y con esto se mitigaría el escaso o nulo aprovechamiento de este tipo de residuos.

La siembra de huertas caseras tiene como objetivo principal el producir alimentos para la familia, aprovechando el espacio disponible que hay en los hogares. Es una actividad que no requiere de técnicas complejas y los insumos necesarios para hacerlas son mínimos; por ende, su importancia no radica en la productividad, ya que los productos cosechados serán destinados a la mesa del propietario.

Cultivar una huerta en un espacio de la casa es una actividad muy gratificante, ya que causa un impacto positivo dentro del hogar, pues es ocupación para niños, jóvenes y personas de la tercera edad, proporciona alimentos sanos y frescos con ahorro de dinero en la economía familiar. Las huertas caseras no exigen mucha inversión, pero sí constancia en su cuidado.

Además, hay que tomar en cuenta que según Campos y Camacho (2014), es necesario trabajar previamente con los habitantes en su formación desde una visión integral, tomando en cuenta educación ambiental formal, no formal o comunitaria, hacia un proceso de sensibilización y empoderamiento, por medio del desarrollo de habilidades, destrezas y conocimientos relacionados con técnicas y tecnologías para generar una menor cantidad de residuos, y disponer de los que se produzcan de la mejor manera.

Apoyando lo anterior, autores como Caduto (1992), González (2002), Corral y Queiroz (2004), coinciden en la necesidad de promover la conducta pro ambiental, para que los individuos analicen de forma más imparcial sus propios valores y cómo estos afectan a otras personas y al Planeta, propiciando con esto cambios de actitud y hasta de estilo de vida en favor del ambiente.

Las huertas caseras, una opción para el tratamiento de los residuos sólidos

Las labores involucradas en la siembra de huertas caseras constituyen un buen aprovechamiento del tiempo, pues además de generar productividad, alejan de problemas sociales como el consumo de drogas. En relación con esto, la FAO (2000) menciona que los esfuerzos físicos de quienes participan en las labores de estas huertas suelen ser menos fatigosos y menos exigentes que los requeridos para la preparación del suelo y el deshierbe en un cultivo extensivo, debido a que la superficie es reducida y las condiciones de trabajo son mejores. Es importante añadir, además, que las labores suelen ser menos numerosas en comparación con las tareas domésticas, lo cual permite a las amas de casa apaciguar la carga.

Asociado a lo anterior, las personas que destinan tiempo al cuidado de huertas caseras adquieren nuevas competencias, pudiendo obtener también beneficios de índole económica, pues eventualmente comercializan los productos cosechados, recibiendo un pago monetario por ellos. Además, podrían intercambiar diferentes productos con vecinos u otros individuos que se encuentren cultivando bajo el mismo método. Un punto por considerar también es que el costo de los alimentos provenientes de poblaciones que se encuentran lejos de la ciudad, y con ello

de los mercados más importantes, en muchas ocasiones, suele ser elevado. Por este y otros aspectos, una huerta casera adecuadamente desarrollada, además de ahorrar dinero, asegura la disponibilidad regular de estos (FAO, 2005).

En los últimos años, los gobiernos y otras organizaciones de desarrollo presentes en países desarrollados y en vías de desarrollo, hacen énfasis en la importancia de la construcción de sistemas de producción de alimentos locales, como una estrategia integrada, que genera una red para la seguridad alimentaria. En relación con lo anterior, las huertas caseras representan un componente de los sistemas de producción de alimentos locales, mediante el cual se fomenta el desarrollo socioeconómico de las comunidades subsistentes de escasos recursos (Hashini, 2012).

Metodología

Área de estudio

El estudio se realizó en el cantón de Guácimo, provincia de Limón, Costa Rica. Sus coordenadas geográficas medias son 10°12'13" latitud norte y 83°37'30" longitud oeste. El cantón cuenta con 576,48 kilómetros cuadrados de extensión y está conformado por cinco distritos: Guácimo, Mercedes, Pocora, Río Jiménez y Duacará. Su población es de 41 266 habitantes, según el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC, 2011).

Partiendo del cálculo de muestra empleado por Campos y Soto (2014)² para el estudio de la generación y composición del cantón de Guácimo, se aplicó una encuesta con preguntas cerradas, con el fin de obtener valores sobre conocimientos, actitudes, comportamientos y barreras en relación con la implementación del uso de residuos sólidos domiciliarios de carácter biodegradable en la siembra de huertas caseras. Aplicando la siguiente fórmula, se encuestaron 171 viviendas en barrios representativos seleccionados por criterio experto: 27 del estrato alto (que corresponde al 15% de la población local), 66 del estrato medio (39% de la población) y 78 del estrato bajo (46% de la población), y se encuestó a una persona mayor de edad por vivienda.

$$n = \frac{Z^2 * N * 2}{N - 1 * E^2 + (Z^2 * 2)} * 1,25$$

Fórmula 1. Cálculo de la muestra

Donde

n: número de viviendas que incluirá la muestra

N: número total de viviendas del cantón

Z: Coeficiente de confianza al 95% = 1,96

: Desviación estándar = 0,3 Kg/habitante/día

E: Error permisible = 0,05 Kg/habitante/día

El instrumento elaborado fue validado por criterio experto y como tal se tomaron los de la Municipalidad de Guácimo, de representantes de la comisión del Programa de Residuos Sólidos (PRESOL) y de académicos con conocimientos en residuos sólidos y educación ambiental.

Además se aplicó una prueba piloto a veinte personas mayores de edad, las cuales no eran parte de la muestra, para verificar la comprensión de las preguntas y el tiempo estimado de respuesta.

Obtenida la información se tabularon cada una de las respuestas y se clasificaron según los contenidos sobre conocimientos, actitudes y barreras. Conociendo de antemano que se trabajaba con muestras menores a 30, y que no había normalidad de los datos, se procedió a aplicar la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis para determinar la existencia o la inexistencia de diferencias estadísticamente significativas, utilizando un *p value* de 0,05. También se utilizó la prueba de Chi Cuadrado para determinar la dependencia de los atributos con los estratos, todo lo anterior con el programa Infostat.

Resultados y discusión

Seguidamente se muestran los resultados más relevantes obtenidos durante la investigación.

Generalidades

El 74% de la muestra en estudio son mujeres. Se determinó que el 67% de los encuestados cuentan con estudios de primaria, y la profesión u oficio sobresaliente es el de ama de casa, con un 44%.

Conocimientos sobre huertas caseras

Los encuestados de los tres estratos analizados cuentan con pocos conocimientos sobre la siembra de huertas caseras. Al valorar cuatro diferentes rubros, se obtuvo como resultado que el 35,90% de los sujetos de estrato bajo conocen sobre las técnicas para obtener abono orgánico, mientras que alrededor del 7% de los encuestados del estrato medio y bajo tienen claridad sobre el significado y uso potencial de los sustratos.

Respecto a los cuidados que requieren las huertas y lo que realmente significa plantar una de estas, los porcentajes de personas con conocimiento no llegan ni al 27%. Al aplicar las pruebas estadísticas respectivas se determinó que no existen diferencias significativas ($p > 0,05$) por este aspecto entre los estratos, pues los bajos conocimientos son generalizados. Además, la prueba de Chi Cuadrado denotó que el conocimiento no está condicionado por el estrato, y que los encuestados del estrato bajo tienen más conocimientos que el resto de los encuestados.

En el cuadro 1 se presentan los resultados obtenidos.

Cuadro 1. Conocimientos sobre algunos aspectos de la siembra de huertas caseras (en porcentaje de los individuos)

Conocimiento	Estrato		
	Alto (%)	Medio (%)	Bajo (%)
Huerta casera	11,54	12,82	15,38
Cuidado de las huertas	21,79	25,64	26,92
Abono orgánico	33,33	32,05	35,90
Sustratos	8,97	7,69	11,54

Se deduce que es importante desarrollar capacidades entre los habitantes que les permitan la adquisición de conocimientos, de manera que lleguen a comprender el impacto que sus acciones podrían tener sobre la sociedad y el ambiente.

El hecho de que todos los estratos estudiados y principalmente el bajo cuenten con algunos conocimientos significa que no se parte de cero; por lo tanto, se trata de coadyuvar para que un grupo de habitantes definan o redefinan conceptos sobre el ambiente.

Actitudes respecto a la implementación de huertas caseras

Las actitudes son elementos importantes para la definición del comportamiento, ya que inclinan a la persona a realizar determinada acción ambiental.

Las actitudes en esta investigación se valoraron por la anuencia de los encuestados a sembrar una huerta casera en sus hogares, a la participación de los miembros de la familia en el cuidado de la huerta, a separar correctamente los residuos sólidos para utilizarlos en la preparación de abonos para la huerta, así como su interés en participar en jornadas de capacitación.

En la figura 1 se observan los resultados.

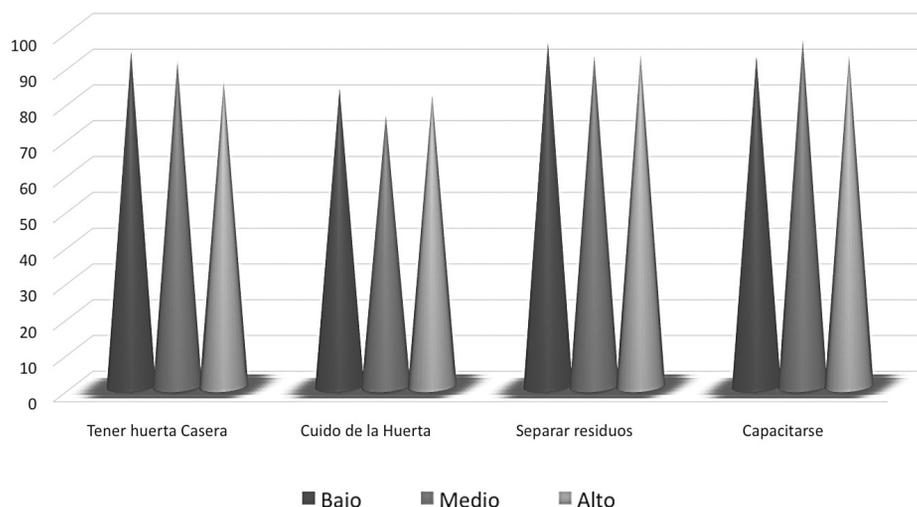


Figura 1. Intención de los individuos en la muestra en relación con acciones específicas

Se observa en todos los estratos una actitud positiva hacia la siembra de una huerta casera y las labores necesarias para mantenerla de forma adecuada.

La anuencia a capacitarse y separar residuos supera el 90% en los tres estratos analizados.

No existen diferencias significativas en la intención de actuar entre cada uno de los estratos ($p > 0,05$), y la actitud es independiente del estrato ($p > 0,05$). Partiendo de lo anterior se podría trabajar con cualquiera de los estratos o hasta integrar a personas de los diversos sectores en un solo grupo y se podrían obtener resultados positivos.

Comportamiento respecto a la separación de residuos sólidos biodegradables para uso en huertas caseras

Un porcentaje de participantes del estrato alto, inferior al 15% de la muestra, indican que separan los residuos sólidos para su posterior aprovechamiento; básicamente, el papel, el cartón

y el aluminio. Los del estrato bajo separan los residuos biodegradables para alimentación de animales o para fabricar abono, gracias a capacitaciones recibidas por parte del Tecnológico de Costa Rica. Cinco de cada diez personas en el estrato bajo separan los residuos.

Los datos anteriores coinciden con investigaciones realizadas por Campos y Camacho (2014), Campos y Soto (2014b), y Solís (2010), las cuales básicamente indican poca disposición de los individuos para realizar acciones de separación de residuos sólidos.

No hay diferencias significativas entre los tres estratos ($p > 0,05$) respecto al comportamiento de separar los residuos sólidos, además de que este no está condicionado por el estrato.

Barreras

Las barreras son dificultades reales o no reales que los individuos consideran tener para desarrollar una acción determinada. En este estudio, se pueden clasificar como barreras conceptuales, representadas por la necesidad de contar con mayores elementos cognitivos y prácticos para realizar la acción de separar los residuos biodegradables para su posterior aprovechamiento en las huertas caseras. Más del 50% de los encuestados en los tres estratos manifestaron la existencia de esta barrera.

La falta de motivación es una barrera actitudinal presente en más del 70% de los encuestados. La sensación de que el dinero es un factor limitante para realizar una separación correcta de los residuos biodegradables se puede considerar una barrera de control; menos del 29% de los encuestados presentaron esta situación.

El cuadro 2 muestra los resultados por estrato.

Cuadro 2. Barreras para la separación de residuos sólidos (en porcentaje de los sujetos)

Barrera	Tipo	Frecuencia relativa		
		Alta	Media	Baja
Conocimiento	Conceptual	55,56	60,61	67,95
Motivación	Actitudinal	70,37	72,73	76,92
Tiempo	Control	85,19	75,76	52,56
Dinero	Control	25,93	28,79	25,64

No hay diferencias significativas ($p > 0,05$) respecto a la existencia de barreras para los participantes entre los tres estratos analizados, y esta es independiente del estrato de pertenencia, lo que significa que se podría tratar de superar las barreras con estrategias similares para los tres grupos evaluados.

La figura 2 muestra la frecuencia de las barreras de control entre los encuestados, para capacitarse en temas relativos a la siembra de huertas caseras. El factor tiempo y la cercanía al hogar son los principales aspectos que representan obstáculos para capacitarse, según los encuestados de los tres estratos.

No se evidenciaron diferencias significativas y la percepción de barreras es independiente del estrato.

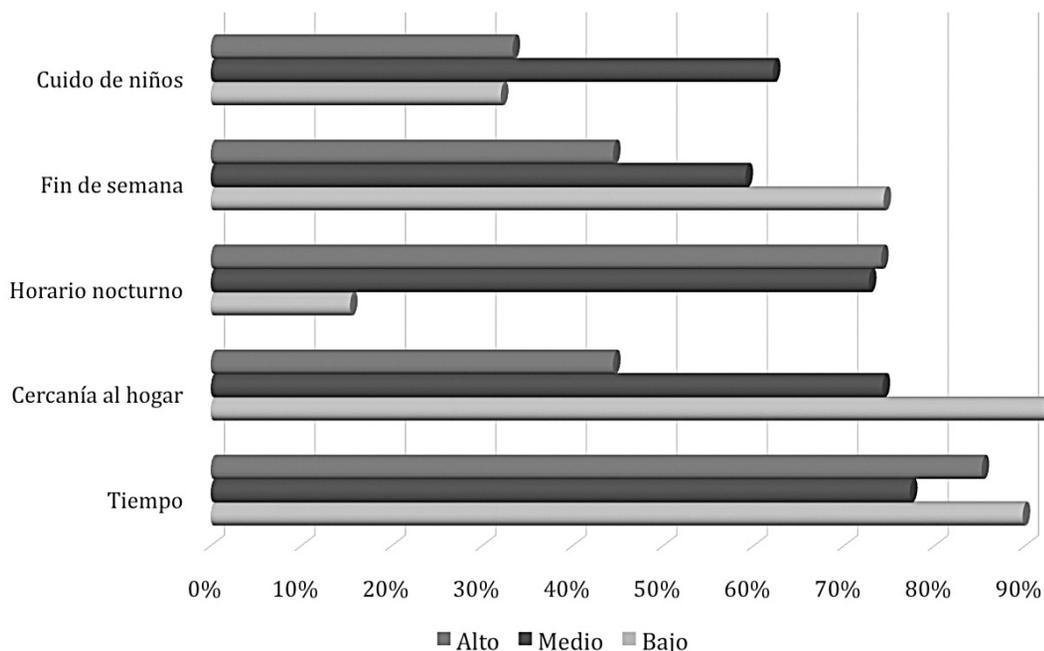


Figura 2. Barreras de control a la participación en jornadas de capacitación

Conclusiones

En Costa Rica y específicamente en el cantón de Guácimo, provincia de Limón, es necesario partir de conocimientos, actitudes y comportamientos pro ambientales que permitan superar las barreras que impiden el aprovechamiento de residuos sólidos biodegradables para el establecimiento de huertas caseras.

La investigación evidenció que a pesar de existir conocimientos por parte de los encuestados, es necesario fortalecerlos. Diversos actores sociales del cantón de Guácimo han apostado a la capacitación acompañada de acciones puntuales en el campo ambiental, específicamente en el aprovechamiento de los residuos sólidos, ya que como lo demuestra la investigación, hay interés por parte de los pobladores en aprovechar de forma sostenible los residuos biodegradables que se generan en el cantón.

Con la generación de abono a partir de residuos sólidos para producir alimentos, por una parte, se complementa la dieta de la familia con productos cultivados bajo un método orgánico, libres de los tóxicos generados por agroquímicos y otras sustancias artificiales que afectan su naturaleza, y por otra, se genera satisfacción personal por el solo hecho de conocer el proceso de crecimiento y desarrollo de las plantas, y por ende, seguridad al consumir estos alimentos.

No se evidenciaron diferencias significativas en los conocimientos, actitudes, comportamientos y barreras de los encuestados de cada uno de los tres estratos, por lo que es posible trabajar con un conglomerado de personas que reúna a todas las partes, o con un sector en específico. Partiendo de esto, se podría deducir que es factible replicar la experiencia a lo largo del cantón.

Por otra parte, tomando en cuenta que en Costa Rica desde el año 2010 el manejo de los residuos sólidos es obligatorio y existe una corresponsabilidad por parte de la ciudadanía, la opción de gestionar los residuos por medio de compostaje para generación de abono se convierte en una posibilidad interesante de bajo costo y que brindaría beneficios sociales, económicos y ambientales.

Bibliografía

- Caduto, M. (1992). *Guía para la enseñanza de valores ambientales*. Programa Internacional de Educación Ambiental, UNESCO – PNUMA. Madrid, España.
- Campos, R., & Camacho, M. (2014). Factores determinantes para una acción ambiental positiva de la Gestión Integral de Residuos (GIR), en el cantón de Guácimo, Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, vol. 27, n.º 4, p. 89 101.
- Campos, R., & Soto, S. (2014a). Análisis de la situación del estado de la Gestión Integral de Residuos (GIR) en el Cantón de Guácimo, Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. vol. 27, n.º 1, p. 114 124.
- Campos, R., & Soto, S. (2014b). Estudio de generación y composición de residuos sólidos en el Cantón de Guácimo, Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, vol. 27, n.º 3, p. 122 135.
- Corral, V., & Queiroz, J. (2004). *Aproximaciones al estudio de la conducta sustentable: Medio ambiente y comportamiento humano*. Editorial Resma, México, pp 26.
- FAO (2000). Cartilla tecnológica 4: Cultivos para tener una buena disponibilidad de alimentos. *Manual de capacitación para trabajadores de campo en América Latina y el Caribe: Mejorando la nutrición a través de huertos y granjas familiares*. Obtenido de <http://www.fao.org/docrep/v5290s/v5290s29.htm>
- FAO (2005). *Los medios de vida crecen en los huertos: Diversificación de los ingresos rurales mediante huertas familiares* (folleto de la FAO sobre diversificación, n.º 2). Obtenido de <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/008/y5112s/y5112s00.pdf>
- González, A. (2002). *La preocupación por la calidad del medio ambiente: Un modelo cognitivo sobre la conducta ecológica* (Tesis para optar al grado de Doctorado en Psicología, no publicada). Universidad Complutense de Madrid.
- Hashini, D. (2012). *Home gardens for improved food security and enhanced livelihoods in northern Sri Lanka*. Recuperado el octubre de 2015, de ProQuest: Michigan State University: <http://ezproxy.itcr.ac.cr:2092/docview/1266901588/1740FD44468F4EADPQ/1?accountid=27651>
- INEC (12 de febrero de 2011). *INEC Costa Rica*. Obtenido de <http://www.inec.go.cr/Web/Home/GeneradorPagina.aspx>.
- Solís, M. (2010). Conductas ambientales de separación de desechos sólidos y ahorro de agua en la población de Costa Rica. *Revista Costarricense de Psicología*, vol. 29, n.º 44, p. 1934.

Evaluación técnica, ambiental y económica de tres tipos de tratamiento para el cultivo de lechuga en huertas caseras de Guácimo, Limón, Costa Rica

Technical, environmental and economical evaluation of three types of treatment for lettuce growing in vegetables gardens, in Santa María de Guácimo, Limón, Costa Rica

Fiorella Ramírez-Ramírez¹, Rooel Campos-Rodríguez², María Fernanda Jiménez-Morales³, Laura Brenes-Peralta⁴

Fecha de recepción: 26 de enero de 2016
Fecha de aprobación: 17 de marzo de 2016

Ramírez-Ramírez, F; Campos-Rodríguez, R; Jiménez-Morales, M; Brenes-Peralta, L. Evaluación técnica, ambiental y económica de tres tipos de tratamiento para el cultivo de lechuga en huertas caseras de Guácimo, Limón. *Tecnología en Marcha*. Encuentro de Investigación y Extensión 2016. Pág 14-24.

DOI: 10.18845/tm.v29i8.2981

-
- 1 Ingeniera en Agronegocios. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: fioramirezr@gmail.com
 - 2 Doctor en Ciencias Naturales para el Desarrollo, docente e investigador de la Escuela de Agronegocios. Coordinador de la Maestría en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de Producción. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: rocampos@itcr.ac.cr
 - 3 Profesora Investigadora. Ingeniera Agropecuaria Administrativa y máster en Sistemas Modernos de Manufactura. Escuela de Agronegocios. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: maria.jimenez@tec.ac.cr
 - 4 Ingeniera Agropecuaria Administrativa y máster en Gerencia Ambiental. Profesora Investigadora. Escuela de Agronegocios. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: labrenes@tec.ac.cr



Palabras clave

Huertas caseras; gestión integral de residuos; compostaje doméstico; método Takakura.

Resumen

Desde hace varios años, el Tecnológico de Costa Rica ha ejecutado trabajos colaborativos con la Municipalidad de Guácimo, partiendo de proyectos de investigación y doctorado. Se dio la oportunidad de dar seguimiento a la comunidad mediante el proyecto de investigación “Implementación de huertas caseras utilizando residuos sólidos municipales para un grupo piloto de la comunidad de Santa María de Guácimo”, en el que se ejecutaron acciones de revisión de línea base en el cantón, respecto a generación de residuos sólidos orgánicos, así como pruebas de aprovechamiento de dichos residuos en compostaje, y se incorporó, en apoyo a uno de sus objetivos, el trabajo final de graduación titulado “Evaluación técnica, ambiental y económica de tres tratamientos para cultivar lechuga en huertas caseras en Santa María de Guácimo, Limón, Costa Rica”. Dado que la Municipalidad de Guácimo presenta algunas limitaciones presupuestarias para la implementación de la Gestión Integral de Residuos (GIR), investigadores de la Escuela de Agronegocios propusieron una solución integral consistente en la utilización del compostaje en huertas caseras que aportaran algunos alimentos a las familias. Por lo anterior resultó relevante realizar la evaluación objeto del trabajo antes mencionado. El primero de los tipos de tratamiento evaluado en el cultivo doméstico de lechugas fue el uso de compost obtenido mediante el método Takakura; el segundo, el uso de otro método de compostaje, y el tercero, de compost comercial y un testigo. Al realizar las diferentes pruebas estadísticas, se determinó que pese a que el proceso de obtención de compost por el método Takakura tiene un costo mayor que el de los otros tipos, los beneficios dados por la eficiencia técnica (tamaño y diámetro de las lechugas) y ambiental lo postulan como el mejor de todos.

Keywords

Home gardening; waste management; home composting; Takakura composting method.

Abstract

Tecnológico de Costa Rica has developed collaborative actions with the Guácimo local Government (Limón province, Costa Rica) through research and a doctoral thesis. As a follow-up, another research and extension project was proposed, called *Establishment of vegetables home gardens using solid waste in a pilot group in the Santa María de Guácimo community*. This project carried out activities like the analysis of prior studies regarding solid waste generation and composition in the community, as well as trials of different types of treatment for biodegradable solid waste through composting. The graduation project named *Technical, environmental and economical evaluation for three lettuce treatments from home food-gardens in Santa María de Guácimo, Limón, Costa Rica* joined in support to the objectives of the first one. Since Guácimo's Municipality faces monetary challenges to manage its wastes, the proposal of treating biodegradable solid wastes through domestic composting and using that compost in home gardening seemed to be an adequate option. Therefore, the evaluation in purpose of the study mention above became relevant. The Takakura composting method, the MM composting method and the commercial compost and a trial witness were applied in lettuce gardens. After analyzing the results in terms of mass, diameter, cost and environmental opportunities, they showed that although the Takakura composting method had a higher cost, it could produce wider environmental and economic benefits.

Introducción

Las municipalidades abordan temas como el manejo de residuos sólidos, producto de la Ley 8839, sobre Gestión Integral de Residuos, la cual asigna obligatoriedad y responsabilidad a las municipalidades en este aspecto. Al respecto, se ha venido desarrollando trabajo colaborativo entre la municipalidad de Guácimo y el Tecnológico de Costa Rica para dotar al cantón de un estudio de generación y composición. El estudio de Campos y Soto (2014) evidenció que en la comunidad de Santa María, del distrito de Río Jiménez, el 44% de los residuos son biodegradables, básicamente restos de comida a los que no se les está dando ningún tratamiento por el momento, por lo que en el mejor de los casos terminan en el sitio de destino final, municipal. Dado lo anterior, y como una posible solución, destaca el compostaje como tecnología para el aprovechamiento de los residuos sólidos biodegradables. Autores como Barrera (2006); Artola, Colón, Font, Gabarrell, Martínez, Rieradevall y Sánchez (2010) mencionan al compostaje doméstico como una opción adecuada para el tratamiento de residuos sólidos orgánicos. Por otra parte, Faverial y Sierra (2014) indican que este evita la acumulación de una parte importante de los residuos sólidos municipales; con ello se consigue una disminución en las inversiones económicas en materiales y energía, así como en infraestructura, puesto que se reduce su ingreso al relleno sanitario. Se genera así un menor impacto ambiental negativo en comparación con otras opciones como la trituración y evacuación de los biorresiduos con las aguas residuales, así como el vertido controlado (Bernal, García, Moral, Moreno & Pascual, 2014). Para el compostaje de residuos sólidos existen diversas técnicas, como los sustratos microbiales de Takakura y los MM (microorganismos de montaña), las cuales fueron utilizadas en esta investigación.

En un estudio realizado por Borrero (2014), en el que evaluó ambas técnicas para la descomposición de residuos sólidos biodegradables domiciliarios en un sistema de compostaje doméstico, se determinó que su efecto fue satisfactorio, por el comportamiento de las variables biológicas, físicas, químicas y microbiológicas características de un compost estable, apto para su uso como fertilizante o enmienda en agricultura. El Takakura resultó más eficiente para la degradación de los residuos de ese tipo. El producto obtenido y estabilizado puede servir para la producción de abono para jardinería o agricultura, y se puede considerar la implementación del uso del abono producido, en el cultivo de huertas caseras, para contribuir de esa forma a la seguridad alimentaria. Existen obstáculos para enfrentar la tasa de crecimiento de la población mundial y proveer su alimentación (Roberts, 2011); por lo que si las familias producen su propio alimento o parte de este, se podría paliar de alguna manera la falta de alimentos.

Fue por esto que para la presente investigación se implementaron huertas caseras de lechuga *Lactuca sativa* L., utilizando abonos desarrollados a partir de residuos sólidos biodegradables, con el fin de evaluar su eficiencia. Se escogió este cultivo por ser una planta de ciclo corto, de fácil manejo, de bajos costos en todas las etapas del cultivo, y por la disposición de la comunidad para trabajar con esta hortaliza. La investigación se enfocó en una solución que diera valor a los residuos sólidos biodegradables como abono natural, ya que no lo tenían del todo, y que a su vez agregara valor a los cultivos de ciclo corto que aportan alimento a las familias de la comunidad. Se abren así caminos hacia soluciones innovadoras y se responde a lo señalado por diversos autores en cuanto a que el aprovechamiento de estos residuos podría generar ingresos a la sociedad, y se podría también disminuir riesgos para la salud como la presencia de plagas y enfermedades en los rellenos sanitarios, así como los costos del reciclaje de los restantes residuos sólidos (Mason, Oberender & Brooking, 2004).

Metodología

El proyecto tuvo por objetivo general evaluar la eficiencia técnica, ambiental y económica de tres tipos de tratamiento utilizados en el cultivo de lechuga en huertas caseras, en Santa María de Guácimo (coordenadas geográficas medias 10°12'13" latitud norte y 83°37'30" longitud oeste). Específicamente se trabajó con la comunidad de Santa María, en el distrito de Río Jiménez, por ser un poblado con una organización previa (Campos, 2014), que facilitaba investigaciones de este tipo.

El diseño experimental consistió en cuatro tratamientos, denominados Takakura (TKK), Microorganismos de Montaña (MM), Abono Juan Viñas (JV) y un Testigo (TT) cada uno con cuatro repeticiones, donde se sembraron plantas de lechugas variedad Verónica, esto debido al costo accesible del material, el ciclo de cultivo y las experiencias previas en la zona con la siembra de esta hortaliza. El terreno seleccionado para realizar el experimento fue un área de 77 m², en tanto que el área de siembra correspondió a 32 m². El suelo es del tipo franco arcilloso.

Cada una de las dieciséis unidades de siembra recibió la misma preparación, que fue manual y consistió en dejar libre de malezas el área, y apta para la siembra del cultivo. Las camas se hicieron con una altura de 15 a 20 cm, una anchura de 100 cm y un largo de 200 cm, y con una separación de 1 m entre cada cama. Una vez preparado el terreno se procedió a la siembra de la lechuga adquirida en almacigo de la zona, libre de plagas y enfermedades. Por cada unidad experimental fueron sembradas 50 plantas de lechuga, en total 800 lechugas. Tomando en cuenta el efecto borde y el porcentaje de pérdida de planta por condiciones ambientales o de índole agronómica (hojas con daños físicos y mecánicos), se obtuvieron 90 datos por cada tratamiento. Se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad y homogeneidad. Además, utilizando el programa estadístico Infostat, se aplicaron un ANDEVA y la prueba de Tukey para determinar las diferencias entre los resultados obtenidos con cada tratamiento (valor p de 0,05).

Desde la siembra hasta la cosecha transcurrieron 45 días. Las unidades recibieron todas por igual una aplicación de Chilagro y Mostagro, (compuestos orgánicos para el control de plagas); en todo el ciclo del cultivo. También se realizó un deshierbe intensivo de todas durante las primeras tres semanas posteriores a la siembra, dos veces por semana. En el momento en que las lechugas alcanzaron un mayor tamaño, la cantidad de deshierbes a la semana disminuyó debido a que ya crecidas, las arvenses dejan de significar competencia para estas plantas; luego, esta labor se efectuó una vez cada siete días.

La hipótesis planteada fue que el tratamiento Takakura brinda mejores resultados en cuanto a las variables sometidas a prueba, a saber masa y diámetro. La primera consistió en medir la masa de las lechugas individualmente en una sola ocasión, una vez finalizado su ciclo de cultivo, para ello se utilizó una balanza digital de 0,001 g de división mínima, con una capacidad máxima de 1000 g. Los valores obtenidos en gramos por planta fueron transcritos de forma manual en hojas diseñadas para tal fin. Se utilizaron los programas Infostat y Minitab, con un análisis de significancia $p > 0,05$. Se determinó de esta manera la presencia o ausencia de diferencias estadísticamente significativas entre cada tratamiento.

Respecto al diámetro, cada lechuga fue colocada de forma individual en un tazón metálico y se extendió una cinta de medición sobre la planta, tanto a lo largo como a lo ancho en forma horizontal (en cruz en dos puntos diferentes). Se sumaron las medidas, expresadas en centímetros, y se obtuvo un promedio simple de la medición.

También se valoró la coloración de las lechugas, utilizando una escala de tonalidad de 1 a 5 desde el amarillo hasta el verde oscuro. Se escogió a 5 panelistas al azar, que se encontraban en el lugar de cultivo de las lechugas en el momento de su cosecha. Se les entregó una escala

de color (figura 2), junto con una matriz para evaluar cada tratamiento. Se aplicó una intensidad de muestreo del 70%, es decir, 63 lechugas por tipo de tratamiento (252 plantas en total). Su elección fue al azar. La labor se efectuó durante el día de cosecha y se aplicó la metodología de escala Likert, como se muestra en el cuadro 1.

Cuadro 1. Patrón utilizado para la aplicación de la escala Likert en la medición del color de las lechugas evaluadas por tratamiento

Escala	Puntuación Máxima	Intervalo	Tonalidad
5	25	21 a 25	verde oscuro
4	20	16 a 20	verde claro
3	15	11 a 15	verde amarillento
2	10	6 a 10	verde amarillo
1	5	1 a 5	amarillo

Se realizó una comparación de costos entre los cuatro tipos de tratamiento, basada en mano de obra utilizada para las labores de campo, mantenimiento, cosecha y materiales para la siembra de las huertas. Los costos fueron reflejados tanto en colones (Costa Rica) como en dólares de los Estados Unidos de Norteamérica (USD). Finalmente, se realizó una argumentación sobre la oportunidad de aprovechamiento de los residuos sólidos como sustrato para la siembra de huertas caseras.

Resultados y discusión

Masa

En la figura 1 se indica la masa de los datos agrupados; se reafirmó que el tratamiento TKK produjo la masa mayor, seguido del MM, del JV y, por último, del TT.

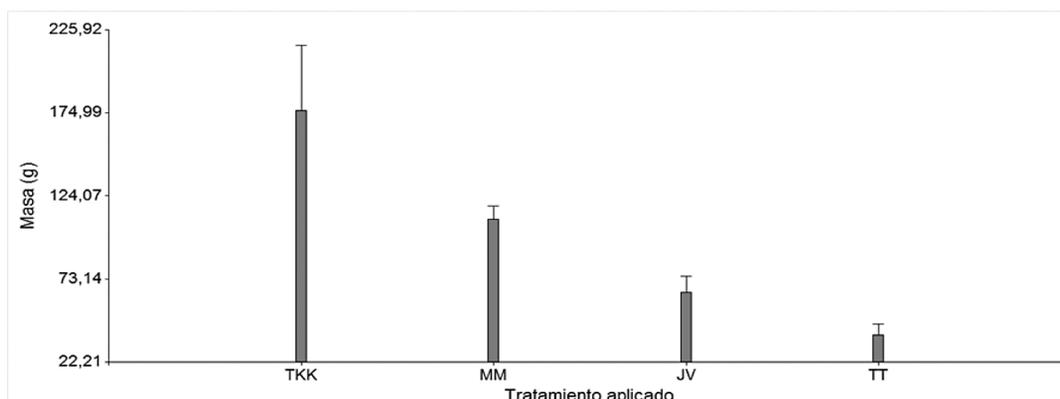


Figura 1. Masa (g) de las lechugas, por tratamiento evaluado.

También se determinó que el 50% de los datos correspondientes a lechugas con el tratamiento TKK se encuentran entre 139,78 y 207,91 g. Según Méndez y Herrera (2003), la masa promedio de una lechuga variedad Verónica para ser considerada de excelente calidad debe ser de 150 gramos en adelante; En esta investigación el promedio, mediante aplicación de TKK fue de 176,48 g, lo que significa que las lechugas alcanzaron una masa satisfactoria. Incluso, en algunos casos la masa de las lechugas alcanzó los 400 g (con tratamiento TKK).

Diámetro

El diámetro de las lechugas llegó hasta los 25,50 cm con el tratamiento TKK. La figura 2 presenta las medidas de diámetro obtenidas; sobresalen las lechugas tratadas con TKK, seguidas en su orden de las tratadas con MM, con JV y, por último, con TT.

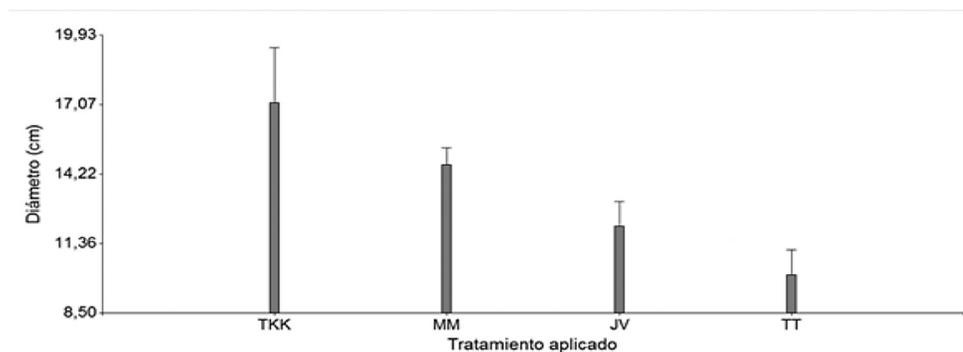


Figura 2. Diámetro (cm) de las lechugas por tratamiento evaluado.

Según Moreno y Patiño, (2010), el diámetro promedio de una lechuga variedad Verónica bajo un sistema de siembra tradicional es de 20 a 30 centímetros. Para el caso de este trabajo, el promedio en lechugas tratadas con TKK fue de 17,16 cm; esto se traduce en una diferencia relativamente baja, tomando en cuenta que no se realizaron aplicaciones de abonos tradicionales ni otras enmiendas, para coadyuvar al crecimiento del cultivo.

Escala de color

El cuadro 2 muestra el intervalo de puntuación obtenido con cada tratamiento.

Cuadro 2. Intervalo obtenido producto de valoración de los panelistas por tratamiento

Tratamiento	Intervalo seleccionado	Tonalidad
TKK	21 - 25	verde oscuro
MM	16 - 20	verde claro
JV	11 - 15	verde amarillento
TT	11 - 15	verde amarillento

Las observaciones anteriores coinciden con los resultados del análisis estadístico respecto a la masa y al diámetro, pues destaca que el tratamiento que proveyó el mejor color fue el TKK, de acuerdo a la escala correspondiente. En este caso, la tonalidad en la escala fue verde oscuro. Según Casseres (1980), el color verde oscuro en una lechuga variedad Verónica es indicador de calidad.

Las lechugas tratadas con MM presentaron tonalidad verde claro, mientras que las tratadas con JV y TT, un color verde amarillento. Es importante mencionar que el color no se definió como parámetro para determinar cuál tratamiento brindaba los mejores resultados, pues existen diversas causas por las cuales la lechuga podrá presentar variaciones en esta característica, como falta o exceso de humedad, o daño en la raíz ocasionado por alguna plaga (Campos, 2015).

Costos del cultivo de las huertas caseras

El cuadro 3 resume los principales costos del cultivo de la lechuga Verónica, asociados con cada tratamiento aplicado, desde la siembra hasta la cosecha. Se debe notar que los costos del cultivo son los mismos, ya que como se explicó en el apartado Metodología, se siguió el mismo procedimiento en cada tratamiento y en sus respectivas unidades, para asegurar la homogeneidad del experimento.

Cuadro 3. Costos del cultivo lechuga Verónica mediante cada tratamiento

Rubro	Cantidad	Medida	Costo unitario (CRC)	Costo total (CRC)	Costo total (USD)*
Almácigo	200	unidad	10,00	2000,00	3,70
Chilagro	2,00	cc	33,33	66,67	0,12
Mostagro	4,00	g	33,33	1333,33	2,47
Mano de obra preparación terreno	1,35	Horas	1922,47	2595,33	4,81
Mano de obra siembra	0,35	Horas	1922,47	672,86	1,25
Mano de obra deshierbe	5,65	Horas	1922,47	10 861,93	20,12
Mano de obra cosecha	0,30	Horas	1922,47	576,74	1,07
Total insumos				18 106,86	33,54

*(Banco Central de Costa Rica –BCCR- al 17/09/2015)

El cuadro anterior indica que alrededor del 81% del total de los costos pertenecen al rubro de mano de obra en las distintas etapas del cultivo. Esto se debe a que el cultivo fue tratado de forma no mecanizada, utilizando la menor cantidad de productos biológicos o químicos, ya que se trataba de una huerta casera, por lo que el trabajo se realizó de modo muy participativo, así como es la intención de que lo hagan las familias. Es importante hacer notar que la cantidad de horas de mano de obra podrá variar dependiendo de la época de siembra, esto por incidencia de plagas, enfermedades o arvenses, y que el costo reflejado en este estudio incluye las cargas sociales según el salario promedio de un peón agrícola de cargas livianas, de acuerdo al Ministerio de Trabajo de Costa Rica, con el fin de acercar lo más posible la estimación del costo a la realidad de una actividad comercial, solo con el afán de que los interesados puedan extraer sus propias conclusiones desde una perspectiva monetaria.

Para fines de esta investigación, se determinó comprar todos los insumos, tanto para la elaboración del abono TKK como del MM; no obstante, se aclara que algunos de los insumos, como las cajas, podrían existir en las casas de habitación.

Cuadro 4. Cuadro resumen costos de TKK, MM y JV

Rubro	TKK		MM		JV	
	Costo (CRC)	Costo (USD)	Costo (CRC)	Costo (USD)	Costo (CRC)	Costo (USD)
Costo materiales sustrato o abono	2406,65	4,46	1726,67	3,20	1165,22	2,16
Costo inversión y mano de obra (elaboración sustrato y abono)	9280,00	17,19	9455,31	17,52		
Costo cultivo de la lechuga	18 106,86	33,54	18 106,86	33,54	18 106,86	33,54
Costo total del tratamiento	29 793,51	55,19	29 288,83	54,26	19 272,08	35,70

Autores como Borrero (2014) y Campos, Jiménez & Brenes (2015) indican que en un mes se pueden obtener hasta 8 kg de TKK y MM, respectivamente.

Para el caso de TKK, una caja con 5 kg iniciales de sustrato fue suficiente para obtener los 8 kg que se aplicaron a los 2 m² destinados al cultivo de la lechuga Verónica con este tratamiento. Un kilogramo de TKK tiene un costo de 481,33 colones; por tanto, el costo de los 8 kg utilizados en el tratamiento, tomando en cuenta lo anterior, fue de 2406,65 colones (cuadro 4). Sumando los costos totales de cada una de las fases del cultivo, así como el de los 8 kg utilizados de TKK, se tiene un monto equivalente a 29 793,51 colones como costo total del tratamiento. La cantidad de sustrato MM utilizada para el cultivo de la lechuga Verónica fue de 8 kg; el costo por cada kilogramo de este abono fue de 345,33 colones, es decir, que el monto total de acuerdo a la cantidad utilizada fue de 1726,67 colones. Sumando todos los costos en que se incurrió, el total del costo de este tratamiento fue de 29 288,83 colones.

Para el caso del abono Juan Viñas, se partió del criterio técnico de utilizar 1 kg del producto por metro cuadrado de terreno, es decir, 8 kg en total. El costo de un saco de 46 kg de abono Juan Viñas en el mercado local es de 6700,00 colones, por lo que el valor del abono utilizado fue de 1165,22 colones. Respecto al tratamiento con este abono, que se adquiere en varios comercios costarricenses, se partió de un costo de cultivo de 18 106,86 colones. Al agregar este abono orgánico, el costo total del tratamiento con Juan Viñas fue de 19 272,08 colones.

Para el caso del Testigo, se contemplaron únicamente los costos asociados a los insumos para el cultivo de la lechuga Verónica, los cuales generaron un costo total de 18 106,86 colones (33,54 USD).

Comparando los costos asociados a cada uno de los tratamientos, el TKK fue el de costo mayor (29 793,51 colones), seguido del MM (29 288,83 colones); posteriormente, del JV (19 272,08 colones), y el de menor costo fue el TT (18 106,86 colones). El mayor costo de los tratamientos TKK y MM radica en los ingredientes para la elaboración del sustrato de cada uno, principalmente en las soluciones fermentativas, así como los materiales utilizados para la fermentación; además de esto, en la cantidad de horas de mano de obra para la elaboración

del sustrato de cada uno de ellos. Sin embargo, al aplicar las pruebas estadísticas, no se determinaron diferencias significativas entre los tratamientos, ($p > 0,05$) por lo que la decisión de aplicar uno u otro debe basarse en la eficiencia técnica, aspecto en el que el tratamiento TKK es sobresaliente respecto a los demás.

Beneficios ambientales del aprovechamiento de los residuos sólidos como sustrato para la implementación de huertas caseras

Moore (2010) menciona que las huertas caseras comprenden actividades recreativas que cumplen con necesidades culturales y personales asociadas a la salud mental; son espacios de orgullo personal, motivado por un paisaje de estilo cultural. Constituyen un buen aprovechamiento del tiempo, generan productividad, apartan de problemas sociales como el consumo de drogas, incrementan la autosuficiencia y mejoran el nivel de vida para la familia. Uno de los principales beneficios, según la perspectiva ambiental, es la posibilidad de reutilizar los residuos biodegradables familiares mediante la preparación de abonos como el TKK y el MM. Otro es que se da una interacción simbiótica por una transformación en el comportamiento de los usuarios asociada a una conciencia de protección a la naturaleza, que beneficia directamente ambas partes.

La organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE, 2012) menciona que el concepto de emprendedurismo social considera proyectos que se encuentren dirigidos hacia la provisión de soluciones innovadoras, los cuales cada vez ejercen un papel de mayor relevancia en todo el mundo y promueven un nuevo modelo de desarrollo económico. La siembra de huertas caseras que contemple la utilización de residuos orgánicos domiciliarios para la elaboración de abono, como el TKK, toma relevancia como parte del emprendedurismo social, pues además de los múltiples beneficios generados, es una vía para el desarrollo socioeconómico de los participantes involucrados, y el desarrollo rural (Trinh *et ál.*, 2003; Calvet-Mir *et ál.*, 2012).

En los últimos años, los gobiernos y otras organizaciones de desarrollo presentes en países desarrollados y en vías de desarrollo han enfatizado la importancia de la construcción de sistemas de producción de alimentos locales como una estrategia integrada que apunta hacia la seguridad alimentaria, por lo que las huertas caseras representan una parte importante de los sistemas de producción de alimentos locales, enfocada en el desarrollo socioeconómico de las comunidades subsistentes de escasos recursos (Hashini, 2012).

Según Campos (2014), en Guácimo se recolectan 3648 toneladas al año de material biodegradable de viviendas y comercios a los que se les brinda el servicio de recolección municipal. Esta cantidad representa el 48% de los residuos generados en el cantón, por lo que sacarlos de la corriente de residuos y recuperarlos es una labor significativa, ya que el costo de colocarlos en un relleno sanitario es de alrededor de US \$20 / tonelada al día; más los costos de transporte, que generalmente son el triple de los del vertido, todo significa una suma cercana a los US \$292 000 al año.

Tomando en cuenta los factores de emisión de gases de efecto invernadero indicados por el Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica para el año 2015, (0,0581 kg CH₄ / kg de desechos sólidos,) si se lograra el compostaje de los residuos biodegradables por el método propuesto en esta investigación, se dejaría de emitir 4450 toneladas de CO₂ liberadas por la disposición en relleno sanitario.

Conclusiones

Al realizar las diferentes pruebas estadísticas, se encontró que TKK es el tratamiento que favorece la obtención de valores altos de Masa, en lo que supera significativamente al

tratamiento con MM, que resultó ser el segundo mejor ($p < 0,05$), mientras que los resultados con el abono JV y el testigo fueron similares entre sí ($p > 0,05$) e inferiores a los dos primeros. Para la variable Diámetro, las diferencias también fueron altamente significativas según el tratamiento aplicado ($p < 0,05$); el TKK arrojó las lechugas de mayor diámetro. Por lo tanto, según la evidencia técnica y estadística, se concluye que el tratamiento Takakura generó las mejores lechugas en cuanto a masa y diámetro. Respecto a la prueba de escala de color, el tratamiento TKK permitió obtener la tonalidad más adecuada para lechugas variedad Verónica, seguido de los tratamientos MM, JV y TT. El costo económico de la implementación del tratamiento TKK a partir de residuos orgánicos domiciliarios es 1,71% mayor que el del tratamiento MM. Con respecto a los demás tratamientos, el costo del TKK es un 54,59% más elevado que el JV, y un 64,55% mayor que el TT; hay que destacar que estas diferencias sí son estadísticamente significativas ($p < 0,05$). No obstante, el utilizar residuos sólidos biodegradables para compostaje y cultivo de huertas caseras brinda beneficios importantes a los actores involucrados, como aprovechamiento de tiempo, bienestar mental, orgullo personal, seguridad alimentaria, autoabastecimiento, emprendimiento y aprovechamiento de los residuos. Además, mediante la implementación del método TKK, se estaría cumpliendo con los principios dictados por la Ley 8839, para la Gestión Integral de Residuos. Por tanto, pese a que el TKK es el tratamiento de mayor costo en comparación con los otros aplicados, MM, JV, y TT, las ventajas dadas por la eficiencia técnica y ambiental lo postulan como el mejor y dejan en segundo lugar las diferencias de orden monetario.

Finalmente, se recomienda repetir el experimento en diferentes épocas del año, bajo condiciones climáticas distintas, con el objeto de analizar el comportamiento del cultivo. De igual forma se podrían probar los diferentes tipos de tratamiento con otras hortalizas de ciclo corto o largo y en una mayor escala, para cuantificar su viabilidad. También se podría realizar un análisis bajo la metodología de costos evitados, donde se determine en términos monetarios lo que significa para el ambiente no tener que recibir 3648 toneladas anuales en un vertedero.

Bibliografía

- Artola, A.; Colón, J.; Font, X.; Gabarrell, X.; Martínez, J.; Rieradevall, J., & otros (16 de enero de 2010). Environmental assessment of home composting. Obtenido de *Science Direct: Journal Resources, Conservation and Recycling*. <http://ezproxy.itcr.ac.cr:2135/science/article/pii/S0921344910000261#>
- Barrena, R. (2006). *Compostaje de residuos sólidos orgánicos: Aplicación de técnicas respirométricas en el seguimiento del proceso*. Obtenido de Recolecta: Tesis Doctorales en Red. <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/5307/rbg1de1.pdf?sequence=1>
- Bernal, M.; García, J.; Moral, R.; Moreno, J., & Pascual, J. (2014). Formas de autogestión de la fracción orgánica de los residuos urbanos. En M. Bernal, J. García, R. Moral, J. Moreno & J. Pascual, *De residuo a recurso, el camino hacia la sostenibilidad* Madrid: Mundi-Prensa, pp. 289-292.
- Borrero, G. (2014). *Estudio comparativo del uso de dos sustratos con inóculos microbiales para el tratamiento de residuos orgánicos sólidos en compostaje doméstico*, tesis de maestría en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de Producción, Área Académica Agroforestal, TEC. Cartago, Costa Rica.
- Calvet Mir, L.; Gómez Baggethun, E., & Reyes García V. (2012a). Beyond food production: Ecosystem services provided by home gardens. A case study in Vall Fosca, Catalan Pyrenees, northeastern Spain. *Ecological Economics*, 74: 153-160.
- Campos, R., & Soto, S. (2014). Análisis de la situación del estado de la Gestión Integral de Residuos (GIR) en el Cantón de Guácimo, Costa Rica. *Tecnología en marcha*, 114-124.
- Campos, R., & Soto, S. (2014). Estudio de generación y composición de residuos sólidos en el Cantón de Guácimo, Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 122-135.
- Casseres, E. (1980). La lechuga. En E. Casseres (ed.), *Producción de hortalizas*. San José: IICA, pp. 181-193.
- CYMA (2012). *Ley para la Gestión Integral de Residuos, N.º 8839 del 13 de julio de 2010 (Anotada, concordada y comentada)*. Obtenido de Programa CYMA Competividad y Medio Ambiente. http://www.ifam.go.cr/docs/ley_comentada%20final.pdf

- Faverial, J., & Sierra, J. (15 de noviembre de 2014). Home composting of household biodegradable wastes under the tropical conditions of Guadeloupe (French Antilles). Obtenido de *Science Direct: Journal of Cleaner Production*. <http://ezproxy.itcr.ac.cr:2135/science/article/pii/S0959652614007963>
- Hashini, D. (2012). *Home gardens for improved food security and enhanced livelihoods in northern Sri Lanka*. Recuperado en octubre de 2015, de ProQuest: Michigan State University. <http://ezproxy.itcr.ac.cr:2092/docview/1266901588/1740FD44468F4EADPQ/1?accountid=27651>
- Mason, I.; Oberender, A., & Brooking, A. (2004). Source separation and potential re-use of resource residuals at a university campus. Obtenido de *Resources, Conservation & Recycling*, 40: 155-172. <https://www.deepdyve.com/lp/elsevier/source-separation-and-potential-re-use-of-resource-residuals-at-a-BcGqftiqlR/1>
- Méndez, H., & Herrera, J. (2003). Ensayo de variedades: Hortalizas para la producción ecológica. En M. Romero (ed.), *Producción ecológica certificada de hortalizas de clima frío* Bogotá: Fundación Universidad de Bogotá, pp. 167-169.
- Moore, A. (2010). *Valor y uso de las huertas caseras: agricultura sostenible*. Obtenido de ROAR, Nuestros Ensayos. https://www.gvsu.edu/cms3/assets/F8585381-E4E9-6F8E-F7EE2083CCE4F9AC/2010/nuestros_ensayos_-_las_huertas_caseras.pdf
- Moreno, H., & Patiño, N. (2010). *Elaboración de un recubrimiento comestible antimicrobial y antioxidante a partir de aceite de orégano (Origanum vulgare) aplicado a la ensalada primavera minimamente procesada de la empresa Defrescura*. Obtenido de Repositorio Universidad La Salle, Facultad de Ingeniería de Alimentos. <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/16052/T43.10%20M815e.pdf?sequence=2>
- OCDE (2012). Hacer frente a los retos globales y sociales a través de la innovación. En OCDE (ed.), *La Estrategia de Innovación de la OCDE*. México, D.F.: OCDE, pp. 198-199.
- Roberts, L. (2011). "9 billion?" *Science*, 333 (6042): 540-543.
- Trinh, L. N.; Watson, J. W.; Hue, N. N. De; Minh, N. V.; Chu, P.; Sthapit, B. R., & Eryzaguerre, P. B. (2003). Agrobiodiversity conservation and development in Vietnamese home gardens. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 97: 317-344.

Evaluación técnica de dos métodos de compostaje para el tratamiento de residuos sólidos biodegradables domiciliarios y su uso en huertas caseras

Technical evaluation of two methods for composting of organic wastes to be used in domestic vegetables gardens

Rooel Campos-Rodríguez¹, Laura Brenes-Peralta²,
María Fernanda Jiménez-Morales³

Fecha de recepción: 19 de febrero 2016
Fecha de aprobación: 3 de mayo de 2016

Campos-Rodríguez, R; Brenes-Peralta, L; Jiménez-Morales, M. Evaluación técnica de dos métodos de compostaje para el tratamiento de residuos sólidos biodegradables domiciliarios y su uso en huertas caseras. *Tecnología en Marcha*. Encuentro de Investigación y Extensión 2016. Pág 25-32.

DOI: 10.18845/tm.v29i8.2982



1. Doctor en Ciencias Naturales para el Desarrollo, docente e investigador de la Escuela de Agronegocios. Coordinador de la Maestría en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de Producción. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: rocampos@itcr.ac.cr
2. Ingeniera Agropecuaria Administrativa y máster en Gerencia Ambiental. Profesora Investigadora. Escuela de Agronegocios. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: labrenes@tec.ac.cr
3. Profesora Investigadora. Ingeniera Agropecuaria Administrativa y máster en Sistemas Modernos de Manufactura. Escuela de Agronegocios. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: maria.jimenez@tec.ac.cr

Palabras clave

Compostaje; residuos biodegradables; agricultura familiar; huertas caseras; microorganismos de montaña; método Takakura.

Resumen

La necesidad de plantear soluciones para apoyar la gestión integral de los residuos sólidos biodegradables ha llevado a proponer métodos de tratamiento como el compostaje, el cual consiste en la transformación de residuos sólidos por medios biológicos, bajo condiciones controladas, en productos como abono, sustrato o enmiendas para la agricultura. Por esto, se evaluó técnicamente dos métodos de compostaje de residuos sólidos biodegradables con miras a utilizar el abono resultante en huertas caseras: el primero, basado en la utilización de un sustrato degradador inoculado con microorganismos de montaña, y el segundo, inoculado mediante el procedimiento Takakura, denominados MM y TK en adelante.

En ambos sustratos se agregaron residuos sólidos biodegradables recolectados en comedores y sodas del Tecnológico de Costa Rica (TEC), cuya composición es similar a los residuos domiciliarios, y se analizaron las variables de temperatura, altura y pH del proceso de compostaje. Además se hicieron pruebas sensoriales del proceso y el producto resultante, y un análisis microbiológico del abono obtenido.

Ambos procesos presentaron comportamientos adecuados para la degradación de los residuos sólidos, con temperaturas superiores a 50 °C, una evolución de pH adecuada para este tipo de compostaje y una reducción en altura del volumen del material de compost. Además, no se observaron lixiviados ni se percibieron olores desagradables ni la presencia de insectos en los sitios de procesamiento. Si bien, por ambos métodos se obtuvo un abono inocuo y con características apropiadas para ser utilizado en huertas caseras, se identificaron diferencias significativas entre los procesos en cuanto a las variables temperatura y altura, no así en cuanto al pH; el compostaje con el método TK alcanzó una mayor temperatura y el volumen disminuyó más que con el MM, por lo que fue más eficiente en la reducción del residuo.

Keywords

Composting; organic waste; family farming; home vegetable gardens; mountain microorganisms; Takakura method.

Abstract

The need to achieve organic waste management solutions has led to treatment options of waste like composting. This practice is defined as the transformation of organic wastes by biological means in controlled conditions; the result is a fertilizer or substrate which can be used in agriculture. In this investigation, a technical evaluation of two composting methods to be applied in home vegetable gardens was carried out. The first method for degrading of residues evaluated consists in the addition of organic wastes to a substrate of Mountain Microorganisms; the second one consists in the addition of organic wastes to a Takakura substrate, pointed as MM and TK from now on. Organic remains were collected at institutional restaurants in Tecnológico de Costa Rica (TEC); being similar wastes to domestic ones. Three technical variables were measured all throughout the composting process: temperature, height and pH. Other observations like odor and presence of insects in the process and the final product were done, as well as a microbiological analysis of the compost.

By both methods, an adequate degrading process of organic wastes was possible, with temperatures over 50 °C, a correct pH evolution corresponding to a composting process and a reduction in the height of wastes. There were no lixiviates, disgusting odors or insects in the composting sites either. Both methods represent efficient organic waste treatments, which offer safe and appropriate compost for home vegetables gardening; nevertheless, there were significant differences between composting through TK and composting through MM in temperature and height, but not in pH. The TK composting method was more efficient in the reduction of the height of the wastes, since it reached higher temperatures, and showed a higher decrease in height than MM.

Introducción

Estudios generales efectuados en Costa Rica reportan que el 55% de los desechos son de tipo orgánico (Jica, 2014). Estudios más puntuales indican que la generación de residuos sólidos biodegradables es de alrededor del 44 al 52%, dependiendo del estrato social o zona del país (Campos & Soto, 2014), por lo que encontrar opciones sostenibles para un manejo integral es de suma importancia para reducir el impacto ambiental negativo que la ausencia de tratamiento ocasiona, así como por el potencial de su uso como sustrato, enmienda o fertilizante en actividades agrícolas tras su compostaje.

El resultado del compostaje es el compost, el cual se genera producto de la transformación biológica y controlada de los materiales orgánicos (Borrero, Pacheco, Arias & Campos, 2015). Sus características están determinadas por el tipo de material que se aporte y la tecnología y duración del proceso; es de buena calidad si el producto final es relativamente homogéneo, de color oscuro y olor a tierra de bosque (Soliva, 2011). El compostaje comprende cuatro fases: una *mesófila*, donde el material aumenta su temperatura a rangos de 20 a 35 °C; una *termófila*, donde aumenta de 35 a 65 °C y se digieren las moléculas complejas, por lo que facilita la eliminación de microorganismos patógenos; una fase de enfriamiento, y finalmente una de maduración (Bueno, 2010; Moreno & Moral, 2008). Para la degradación de los residuos sólidos biodegradables se pueden utilizar sustratos, que son materiales donde viven y crecen organismos sedentarios (FAO, 2013).

El compost resultante puede ser utilizado como sustrato para el crecimiento de plantas, pues estos abonos de tipo orgánico mejoran las características físicas del suelo, su fertilidad y la productividad de los cultivos (Ingelmo & Rubio, 2008). Para su aplicación en huertas caseras, es necesario capacitar a las personas que se encarguen de su cuidado, de forma tal que renueven conocimientos, desarrollen actitudes y modifiquen comportamientos, en dirección a acciones positivas para el medio ambiente (Campos & Camacho, 2014).

Para lograr el éxito en una práctica de este tipo, entre otras cosas, debería partirse de un compostaje procedente de un proceso de elaboración controlado, es decir, un producto con características físico-químicas y microbiológicas adecuadas para el cultivo (Woods End Research Lab, 2001, citado por Masaguer & Benito, 2008).

Existen diversos tipos de compostaje, entre ellos, el producido por la adición de sustratos con microorganismos de montaña (muy utilizado en América Latina) y el producido por el método Takakura, promovido por el Sr. Koji Takakura, investigador del IGES, (Instituto para las Estrategias Globales Ambientales) en Indonesia (Borrero, 2014). Este tipo de compostaje propicia una diversidad de poblaciones de elevada cantidad de microorganismos, además de aumentar los procesos de degradación de los residuos sólidos. Investigaciones realizadas por (Borrero, Pacheco, Arias & Campos, 2015) demuestran que la presencia de microorganismos

degradadores se relaciona con el tipo de sustrato y con condiciones ambientales como la temperatura y el pH.

Metodología

Los sustratos utilizados para el compostaje fueron inoculados con microorganismos de montaña (MM) y con sustrato tipo Takakura (TK) por separado. En ambos casos, los sustratos eran mezclas de granza de arroz y carbón. El MM se obtuvo por medio de la preparación de una mezcla con mantillo de bosque, semolina, granza de arroz, melaza y agua; el inóculo de microorganismos TK, por medio de la preparación, con cinco días de antelación, de dos soluciones fermentativas, una dulce (agua + azúcar de mesa + yogurt + leche agria + queso + kefir + cerveza + levadura) y una salada (agua + sal de mesa y cáscaras de frutas y hortalizas de hoja).

El diseño experimental fue completamente aleatorio, y consistió en dos bloques aleatorios, cada uno de diez repeticiones. Las unidades experimentales eran cajas plásticas caladas, de 50 x 30 x 25 centímetros, paredes internas y base de cartón. En cada caja se colocaron 5 kilogramos de la mezcla del sustrato inoculado con MM, para el bloque 1, y 5 kilogramos del sustrato inoculado con TK, para el bloque 2. Se les adicionaron 1,5 kilogramos de residuos por día, durante 16 días hábiles. Para esto, se recolectaron residuos orgánicos provenientes de las sodas del Tecnológico de Costa Rica. Los residuos se picaron hasta lograr tamaños aproximados de 3 x 3 centímetros; luego se incorporaron a cada caja, se mezclaron y taparon hasta el día siguiente, para una nueva aplicación.

Se estudiaron las variables de temperatura (°C), medida con un termómetro de espiga; pH (escala de pH de 1 a 14), medido con un ph-metro electrónico marca Atago modelo pHTestr 30, y la altura (cm). Además se realizaron observaciones sensoriales generales, como presencia de insectos, roedores, olores o lixiviados. La temperatura y la altura se midieron diariamente, y el pH una vez cada ocho días.

Los datos se analizaron con el programa estadístico Minitab 17, con pruebas de ANOVA unidireccional y pruebas de Tukey, todas basadas en el valor p de 0,05, para determinar las diferencias entre los dos tipos de tratamiento.

Finalmente, el compost obtenido según cada método se analizó en el Laboratorio de Suelos y en el Laboratorio del Servicio de Fitoprotección, ambos del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia de Tecnología (INTA), para conocer su composición química y condiciones microbiológicas.

Resultados y discusión

Análisis de variables físico-químicas

Respecto a la temperatura en el proceso de compostaje, se registraron datos iniciales entre los 25 °C y 30 °C en el TK y los 20 y 22 °C en el MM. Al agregar los residuos sólidos orgánicos a las cajas de compostaje, en las dos aumentó la temperatura hasta obtener mediciones cercanas a los 40 °C, lo que demostró una relación entre el aumento de la temperatura y la adición de los residuos. En la evolución de la temperatura, tanto en el aumento como en el descenso, las pruebas estadísticas indicaron que hay diferencias significativas entre los dos tipos de tratamiento, con un valor de $p = 0,0002$.

Al comparar los aumentos de esta variable, el TK obtuvo el valor máximo (55 °C) en 4 días, mientras que el MM obtuvo su valor más alto, de 53 °C, a los 6 días, lo que demuestra una ventaja del TK sobre el MM, en términos de temperatura (figura 1).

Se puede observar que los valores anteriores corresponden a temperaturas ideales para iniciar el proceso de compostaje adecuado. Esto a su vez comprueba que las temperaturas máximas en los dos tratamientos no sobrepasaron valores que pudieran afectar otros factores propios de un buen compostaje como la biodegradación de los residuos incorporados (Borrero, 2014) y la posible relación carbono-nitrógeno, oxígeno y humedad.

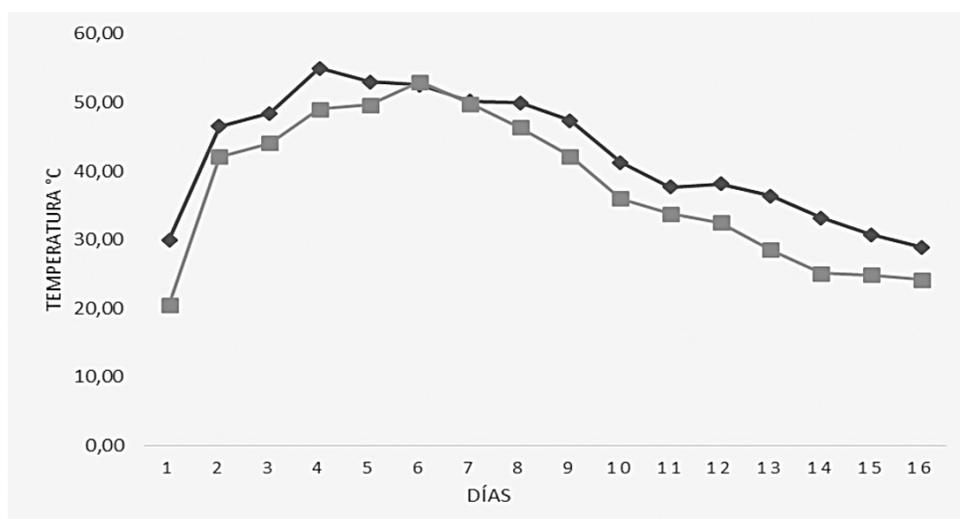


Figura 1. Evolución de la temperatura

El pH tiene una influencia directa en el compostaje; esto se puede observar en la dinámica de los procesos microbiológicos, donde las reacciones anaeróbicas liberan ácidos orgánicos que provocan la reducción de esta variable (Morero y Moral, 2008).

Según los mismos autores (2008), la evolución del pH en el compostaje se da en tres fases. En la inicial se observa una disminución del pH debida a la acción de los microorganismos en la materia orgánica más delicada, lo cual produce una liberación de ácidos orgánicos. En la segunda fase se produce una alcalinización progresiva del medio, debido a la pérdida de ácidos orgánicos y a la liberación de amoníaco procedente de la descomposición de proteínas, y en la tercera, el pH tiende a la neutralidad por la formación de compuestos orgánicos del suelo. Si durante el proceso de compostaje el pH es bajo, se inhibe la degradación orgánica, pero si el pH se mantiene por encima de 7,5 o cercano a este valor, se puede decir que hay suficiente descomposición.

En los casos estudiados, tanto el compostaje con TK como el compostaje con MM se mantuvieron muy constantes en cuanto a sus valores de pH en las tres fases descritas anteriormente. En los primeros 10 días, se registró un pH entre 4 y 6. Durante la segunda fase, en ambas cajas el pH medido varió entre 7,05 y 9,20; lo que demostró que estos aumentos se produjeron de manera progresiva durante la elaboración del compostaje. En la tercera fase, donde se suspendió la aplicación de residuos sólidos orgánicos, se registró un pH de 7,01, como valor mínimo, y 7,51, como valor máximo (figura 2.). Lo anterior, cotejado con la literatura, indicó que el proceso de descomposición fue el adecuado.

En terminos de la variable altura, se observó que después de la última adición, hubo una reducción importante de la altura en las cajas, en los dos tipos de tratamiento, y al realizar las pruebas estadísticas, se demostró que hubo diferencias significativas entre ellos, indicadas por el valor de $p = 0,0001$.

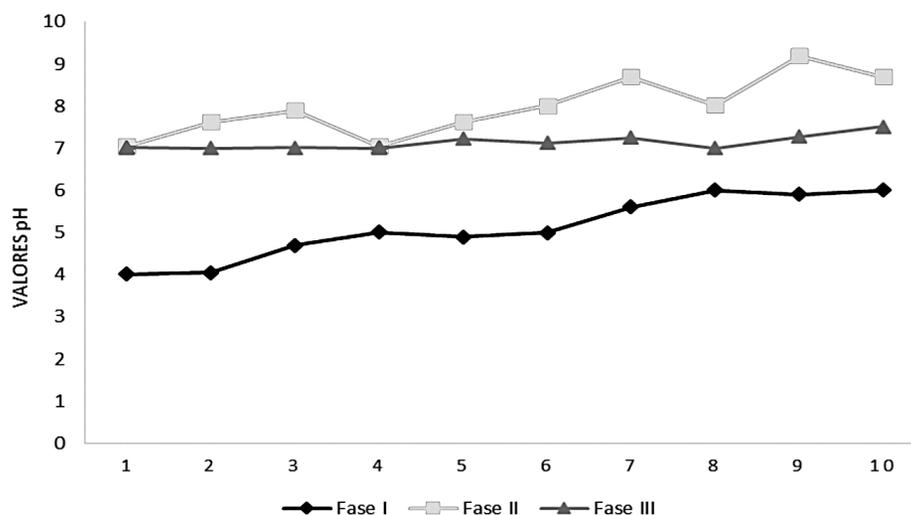


Figura 2. Comparación del pH.

El compostaje con TK presentó la mayor reducción, con un promedio total de 7,5 centímetros menos, mientras que el compostaje con MM, una reducción promedio de 2,5 cm. Estos resultados coinciden con estudios de Borrero *et.ál* (2015), donde el TK redujo hasta un 36% el volumen del medio, y el MM lo redujo hasta un 24%.

Análisis sensoriales

Tanto con el tratamiento MM como con el TK se lograron condiciones idóneas para su aceptación; entre ellas, se notó que su olor durante el proceso fue agradable, y al final, semejante al de tierra mojada, recomendado según la literatura (Morero & Moral, 2008). No hubo presencia de insectos ni generación de lixiviados. La humedad fue la adecuada, cercana al 37%, lo que permitió un buen manejo del material obtenido. La consistencia del material en ambas formas de compostaje facilitó la incorporación de nuevos residuos sólidos orgánicos durante la etapa de adición, permitiendo que el proceso de compostaje se diera sin alteración de sus factores.

Análisis microbiológico

El compost obtenido por el método MM resultó bajo en hongos, con una tendencia media en bacterias y alto en actinomicetes. Se detectó el crecimiento de hongos *Fusarium sp.* y *Fusarium oxysporum*, y de la bacteria *Erwinia sp.* Se determinó que no hubo crecimiento de bacterias patógenas, como las *Pseudomonas sp.* (grupo fluorescente), las *Xanthomonas sp.* y la *Ralstonia solanacearum*, pero sí abundantes nematodos de vida libre. Respecto al compost TK, se observó un nivel medio en hongos, y bajo en bacterias y en actinomicetes, y un crecimiento del hongo *Mortierella sp.* (hongo poscosecha habitual) y de la bacteria *Erwinia sp.*, así como abundantes nematodos de vida libre; por otro lado, se observó una disminución de bacterias patógenas, como las *Pseudomonas sp.* (grupo fluorescente), las *Xanthomonas sp.* y la *Ralstonia solanacearum*.

De los resultados anteriores, se infiere que pudo existir contaminación con *Fusarium sp.* en el sitio de preparación de los sustratos, en ambos casos, pues los dos se prepararon en el mismo lugar, adyacente a un área agrícola, y este hongo ha sido detectado precisamente en áreas de cultivo. Sin embargo, se puede notar que en el caso del compost obtenido por el TK, el hongo ya no estaba presente, por lo que es posible que la fuente de contaminación fueran los propios residuos orgánicos de frutas y hortalizas. En ambos casos se localizó la bacteria *Erwinia sp.*, y no así otras bacterias patógenas propias de cultivos, considerando el uso potencial de este material en agricultura familiar o doméstica.

Conclusiones

Ambos sustratos inoculados tuvieron un efecto satisfactorio en el comportamiento de las variables medidas en el proceso de elaboración del compostaje, por tanto, queda probado que ambos sustratos son efectivos como degradadores de residuos sólidos orgánicos y garantizan su eficiente reducción; además, que ambos tipos de tratamiento son inocuos y el compost producido promete ser útil en la agricultura a pequeña escala.

El tratamiento con TK presentó diferencias significativas con el tratamiento con MM, específicamente una ventaja sobre el segundo, ya que eleva la temperatura más rápido que el MM, lo que reduce la posibilidad de que se cree un ambiente propicio a la producción de microorganismos patógenos que afecten la calidad o el proceso normal de la degradación de los residuos, como fue el caso del hongo *Fusarium sp.* Además, inhibe la aparición de características físicas no deseables, como el mal olor o los lixiviados contaminantes.

Mediante la evaluación del pH se observó el efecto positivo del uso de MM y TK como medios de degradación de residuos sólidos en la producción de compostaje.

Al evaluar la altura en los dos sustratos, se obtuvo una diferencia significativa, pues el TK fue más eficiente en la reducción de la altura durante el proceso de compostaje.

Luego del estudio de las variables mencionadas, se concluye que el TK en comparación con el MM es más eficiente como sustrato degradador de residuos sólidos biológicos, por esto se recomienda su uso por encima del de MM, como abono en huertas caseras.

Bibliografía

- Borrero, G.; Pacheco, F.; Arias, D., & Campos, R. (s.f.) Estudio comparativo del uso de dos sustratos con inóculos microbiales para el tratamiento de residuos orgánicos sólidos en compostaje doméstico: Variables físicas, químicas y biológicas en el proceso de compostaje. *VI Simposio Iberoamericano en Ingeniería de Residuos Sólidos: Hacia la Carbono Neutralidad 2021. CYTED*. ISBN: 978-9968-641-28-9. Pp. 522-528.
- Borrero, G. (2014). *Estudio comparativo del uso de dos sustratos con inóculos microbiales para el tratamiento de residuos orgánicos sólidos en compostaje doméstico* (tesis de Maestría en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de Producción, Área Académica Agroforestal). Tecnológico de Costa Rica, Cartago.
- Campos, R., & Camacho, M. (2014). Factores determinantes para una acción ambiental positiva de la Gestión Integral de Residuos (GIR) en el cantón de Guácimo, Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 27(4), 89-101.
- Campos, R., & Soto, S. (2014). Estudio de generación y composición de residuos sólidos en el cantón de Guácimo, Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 27(3), 122-135
- FAO (2013). *Sustrato, glosario de biotecnología para la agricultura y la alimentación*. Depósito de Documentos de la FAO. Consultado el 30 de abril de 2013 en <http://www.fao.org/docrep/004/y2775s/y2775s0d.htm#TopOfPage>
- Ingelmo, F., & Rubio, J. L. (2008). Efecto de la aplicación del compost sobre las propiedades físicas y químicas del suelo. En J. Moreno & R. Moral (eds.), *Compostaje* (pp. 305-328). Barcelona: Ediciones Mundi-Prensa.
- Jica, 2014. Investigadora del ITCR comprueba eficiencia del compostaje Takakura. *Noticias desde la Cooperación Japonesa*. Consultado el 14 de agosto de 2014 en http://www.jica.go.jp/costarica/espanol/office/topics/c8h0vm000028ca97-att/noticias_72.pdf

- Masaguer, A., & Benito, M. (2008). Evaluación de la calidad del compost. En J. Moreno, & R. Moral (eds.), *Compostaje* (págs. 285-304). Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
- Morero, J., & Moral, R. (2008). *Compostaje*. Madrid: Aedos, S.A.
- Soliva, M. (2011). Materia orgánica y compostaje: control de la calidad y del proceso. Escuela Superior de Agricultura de Barcelona (en línea). Consultado 10 de febrero 2015. Disponible en <http://biomusa.net/es/jornadas-y-actividades/jornada-tecnica-sobre-calidad-y-fertilidad-del-suelo/70-materia-organica-y-compostaje-control-de-la-calidad-y-del-proceso/file>.

Regresión lineal simple y múltiple: aplicación en la predicción de variables naturales relacionadas con el crecimiento microalgal

Simple and multiple regression: application
in the prediction of natural variables related
to microalgae growing process

Arys Carrasquilla-Batista¹, Alfonso Chacón-Rodríguez², Kattia Núñez-Montero³, Olman Gómez-Espinoza⁴, Johnny Valverde⁵, Maritza Guerrero-Barrantes⁶

Fecha de recepción: 31 de marzo de 2016
Fecha de aprobación: 21 de mayo de 2016

Carrasquilla-Batista, A; Chacón-Rodríguez, A; Núñez-Montero, K; Gómez-Espinoza, O; Valverde, J; Guerrero-Barrantes M. Regresión lineal simple y múltiple: aplicación en la predicción de variables naturales relacionadas con el crecimiento microalgal . *Tecnología en Marcha*. Encuentro de Investigación y Extensión 2016. Pág 33-45.

DOI: 10.18845/tm.v29i8.2983



- 1 Ingeniera Electrónica y Máster en Computación. Ingeniería Mecatrónica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. Correo electrónico: acarrasquilla@itcr.ac.cr
- 2 Ingeniero Electrónico, Máster en Literatura Inglesa y Doctor en Ingeniería. Ingeniería Electrónica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. Correo electrónico: alchacon@itcr.ac.cr
- 3 Ingeniera en Biotecnología. Escuela de Biología. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: knunez@itcr.ac.cr
- 4 Ingeniero en Biotecnología. Escuela de Biología. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: oespinoza@itcr.ac.cr
- 5 Máster en Nutrición y Salud, Doctor en Ciencias Naturales. Escuela de Química. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: jovalverde@itcr.ac.cr
- 6 Bióloga, Máster en Ciencias con énfasis en Ecología. Escuela de Biología. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: mguerrero@itcr.ac.cr

Palabras clave

Microalgas; regresión simple; regresión múltiple; variables predictivas.

Resumen

En la actualidad, existe una creciente necesidad en diferentes campos de investigación y producción, y en la industria de la agricultura de precisión, de almacenar y procesar datos provenientes de múltiples sensores. Muchas veces estos dispositivos se encuentran ubicados en lugares remotos. El modo usual de recolección de datos implica el uso de un equipo para cada variable de interés, lo cual dificulta y encarece la integración y el procesamiento conjunto. Se considera entonces la posibilidad de incorporar la temática del Internet de las Cosas, con el fin de aprovechar las capacidades computacionales y de procesamiento en la nube para que los investigadores puedan disponer de la información que les permita tomar decisiones oportunas.

La presente investigación se centra en los modelos de regresión lineal, simple y múltiple, con el fin de establecer las bases para modelar la relación entre las variables de temperatura, luz, pH y oxígeno disuelto, y de esta manera poder conocer los factores que afectan el crecimiento del cultivo de microalgas en futuras investigaciones.

Keywords

Microalgae; simple regression; multiple regression; predictive variables.

Abstract

Nowadays, there is a growing need in various research fields and in the industry of precision agriculture to record and process data from multiple sensors, sensors sometimes located in remote areas, miles apart from each other. The usual approach to sensor data recording implies measurement of each variable in separate equipment, making it difficult and expensive to integrate and process jointed data. The possibility of incorporating the theme of Internet of Things (I.o.T.) in research is being analyzed to take advantage of the ubiquitous computing capabilities available today.

This article is about simple regression and multiple regression models, which offer the bases to explore the relationship between variables associated to microalgae kinetic growth: temperature, light, pH and dissolved oxygen. Recorded data will provide new approaches to present works; in this way, researchers will perform various data analysis online.

Introducción

En la actualidad, el modo más común de medición de variables ambientales en agricultura e investigación es por medio de múltiples dispositivos electrónicos que trabajan en forma no coordinada; cada dispositivo es utilizado para adquirir diferentes datos de interés, tales como humedad, temperatura, dióxido de carbono, luminosidad y radiación solar. Este acercamiento es muchas veces lento y tedioso porque se requiere usualmente un equipo por cada variable que va a ser medida, y además, se deben instalar y manipular diferentes herramientas de software para leer y procesar la información suministrada, la cual generalmente es integrada manualmente en una base de datos, por un operario que recopila los datos de interés en el campo o en el laboratorio. Por otra parte, estos dispositivos solo guardan los valores máximos y

mínimos de las variables en estudio. En la última década, mucho se ha avanzado en lo referente a la integración de dispositivos y sensores mediante el uso de redes inalámbricas, pero la mayoría de los acercamientos a la solución del problema se han visto seriamente limitados por el corto alcance suministrado y la baja capacidad de procesamiento de los nodos (Yick, Mukherjee & Ghosal, 2008). Esto ha limitado su aplicación a sitios donde los requerimientos de transferencia de datos no son tan altos, y donde existen restricciones de potencia que justifican el uso de plataformas con baja capacidad de procesamiento.

Internet de las Cosas (I. de C.)

La evolución de las tecnologías inalámbricas 3G y 4G (asociado con la caída de los costos de estos sistemas de comunicación) y el surgimiento del Internet de las Cosas (IoT., Internet of Things, por sus siglas en inglés) (Evans, 2011), también llamado Internet de Todas las Cosas (Internet of Everything, I. E.), ofrece una solución viable y práctica para la integración de múltiples sensores. Esta integración permite explotar las grandes capacidades de procesamiento y almacenamiento disponibles por medio de Internet, donde se obtiene ventaja de técnicas complejas de procesamiento, usualmente conocidas como “fusión de datos de múltiples sensores”, para proveer a los investigadores no solo con un amplio rango de series masivas de datos provenientes de múltiples sitios remotos, sino que además se tiene la posibilidad de aplicar procesos predictivos y de estimación. Las limitaciones más comunes en el uso de este tipo de datos en redes inalámbricas convencionales –donde normalmente se tienen altos requerimientos de almacenamiento y de procesamiento computacional para el desarrollo de algoritmos probabilísticos o estadísticos– son superadas.

Específicamente en esta investigación, se explora sobre los métodos estadísticos de regresión lineal simple y múltiple con el fin de evaluar la posibilidad de su aplicación para la predicción del crecimiento de la microalga *Chlorella sp.* en cultivo. Las variables relacionadas con la dinámica del crecimiento de las microalgas, que se integrarían en un modelo de regresión múltiple pueden ser temperatura, pH, intensidad de luz y oxígeno disuelto.

El presente documento ha sido organizado de la siguiente manera: en la sección introductoria se explica la importancia de la aplicación de los modelos de regresión lineal y múltiple en el estudio del crecimiento de la microalga *Chlorella sp.*; en la segunda sección se describe la regresión lineal, la estructura e hipótesis del modelo y los procedimientos de evaluación; posteriormente, se desarrolla una breve introducción a la terminología utilizada en la regresión múltiple, y se describe la hipótesis y prueba de hipótesis; finalmente, se exponen las conclusiones del estudio realizado.

Microalga *Chlorella sp.*

El calentamiento global es el resultado de la gran cantidad de emisiones de CO₂ y se ha convertido en un tema obligado en todo lo relacionado con el medio ambiente.

Las microalgas son un grupo de organismos unicelulares de crecimiento rápido; una de sus características más importantes es la habilidad para convertir de manera muy eficiente el CO₂ en biomasa. Este proceso de biomitigación representa varias ventajas, tales como una mayor tasa de crecimiento y una mayor fijación de CO₂ en comparación con la obtenida de los bosques, la agricultura y las plantas acuáticas (Borowitzka, 1999). Varios estudios relacionados con la fijación de CO₂ por medio del cultivo microalgal son descritos en la literatura (Sydney, Sturm, Carvalho, Thomaz-Soccol & Larroche, 2010; Wang, Li, Wu & Lan, 2008), así como las ventajas de controlar y mantener las microalgas bajo condiciones ópticas de crecimiento en fotobioreactores, estudiadas por Stewart y Hessami, (2005).

Ya el 23 de junio de 1981 (Fox, 1996), la *Chlorella sp.* fue certificada GRAS (Generally Recognized As Safe, Generalmente Reconocida como Segura) y desde entonces puede ser usada como alimento sin riesgos para la salud.

La *Chlorella sp.* contiene

- 53% de proteína,
- 23% de carbohidratos,
- 9% de grasa,
- 5% minerales y
- 2% clorofila. (Henrikson, 1994)

La clorofila es la que le permite a la *Chlorella sp.* crecer rápidamente, en forma similar a las plantas. El metabolismo principal es realizado por medio de la fotosíntesis (Vonshak, 1997), esto significa que la fuente principal de energía es la luz del sol.

La *Chlorella sp.* también es rica en

- vitamina B, específicamente B12, vital en la formación y regeneración de las células de la sangre, y
- hierro, que puede ser utilizado en el tratamiento y prevención de anemia.

De acuerdo con Sung, Lee, Park y Choi (1999), la microalga *Chlorella sp.* tiene una tasa casi constante de crecimiento a valores de pH mayores a 4,2, y por lo tanto puede desarrollarse fácilmente en estanques y lagos. Otra ventaja de la *Chlorella sp.* comparada con otras microalgas es la alta tolerancia a las temperaturas y a las concentraciones de CO₂; puede mantener su crecimiento a 42 °C y 40% de CO₂ (Sakai, Sakamoto, Kishimoto, Chihara & Karube, 1995).

En la figura 1 se presenta un diagrama del proceso metabólico de la microalga, en el cual se esquematizan los procesos de biosíntesis de varios productos derivados de las microalgas. A pesar de que el cloroplasto puede funcionar como una fábrica de proteínas e hidrógeno (azul), el núcleo juega un papel fundamental en el control metabólico (rojo punteado). Ambas organelas contienen genomas individuales, lo que la provee de la posibilidad de una incorporación transgénica (línea azul y roja).

El objetivo de la presente investigación es ofrecer una base teórica en el tema de regresión simple y regresión múltiple, con el fin de incorporar en futuras investigaciones algoritmos de predicción del crecimiento de la microalga a partir de la medición de variables ambientales en los medios de cultivo. Los datos serán recolectados por un dispositivo electrónico, el cual tendrá la capacidad de conectarse a Internet; de esta forma los investigadores podrán bajar la base de datos requerida, con el fin de analizar y tomar decisiones y, en un futuro, permitir la integración de los datos en un modelo de predicción del crecimiento, que sea procesado en la nube de Internet.

Regresión lineal simple

Modelo de regresión

Los factores que intervienen en un experimento pueden ser cuantitativos o cualitativos. Un factor cuantitativo es aquel cuyos niveles pueden asociarse con puntos en una escala numérica, como la temperatura, la humedad relativa, la conductividad eléctrica, la presión o el tiempo. Los factores cualitativos son aquellos cuyos niveles no pueden ordenarse por magnitud.

Los operarios, los proveedores, los turnos de trabajo y las máquinas son factores cualitativos, ya que no existe ninguna razón para ordenarlos bajo algún criterio numérico particular (Montgomery, 2008). En el caso especial del cultivo de microalgas, se tienen algunos factores cualitativos como son operario, día de toma de muestras y lixiviado. Las variables relacionadas con el crecimiento son cuantitativas: temperatura, pH, oxígeno disuelto, dióxido de carbono, intensidad de luz y otras. Además, la variable de interés o salida (Y) se mide en células por mililitro (cel/ml), por lo tanto también es cuantitativa.

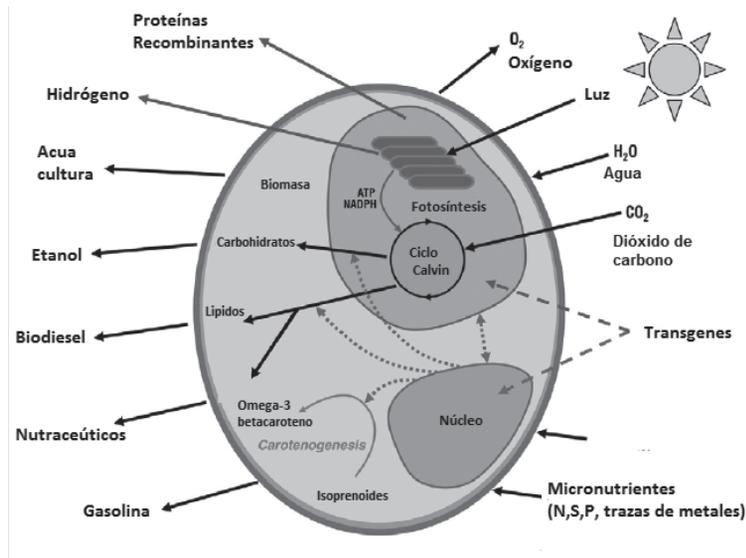


Figura 1. Representación diagramática de un proceso microalgal por medio de sustancias bioactivas. La luz, el agua y el CO_2 se relacionan con el crecimiento de las microalgas, durante el cual se produce oxígeno. Rosenberg et al (2008).

Se conoce como regresión simple el cálculo de la ecuación correspondiente a la línea que mejor describe la relación entre la respuesta y la variable que la explica. Dicha ecuación representa la línea que mejor se ajusta a los puntos en un gráfico de dispersión (ver figura 2).

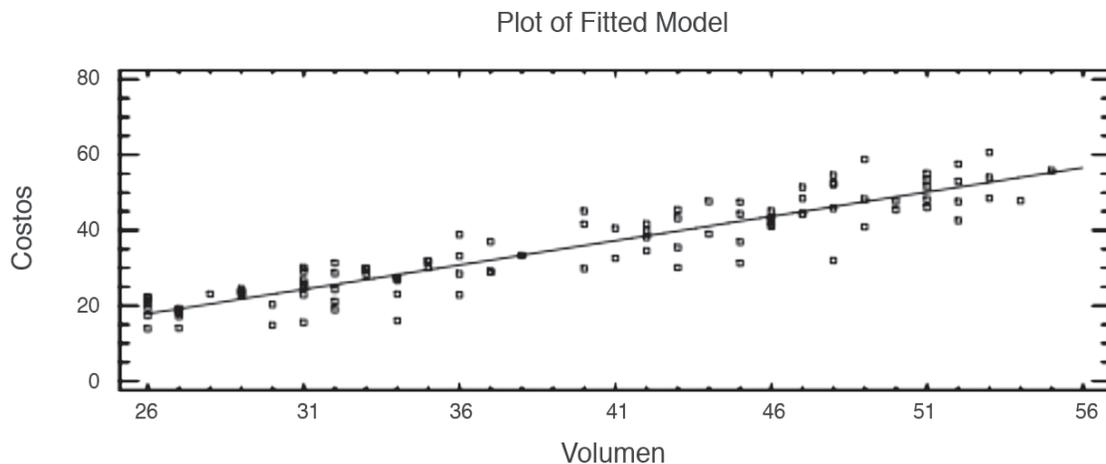


Figura 2. Representación de una ecuación de regresión simple para la relación entre costos y volumen.

Se debe recordar que la respuesta es la variable que se mide. Si se asocia con el crecimiento de microalgas será células/ml y la misma se establece como dependiente. El factor que influye en esta respuesta puede ser una cualquiera de las variables cuantitativas mencionadas, las cuales son denominadas independientes.

En la regresión simple se tiene una única variable predictora. Algunas veces se tiene interés en dos o más variables regresoras o predictoras. En esos casos, se debe recurrir al uso de regresión múltiple. A partir de la regresión lineal es posible hacer predicciones sobre la respuesta con base en valores de la variable predictora.

La ecuación para una línea recta es $y = b_0 + b_1x$ donde

- y es la variable respuesta;
- x es la variable predictora
- b_0 es la intersección, determina el valor de y cuando x es cero, y
- b_1 es la pendiente, determina la cantidad en la que cambia y cuando x se incrementa en una unidad.

Las distancias entre los puntos y la línea de regresión se llaman residuos. Ellos representan la porción de la respuesta que no es explicada por la ecuación de regresión; es decir que la diferencia entre el valor observado y el valor aproximado es el residuo.

En cualquier análisis de regresión se observará que algunos puntos están más cerca de la línea y otros mucho más lejos de ella. Entre más cerca se encuentren los puntos a la línea, mejor será el ajuste entre la línea de regresión y el dato. Los residuos permiten verificar la ecuación con el fin de comprobar cuan bien se ajusta la línea a los datos.

En resumen, se puede establecer que la pendiente de una ecuación de regresión indica el efecto de la variable predictora sobre la variable respuesta. En la regresión se utilizan los llamados mínimos cuadrados, también conocidos como mínimos cuadrados de regresión, los cuales determinan la línea que minimiza la suma de las distancias verticales cuadradas, desde los puntos hacia la recta (ver figura 3).

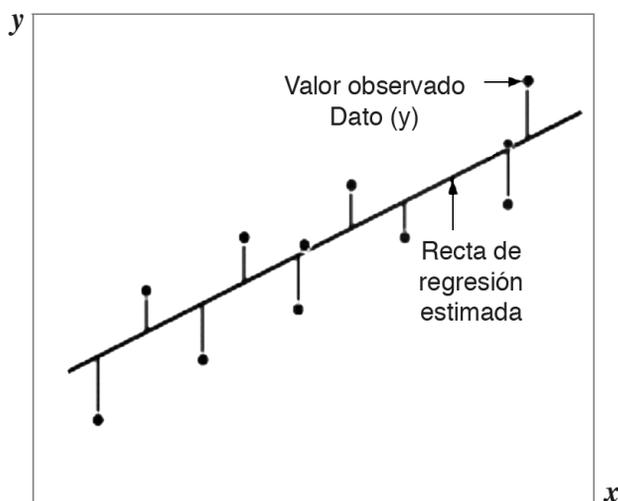


Figura 3. Representación de los mínimos cuadrados.

Hipótesis del modelo de regresión lineal simple

Linealidad: La relación existente entre X e Y es lineal, $f(x) = \beta_0 + \beta_1 x$

Homogeneidad: El valor promedio del error es cero, $E[u_i] = 0$

Homocedasticidad: La varianza de los errores es constante, $\text{Var}(u_i) = \sigma^2$

Independencia: Las observaciones son independientes, $E[u_i u_j] = 0$

Normalidad: Los errores siguen una distribución normal, $u_i \sim N(0, \sigma)$

Prueba de hipótesis y R^2

¿Cómo podemos comprobar si la línea de regresión es significativa? Para esto, se establecen las siguientes relaciones:

- Hipótesis nula $H_0, \beta_1 = 0$
- Hipótesis alternativa $H_1, \beta_1 \neq 0$
- P es la probabilidad, está dada entre 0 y 1.

Se comprueba si el valor verdadero de la pendiente, β_1 , es igual a 0. Si la línea es totalmente horizontal, la pendiente es cero y no existe ninguna relación lineal entre las variables. Pero, si la línea no es horizontal, la pendiente no es cero, y puede ser que exista una relación entre las variables.

Si el valor de $P > \alpha$, no se rechaza H_0 y si $P \leq \alpha$, se rechaza H_0 . Esto implica que se rechaza la hipótesis nula de que la pendiente es igual a cero. Un valor común para α es 0,05.

Después que se determina que la relación entre variables es estadísticamente significativa, se puede establecer si la respuesta se explica por la variable de regresión, es decir, si la variable predictora explica la mayor parte de las variaciones en la respuesta. En este caso, los puntos en el gráfico de dispersión están ubicados cerca de la línea y los residuos son pequeños.

Para medir cuan alejado está un resultado de la respuesta o cuánta variabilidad existe en la respuesta, de acuerdo a la variable explicatoria, se utiliza R^2 . R^2 es un valor entre cero y uno que usualmente es expresado como un porcentaje para hacerlo más fácil de interpretar. Como porcentaje R^2 tiene su valor entre 0% y 100%.

Para determinar si una variable predictora está relacionada con la variable respuesta, se puede llevar a cabo una prueba de hipótesis de la pendiente. La hipótesis nula establece que la pendiente es cero y la hipótesis alternativa especifica que la pendiente no es igual a cero.

Si el valor P de la prueba es menor que α , se rechaza la hipótesis nula y se concluye que la variable predictora está significativamente relacionada con la variable respuesta.

El valor de R^2 establece numéricamente si la línea de regresión se alinea o encaja con los puntos e indica cuánta variación existe en la variable respuesta y si esta se explica por la variable de regresión.

En la regresión se deben cumplir los tres rubros siguientes:

1. Los errores son aleatorios e independientes (*Minitab residual plots*).
2. Los errores tienen una distribución normal (*Minitab normal probability plot*).
3. Los errores tienen varianza constante a lo largo de todos los valores de x (*Minitab plot the residuals vs fitted values*).

Tipos de factores en el modelo de regresión

Tomando en consideración el diseño inicial y el análisis de un experimento, los factores involucrados se tratan de manera idéntica. El investigador está interesado en determinar diferencias, en caso de haberlas, entre los niveles de los factores

En algunos modelos puede encontrarse que la diferencia en las respuestas asociadas a los niveles de un factor no es la misma que en las respuestas asociadas a otro u otros factores. Cuando esto ocurre, existe una interacción entre los factores; si además algunos factores del diseño son cuantitativos, entonces una representación en un modelo de regresión del experimento factorial de un factor, podría escribirse como sigue (Gutiérrez & De la Vara, 2012):

Si la recta de regresión es

$$y = \beta_0 + \beta_1 x$$

Cada valor y_i observado para un x_1 puede considerarse como el valor esperado de Y dado x_1 más un error (expresado como ε_i):

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \varepsilon_i$$

Donde los ε_i se suponen errores aleatorios con distribución normal, media cero y varianza σ^2 ; β_0 y β_1 son constantes desconocidas (parámetros del modelo de regresión). Al enfoque general para ajustar modelos empíricos se le llama análisis de regresión, el cual toma en consideración la respuesta a un evento determinado. El análisis de regresión es una técnica estadística para investigar la relación funcional entre dos o más variables, mediante ajustes en un modelo matemático. La regresión lineal simple, como ya se dijo, utiliza una sola variable de regresión y el caso más sencillo es el modelo de línea recta. Supóngase que se tiene un conjunto de pares de observaciones (x_1, y_i) , se busca encontrar una recta que describa de la mejor manera cada uno de esos pares observados.

Se considera que la variable X es la variable independiente o regresiva y se mide sin error, mientras que Y es la variable respuesta para cada valor específico x_i de X ; además, Y es una variable aleatoria con alguna función de densidad para cada nivel de X . En las figuras 4 y 5, se muestra esta relación.

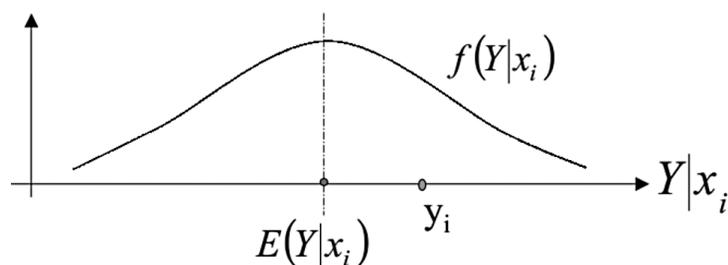


Figura 4. Densidad de la variable respuesta Y .

Puede resultar útil para el investigador ajustar una curva de respuesta a los niveles de un factor cuantitativo para contar así con una ecuación que relacione la respuesta con el factor. Esta ecuación podría utilizarse para hacer interpolaciones, es decir, para predecir la respuesta en niveles intermedios de los factores, respecto de los que se utilizaron realmente en el experimento.

Cuando al menos dos de los factores son cuantitativos, puede ajustarse una superficie de respuesta para predecir Y con varias combinaciones de los factores del diseño. En general, se usan métodos de regresión lineal para ajustar estos modelos a los datos experimentales.

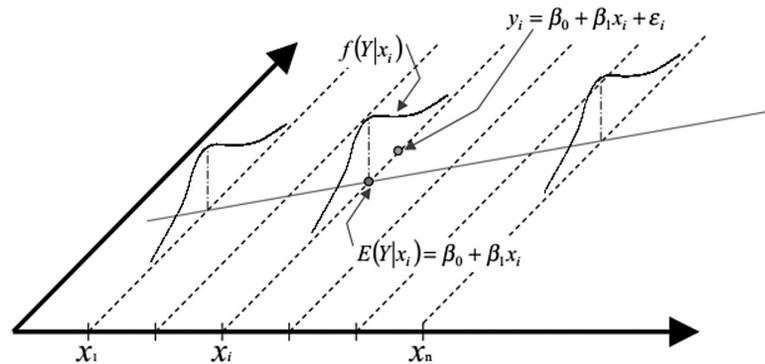


Figura 5. Valor esperado de Y dado x_1 .

Ajuste de curvas y superficies de respuesta

En un diseño factorial 2^k , es posible expresar los resultados del experimento en términos de un modelo de regresión. Puesto que 2^k es tan solo un diseño factorial, puede utilizarse un modelo de los efectos o de las medias, pero el enfoque del modelo de regresión es mucho más natural e intuitivo.

En el sistema de los diseños 3^k , cuando los factores son cuantitativos, es común denotar los niveles bajo, intermedio y alto con -1 , 0 y $+1$, respectivamente. Con esto se facilita el ajuste de un modelo de regresión que relaciona la respuesta con los niveles de los factores.

Regresión múltiple

Modelos de regresión múltiple

El modelo de regresión múltiple es la extensión del modelo de regresión simple a k variables explicativas. La estructura del modelo de regresión múltiple es la siguiente:

$$y = f(x_1, \dots, x_k) + \epsilon$$

Donde

- y es la variable explicada, dependiente o respuesta.
- x_1, \dots, x_k son las variables explicativas, regresores o variables independientes.
- $y = f(x_1, \dots, x_k)$ es la parte determinista del modelo.
- ϵ representa el error aleatorio. Contiene el efecto sobre y de todas las variables distintas de x_1, \dots, x_k .

El modelo de regresión lineal múltiple tiene la forma:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon$$

El modelo de regresión lineal múltiple se utiliza cuando

1. La variable dependiente, Y , depende linealmente de cada una de las variables explicativas, x_1, \dots, x_k .
2. Un regresor no basta para explicar suficientemente la variabilidad de y .

Modelo de regresión múltiple con dos regresores

En el caso particular en que haya dos regresores, $k = 2$, el modelo tendría la forma:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \epsilon$$

Gráficamente, el modelo de regresión lineal con dos regresores supone calcular la ecuación de un plano que describe la relación de y con x_1 y x_2 . En la figura 6, se muestra la relación entre y , x_1 y x_2 .

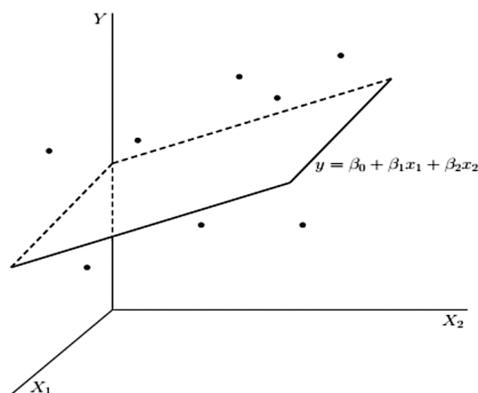


Figura 6. Modelo de regresión lineal con dos regresores.

La estimación por mínimos cuadrados de los parámetros del modelo consiste en calcular la ecuación del plano que haga mínimo el valor de $\sum e_i^2$ con

$$e_i = y_i - \hat{y}_i$$

En la figura 7 se muestra el plano con la estimación por mínimos cuadrados.

Hipótesis del modelo de regresión múltiple

Generalizando, al ajustar un modelo de regresión lineal múltiple, se supondrá que se verifican las siguientes hipótesis:

1. Fijados los valores x_{1i}, \dots, x_{ki} de las variables X_1, \dots, X_k , se tiene que

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \dots + \beta_k x_{ki} + e_i$$

2. Cada error $e_i \approx N(0, \sigma^2)$.
3. Cualquier par de errores e_i y e_j son independientes.
4. Las variables explicativas son, algebraicamente, linealmente independientes.
5. El número de datos es mayor o igual que $k + 2$.

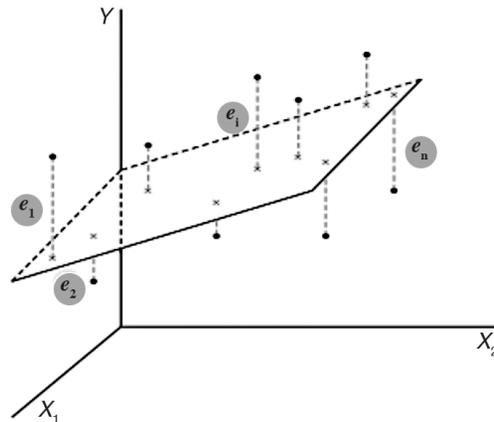


Figura 7. Plano para la estimación por mínimos cuadrados en un modelo con dos regresores (x_1 y x_2).

Se llega a las siguientes observaciones:

1. Las tres primeras hipótesis del modelo se justifican igual que en regresión simple.
2. La condición de independencia lineal algebraica de los regresores tiene por objeto ajustar la dimensión del problema, ya que si no se cumpliera se pueden eliminar regresores del modelo.
3. El número de datos debe ser mayor o igual que $k + 2$ para poder estimar todos los parámetros del modelo.

Parámetros del modelo de regresión múltiple

1. El parámetro β_i , en regresión múltiple, representa el efecto del aumento de una unidad del regresor x_{ki} sobre la respuesta, Y , cuando el resto de los regresores permanecen constantes.
2. Si los regresores no se interrelacionan, $\rho_{ij} = 0$, para todo i, j , los estimadores de los coeficientes de regresión en el modelo múltiple y en los distintos modelos simples coinciden.

Se puede demostrar que

1. $\hat{\beta}_i$ sigue una distribución normal, para todo $i = 0, \dots, k$.
2. Para todo $\hat{\beta}_i$, con $i = 0, 1, \dots, k$, se cumple que $E(\hat{\beta}_i) = \beta_i$. Es decir $\hat{\beta}_i$ es un estimador centrado de β_i , para todo i .
3. La matriz de varianzas y covarianzas de $\hat{\beta}_0, \dots, \hat{\beta}_k$ viene dada por la expresión:

$$\text{COV}(\hat{\beta}) = \sigma^2(X'X)^{-1}$$

Prueba de hipótesis en el modelo de regresión múltiple

En la prueba de hipótesis en el modelo de regresión múltiple, se establecen comparaciones de hipótesis nula y alternativa:

- Hipótesis nula $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$
- Hipótesis alternativa $H_1: \text{Existe algún } \beta_i \text{ con } i = 1, \dots, k \text{ tal que } \beta_i \neq 0$

La aceptación de la hipótesis nula de la Prueba de Hipótesis, representada por la letra F.

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0,$$

Puede ser debida a

- Independencia de la variable explicada (respuesta) frente a todas las variables predictoras /regresoras.
- Dependencia no lineal de la variable respuesta respecto de alguna variable predictora.

El rechazo de la hipótesis nula significa que la variable explicada depende linealmente de alguno de los regresores.

- Para determinar cuál o cuáles de las variables independientes/predictivas explican significativamente a la variable dependiente, es necesario tomar en consideración las comparaciones individuales. En el cuadro 1 se detallan los casos, el resultado de las pruebas de hipótesis y las comparaciones individuales.

Cuadro 1. Prueba de hipótesis y comparaciones individuales en regresión múltiple

Caso	Prueba de hipótesis	Comparaciones individuales	Interpretación
1	Significativo	Todos significativos	Todas las variables predictoras influyen significativamente en la variable respuesta.
2	Significativo	Alguno significativo	Los predictores no significativos deben ser eliminados del modelo o transformados si se intuye relación de dependencia no lineal.
3	Significativo	Ninguno significativo	Problema de multicolinealidad: existe fuerte correlación entre variables explicativas del modelo.
4	No significativo	Todos significativos	Existen casos particulares de multicolinealidad
5	No significativo	Alguno significativo	Existen casos particulares de multicolinealidad
6	No significativo	Ninguno significativo	No se detecta relación de dependencia lineal entre la variable explicada y los regresores.

El tratamiento de la multicolinealidad consiste en eliminar regresores del modelo con alta correlación, y con esto disminuye el número de parámetros que hay que determinar.

Diagnóstico y validación del modelo de regresión múltiple

Al igual que en el modelo de regresión simple, antes de utilizar el modelo de regresión múltiple, es necesario verificar las hipótesis básicas del modelo y esto se realiza por medio del análisis de los residuos.

Se pueden considerar las siguientes particularidades:

1. La normalidad del error.
2. Las hipótesis de linealidad, homocedasticidad (la varianza del error es constante) e independencia.
3. La conveniencia de introducir una nueva variable.

Finalizado el proceso de definición y validación del modelo de regresión múltiple, se puede utilizar para hacer predicciones. Es posible considerar

- $\hat{y}(x_{1i}, \dots, x_{ki})$ para predecir el valor de $E(Y|X_1 = x_{1i}, \dots, X_k = x_{ki})$

- $\hat{y}(x_{1i}, \dots, x_{ki})$ para predecir el valor de un elemento o individuo de la variable $(Y|X_1 = x_{1i}, \dots, x_k = x_{ki})$.

Conclusiones

Los modelos de regresión simple y múltiple presentan las características ideales para el tratamiento de variables cuantitativas que responden según las variables predictoras o regresoras dentro del fenómeno estudiado.

En el proceso de cultivo de microalgas, existen variables que afectan la dinámica del crecimiento, principalmente la temperatura, el pH y la intensidad de luz. Las microalgas se alimentan de CO₂ y lo convierten en biomasa, en ese proceso liberan oxígeno.

Se sugiere el uso de la regresión simple para modelar la relación entre cada variable predictiva, de forma independiente, y la variable respuesta (crecimiento celular de la microalga) y posteriormente plantear un modelado de regresión múltiple.

El Internet de las Cosas puede ser aplicado en el estudio estadístico del crecimiento de la microalga *Chlorella sp.*, en conjunto con algoritmos de predicción de alta complejidad que requieran procesamiento estadístico, como lo es el modelo de regresión múltiple. El hecho de poder acceder a la nube de Internet facilita el manejo de los datos para los investigadores y especialistas que requieran información del estado del cultivo.

Bibliografía

- Borowitzka, M.A. (1999). Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters. *Journal of Biotechnology*, 70, 313– 321.
- Evans, D., (2011). Internet of Things - How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything. White paper Cisco Internet Business Solutions Group (IBSG).
- Fox, R. (1996) Spirulina production and potential, France: Edisud, ISBN 2-84744-883-X.
- Gutiérrez, H., De la Vara, R., (2012) Análisis y diseño de experimentos, 3ra edición, McGraw –Hill, México.
- Henrikson, R. (1994) Microalga Spirulina: Superalimento del futuro, Barcelona: Ediciones S.A. Urano, ISBN: 84-7953-047-2.
- Montgomery, D., (2008) Diseño y análisis de experimentos, 2da edición, Limusa-Wiley, México
- Rosenberg, J., Oyler, G., Wilkinson, J. and Betenbaugh, M. (2008) A green light for engineered algae: Redirecting metabolism to fuel a biotechnology revolution. *Current Opinion in Biotechnology* 19: 430–436.
- Sakai, N., Sakamoto, Y., Kishimoto, N., Chihara, M. and Karube, I. (1995) *Chlorella* strains from hot springs tolerant to high temperature and high CO₂. *Energy Conversion and Management* 16: 693–696.
- Stewart, C. and M.A. Hessami (2005). A study of methods of carbon dioxide capture and sequestration—the sustainability of a photosynthetic bioreactor approach. *Energy Conversion and Management*, 46, 403–420.
- Sung, K., Lee, J., Park, S. and Choi, M. (1999) CO₂ fixation by *Chlorella* sp KR-1 and its cultural characteristics. *Bioresource Technology* 68: 269–73.
- Sydney, E., Sturm, W., de Carvalho, J., Thomaz-Soccol, V., Larroche, C. (2010) Potential carbon dioxide fixation by industrially important microalgae Published by Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.biortech.2010.02.088s.
- Vonshak A. (1997), Spirulina platensis (Arthrospira): Physiology, Cell Biology and Biotechnology. Taylor & Francis, London. ISBN 0-7484-0674-3.
- Wang, B., Li, Y., Wu, N., Lan, C.Q. (2008). CO₂ mitigation using microalgae. *Applications in Microbiology, Biotechnology*. 79, 707–718.
- Yick, J., Mukherjee, B., Ghosal, D., (2008). Wireless sensor network survey. Department of Computer Science, University of California, Davis, USA. Science Direct. Available online 14 April 2008 : doi:10.1016/j.comnet.2008.04.002

Uso de la energía solar en sistemas de producción agropecuaria: producción más limpia y eficiencia energética

Using solar energy in agriculture and livestock: cleaner production and energy efficiency

Tomás de Jesús Guzmán-Hernández^{1*}, Freddy Araya-Rodríguez², Guillermo Castro-Badilla³, Javier M. Obando-Ulloa⁴

Fecha de recepción: 1 de abril de 2016
Fecha de aprobación: 8 de junio de 2016

Guzmán-Hernández, T; Araya-Rodríguez, F; Castro-Badilla, G; Obando-Ulloa, J. Uso de la energía solar en sistemas de producción agropecuaria: producción más limpia y eficiencia energética. *Tecnología en Marcha*. Encuentro de Investigación y Extensión 2016. Pág 46-56.
DOI: 10.18845/tm.v29i8.2984

- 1 Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional San Carlos, Costa Rica. Correo electrónico: tjguzman@itcr.ac.cr
 - 2 Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional San Carlos, Costa Rica. Correo electrónico: faraya@itcr.ac.cr
 - 3 Escuela de Ingeniería en Electrónica. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional San Carlos, Costa Rica. Correo electrónico: gucastro@itcr.ac.cr
 - 4 Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional San Carlos, Costa Rica. Correo electrónico: jaobando@itcr.ac.cr
- * Autor de correspondencia.



Palabras clave

Energía solar; gases de efecto invernadero; huella de carbono; industria láctea; sistema fotovoltaico; sistema térmico.

Resumen

Actualmente se busca nuevas opciones de energías limpias para mitigar el efecto de invernadero y lograr sistemas de producción verdaderamente sostenibles; entre éstas, la energía solar y el uso de biomasa y otras fuentes renovables se han recomendado particularmente para lograr la captura local de carbono y la adaptabilidad al cambio climático. Este artículo presenta el diseño de un sistema térmico y fotovoltaico, y los resultados preliminares obtenidos tras su instalación en lecherías y plantas procesadoras de lácteos ubicadas en la Región Huetar Norte de Costa Rica, con datos que demuestran la potencialidad de la producción energética a partir de la energía solar en actividades agropecuarias. Estos resultados preliminares han permitido comprobar que mediante estos sistemas se logra producir alrededor del 30% de la energía necesaria para estas actividades, contribuyendo de esta forma a disminuir los costos de producción, la emisión de gases de efecto invernadero y por ende, la huella de carbono.

Keywords

Solar energy; greenhouse gases; carbon footprint; dairy industry; photovoltaic system; thermal system.

Abstract

New clean energy alternatives to mitigate the greenhouse effect and achieve real clean production are currently being sought. Among these alternatives, solar energy and use of biomass and other renewable sources have been recommended for their effectiveness in adaptability to climate change and local carbon sequestration.

This paper presents the design and preliminary results of a thermal system installed in a milk factory and dairy processing plants located in the North Huetar Region of Costa Rica. The generated data show the potentiality of energy production by solar energy systems in agricultural activities. These preliminary results have shown that these systems make it possible to produce about 30% of the energy needed for these activities, thereby allowing reduce production costs, emission of greenhouse gases and, consequently, carbon footprint.

Introducción

Del 100% de la radiación solar, sólo un 51% llega a la Tierra. Sin embargo, un 26% es dispersado por la atmósfera como radiación difusa, y sólo un 25% penetra directamente hasta la superficie del planeta. (Taiz & Zeiger, 2002; Camejo, 2012).

El porcentaje de la energía del sol que llega directamente a la Tierra se aprovecha en alguna medida para el calentamiento de agua, a través de colectores solares, o para producir corriente eléctrica mediante celdas fotovoltaicas. Estas formas de producción de energía son las más respetuosas con el medio ambiente, por lo que reducen la dependencia energética de energías fósiles y contaminantes como el petróleo (Landa, 2005; Roman, 2007; Rizk & Nagrial, 2008; Torpey, 2009; Tinajeros, 2011, y Swift, 2011). Berriz (2012) afirma la necesidad de que los países que disponen de radiación solar suficiente utilicen estos sistemas, para beneficiarse del

avance a pasos agigantados de las aplicaciones de la energía solar, las cuales se evidencian en el aumento de la eficiencia de las celdas fotovoltaicas y su producción en masa, en los calentadores de agua comerciales y las tecnologías de concentración solar, entre muchas otras (ACESOLAR 2014).

A pesar de que los recursos energéticos del planeta son limitados, la demanda de energía solar se incrementa cada año, de ahí la importancia de fomentar el uso de energías renovables como la solar, especialmente bajo las formas de energía solar fotovoltaica y energía solar térmica, ambas por medio de paneles solares (Landa, 2005).

Los paneles solares son dispositivos que aprovechan la energía que llega a la Tierra en forma de radiación solar, los cuales están compuestos principalmente por células de silicio policristalino, cobre, aluminio, PVC y otros materiales. Estos paneles se clasifican de acuerdo con su utilización. Existe el panel solar para el calentamiento doméstico e industrial de agua y líquidos (colectores solares) que puede ser de circuito abierto o de circuito cerrado y que es visible en techos y azoteas de casas, edificios e industrias. En este sistema, el agua pasa directamente por los colectores solares y se almacena en un depósito para su uso. El sistema cerrado reduce costos y es más eficiente, pero sus ventajas se reducen en zonas con temperaturas bajas, así como con alta concentración de sales, que acaban obstruyendo los paneles. En las instalaciones de circuito cerrado, se distinguen dos modalidades: flujo por termosifón y flujo forzado. Los paneles solares térmicos en general tienen un muy bajo impacto ambiental (RES & RUE DISEMINATION, 2005; Khan, Abdul Malek, Mithu & Das, 2010, y Quirós, 2011). Los otros paneles solares son para la producción o generación de electricidad, y se conocen como paneles fotovoltaicos.

Los paneles solares de uso doméstico e industrial (circulación natural o termosifón) pueden ser diseñados y construidos dependiendo de la disponibilidad de los materiales; pero el principio básico es el mismo para todos los diseños. El agua calentada por este procedimiento se utiliza también en hospitales, centros de recreo, hoteles y sistemas agropecuarios (Guzmán & Iglesias, 1986; Guzmán & Iglesias, 1987^a; y Guzmán & Iglesias, 1987^b).

En los paneles solares térmicos, los tubos del colector solar, por los que circula el agua, se colocan longitudinalmente, de manera tal que el agua fría, la cual proviene de un tanque de almacenamiento, entra por la parte baja y una vez que se calienta por la radiación solar, sale por la parte superior del colector debido a su menor densidad. Los procesos de entrada y salida de agua continúan hasta que la radiación solar haya disminuido al mínimo. De esta manera, el agua caliente se acumula en el tanque. Con 1 m² de un colector plano, con el clima de Costa Rica, se puede calentar un promedio de 75 L de agua diariamente, a una temperatura de 20 °C hasta 55 o 60 °C (IMN, 2013). Sin embargo, debido a que la radiación solar no es siempre suficiente para calentar agua todos los días durante el año, es recomendable conectar el sistema solar con un sistema convencional de calentamiento de agua (Shyam, 1996).

En la modalidad de flujo termosifónico para calentamiento de agua, el movimiento que se genera a partir del mismo calentamiento a través de la captación de la radiación solar, en un sistema cerrado, mantiene el sistema en funcionamiento. En esta modalidad, no se utiliza ningún tipo de energía, sino solamente la gravedad. No obstante, en función de los niveles en los tanques de agua, en la modalidad de flujo forzado se usa una bomba para el movimiento del agua dentro del sistema (Despaigne, Torres, Maceo & Cobián, 2003; Andersen, Furbo, Hampel, Heidemann & Müller-Steinhagen, 2007; Khan *et al.*, 2010; Anderson *et al.*, 2008; Alvarado, 1998; Wongsuwan, 2005, y RES & RUE DISEMINATION, 2005).

Desde 1993, CENSOLAR planteó la necesidad de utilizar los sistemas solares de captación de energía para diferentes usos en la industria, los sectores productivos y las zonas residenciales. Portilla (2014) indicó que el potencial previsto anual de energía fotovoltaica en Costa Rica es

de 576 747 MW, el cual se traduce en 656 195 GWh/año, suficiente para justificar el uso de paneles solares fotovoltaicos en todo el país, por lo que el Instituto Nacional de Transferencia de Tecnologías Agropecuarias (INTA) en su informe de 2011 expuso a la industria cárnica y lechera costarricense esta opción para mejorar su eficiencia energética, con el fin de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por unidad de producto, puesto que la ganadería es responsable del 18% de las emisiones mundiales de GEI, porcentaje mayor que aquel generado por la industria de los transportes (Matthews, 2006).

Por su parte, Guzmán (2014) indicó que los sistemas solares térmicos y fotovoltaicos pueden ser usados en actividades agropecuarias y en unidades de producción del sector, entre ellas, las lecherías, las plantas de matanza, las empacadoras y las plantas procesadoras, en forma de autoconsumo, para bajar los costos por facturas eléctricas y disminuir la huella de carbono del sector ganadero. Anteriormente, Guzmán e Iglesias (1986, 1987, 1989, 1991 y 1999) habían planteado también la necesidad de aplicar estos sistemas solares térmicos en unidades de producción agropecuaria con el fin de controlar enfermedades y plagas.

Las fuentes citadas coinciden en la urgencia de aplicar tecnologías que minimicen el impacto generado en los procesos productivos del sector ganadero, ya que en la zona norte de Costa Rica existe una gran cantidad de lecherías, invernaderos de producción de hortalizas y de plantas ornamentales, fincas destinadas a producción de semillas y de otros tipos que usan de manera sistemática agua o aire en sus unidades, calentados por medio de resistencias eléctricas, intercambiadores térmicos y gas.

En el cantón de San Carlos se encuentra el 55% de los asociados de la Cooperativa de Productores Dos Pinos, es decir, un total de 850 productores de leche, cuya producción es más del 50% de la producción nacional (0,6 millones de kilos de leche).

En esta situación, se ha estudiado estrategias de eficiencia energética, oportunidades y potencial en la zona, y se ha determinado que se puede optar por la tecnología solar como alternativa viable y efectiva, debido a que en el último estudio del ICE, las dos regiones de mayor radiación solar en el país son la Huetar Norte y la Chorotega (Portilla 2014).

En las lecherías de la zona Norte, con una media de producción diaria de 500 a 1000 kg de leche, la reducción de emisiones de carbono a la atmósfera con la opción presentada sería de 5 a 10 t CO₂ por año. Extrapolando a la producción diaria de leche, tan sólo en San Carlos, se obtendría un potencial de reducción de emisiones de carbono de hasta 4,38 t CO₂ anuales, estimando una emisión media de 0,94 kg de CO₂ por kW de electricidad generado con combustibles fósiles.

Estas consideraciones condujeron a proponer como objetivo de este trabajo evaluar la eficiencia de sistemas solares de captación térmica para el calentamiento de agua y la producción de energía en unidades de producción agropecuarias.

Materiales y métodos

El trabajo de ubicación de los sistemas solares ha respondido a la necesidad de uso de éstos en la Región Huetar Norte de Costa Rica, vinculada directamente con la Sede Regional del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) en San Carlos, por su vocación agropecuaria, especialmente lechera y ganadera.

Para tal efecto, se diseñó y construyó tres instalaciones con sistemas solares termosifónico y/o forzados, según el caso, en las unidades seleccionadas (cuadro 1). El trabajo se inició en julio del 2014, y se continúa trabajando. Sin embargo, para efectos de este artículo, sólo se presenta los datos procedentes de la lechería de la Sede Regional del ITCR durante los meses de mayo

a diciembre de 2015, ya que los otros sistemas se encuentran en etapa de acondicionamiento para la recolección de la información por medio de un sistema computarizado.

Cuadro 1. Unidades de producción lecheras y de procesamiento de lácteos seleccionadas en la región Huetar Norte

Lechería / productores de lácteos	Equipo instalado	Estado de la instalación
Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional de San Carlos (ITCR-SSC)	Solar térmico termosifónico, con sistema auxiliar eléctrico Sistema fotovoltaico	En operación desde el mes de mayo de 2015
Escuela Técnica Agrícola e Industrial (ETAI)	Solar térmico termosifónico, con sistema auxiliar eléctrico	En operación, desde el mes de octubre de 2015
Productores de lácteos LLAFRAK, de Juanilama de San Rosa de Pocosol	Solar térmico forzado, híbrido con sistema auxiliar de gas	En operación desde el mes de diciembre de 2015

Los equipos instalados están compuestos por un sistema de paneles solares térmicos para el calentamiento de agua, conectados a un tanque acumulador con capacidad para 302,40 L de agua y acoplados a un sistema eléctrico auxiliar. El tanque acumulador tiene tres previsiones interiores para la conexión de termopares, los que a su vez, están conectados a una computadora para registrar los datos de captación de energía y el uso del agua por medio de un medidor. Además, este tanque tiene una válvula de escape, una de expansión y otra válvula de conexión del sistema solar con el sistema auxiliar eléctrico o de gas. El sistema también presenta un conjunto de tuberías de conexión a los equipos para esterilización, los termómetros, los equipos de medición inalámbricos y los sistemas auxiliares eléctricos y de gas.

Una vez instalados todos los sistemas se procedió a la toma de datos de la siguiente manera: registro de la masa de agua fría / agua caliente captada por el sol; cálculo del diferencial (ahorro) en electricidad con el sistema original, 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; captación de la huella de carbono:

Captación de la huella de carbono= $\text{KWh ahorrados} \times \text{kg CO}_2 \text{ emitidos en la generación eléctrica}$

Los datos del valor medio de los kilogramos de CO_2 emitidos en la generación eléctrica son proporcionados anualmente en Costa Rica por la Internacional Energy Agency (IEA).

Resultados y discusión

Esquemas básicos solares instalados: Sistemas híbridos termosifónico y térmico forzado.

El sistema de captación de energía solar de tipo termosifónico híbrido se instaló tanto en la lechería de la Sede Regional del ITCR como en la lechería de la Escuela Técnica Agrícola e Industrial (ETAI). Este sistema se define como el movimiento de un fluido (agua) por medio de dos factores: la gravedad y el calentamiento de este fluido por la radiación solar. Cuando el agua se calienta, ésta se dilata y entonces disminuye su densidad, por lo que al entrar al sistema es más densa. La fuerza de la gravedad y la disminución de la densidad hacen subir

el agua caliente y almacenarse en un depósito. Esto se produce en el interior del colector solar como parte de un intercambio de calor por convección. El sistema solar forzado y el sistema termosifónico disponen de los mismos elementos, ubicados de manera diferente y con equipos adicionales. El primero está compuesto por un sistema primario de captadores, un acumulador solar, un grupo hidráulico con bombas de movimiento, un sistema de regulación y un vaso de expansión (figura 1).

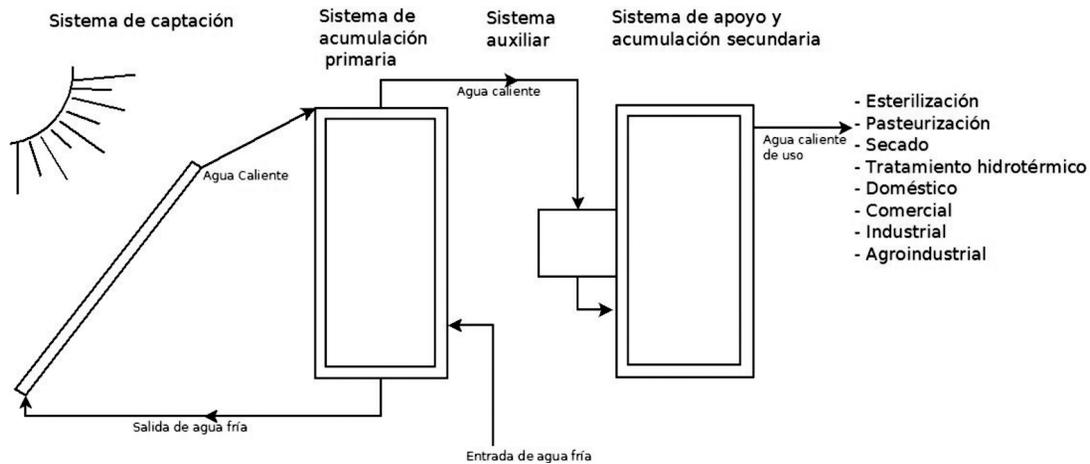


Figura 1. Sistema básico termosifónico de captación térmica instalado en la lechería de la Escuela de Agronomía de la Sede Regional San Carlos del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR-SSC), y en la Escuela Técnica Agrícola e Industrial de Santa Clara (ETAI).

En la planta de procesamiento de lácteos de la Asociación de Productores de Lácteos LLAFRAK, ubicada en Juanilama, de Santa Rosa de Pocosal, se instaló un sistema de tipo forzado (figuras 2 y 3).

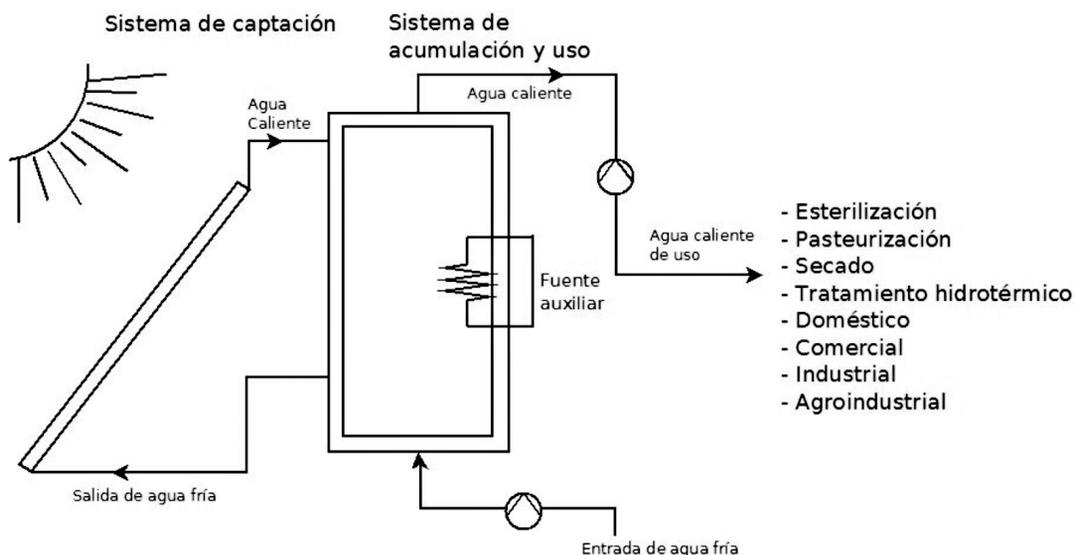


Figura 2. Esquema forzado básico

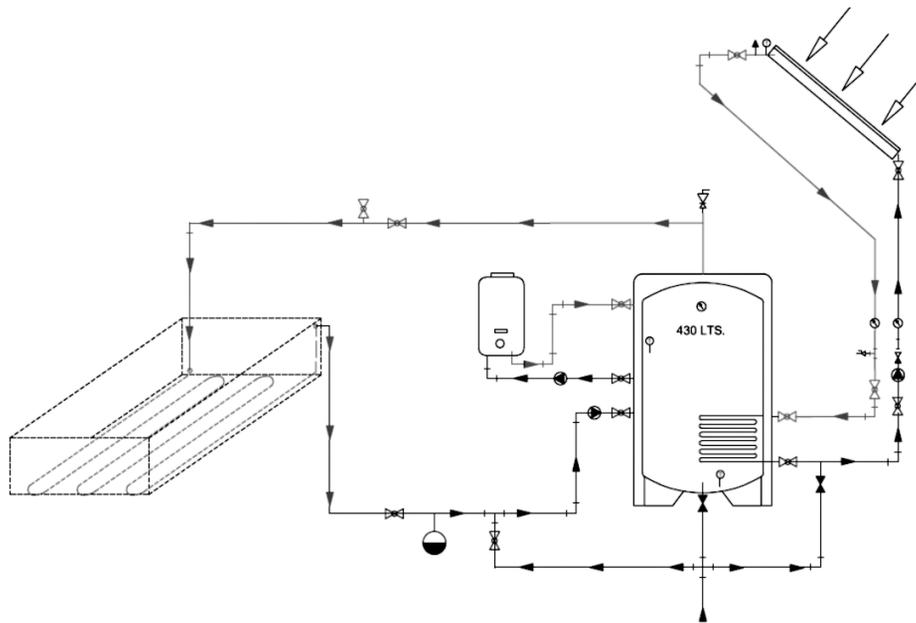


Figura 3. Esquema del sistema de captación de energía solar de tipo forzado híbrido, instalado en la planta de procesamiento de la Asociación de Productores de Lácteos LLAFRAK, en Juanilama, Santa Rosa de Pocosol

Datos solares captados y registrados en los sistemas

Como se indicó anteriormente, en este trabajo sólo se presenta los datos recolectados en la lechería de la Sede Regional del ITCR, durante los meses de mayo a diciembre de 2015, ya que los otros sistemas se encuentran en la etapa de acondicionamiento del sistema de registro de datos.

En la zona donde se ubica la lechería, perteneciente al Programa de Producción Agropecuaria (PPA), se registró temperaturas sobre los 25 °C desde mayo hasta noviembre de 2015. En el sistema térmico instalado en esta lechería las temperaturas sobrepasaron los 50 °C, a excepción del mes de julio, en que fueron aproximadamente de 42 °C (cuadro 2).

Cuadro 2. Temperatura ambiente y temperatura alcanzada por el sistema térmico híbrido instalado en la lechería de la Sede Regional del ITCR, en el período de mayo a noviembre de 2015.

Mes	Temperatura ambiente (°C)	Temperatura alcanzada por el sistema (°C)	Temperatura demandada (°C)
Mayo	27,54	52,49	70,00
Junio	27,34	50,81	70,00
Julio	25,97	41,86	70,00
Agosto	26,09	71,71	70,00
Septiembre	27,39	71,08	70,00
Octubre	26,27	68,70	70,00
Noviembre	25,99	69,65	70,00
Diciembre	26,65	56,34	70,00

En este sistema térmico termosifónico e híbrido, se obtuvo una producción de energía solar de aproximadamente 542,3 kWh, cuyo máximo rendimiento (74 kWh/día) se registró durante el mes de agosto de 2015, mientras que en el mes de diciembre la producción de energía solar fue de tan sólo 42,3 kWh/día (cuadro 3). Debido a esto, el sistema logró satisfacer por sí mismo la demanda de energía necesaria para las diferentes operaciones de la lechería en los meses de agosto, septiembre y noviembre, mientras que en el mes de julio sólo fue capaz de suplir el 39% de la energía requerida (figura 4). En general, esta producción energética logró economizar entre el 40 y el 50 % de la energía consumida en esta unidad, considerando un requerimiento medio de 128,17 kWh, lo cual se traduce en un total de 1007,9 kg CO₂ capturado, lo que a su vez equivale a un total de 26 árboles y a un ahorro total de ¢232 322,43 en la factura eléctrica de esta lechería (cuadro 4).

Es importante destacar que este sistema suministra agua caliente, a una temperatura de 70 °C, para los procesos de lavado y esterilización de equipos de la lechería y los laboratorios de Biocontroladores y de Calidad de Carnes.

Cuadro 3. Energía solar promedio producida mensualmente y energía suplida por el sistema térmico para la operación de la lechería de la Sede Regional San Carlos del ITCR

Mes	Energía promedio producida por el sistema (kWh)	Temperatura necesaria para el proceso (°C)	Energía suplida por el sistema (%)
Mayo	69,2	70	59
Junio	68,9	70	49
Julio	67,4	70	39
Agosto	74,0	70	104
Septiembre	73,6	70	102
Octubre	73,3	70	97
Noviembre	73,6	70	99
Diciembre	42,3	70	68

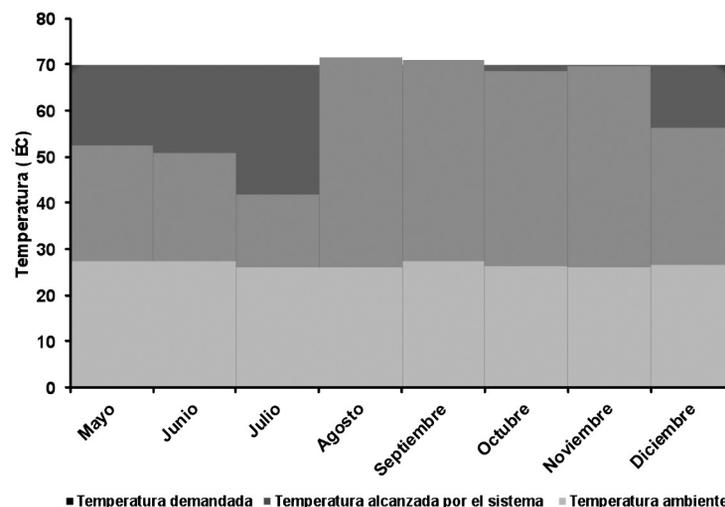


Figura 4. Promedio mensual de la temperatura ambiente, la temperatura alcanzada por el sistema y la temperatura demandada para la operación de la lechería de la Sede Regional San Carlos del ITCR

Cuadro 4. Balance energético de los sistemas térmico y fotovoltaico instalados en la lechería de la Sede Regional del ITCR

Mes	Energía media producida (kWh/día)		Energía total media producida por ambos sistemas (kWh)	Valor económico de la energía producida (¢)*	Carbono capturado (kg CO ₂)	Árboles equivalentes (u)
	Sistema termosifónico	Sistema fotovoltaico				
Mayo	54	179	233	¢ 26 661,00	123,60	3
Junio	54	161	215	¢ 25 311,00	111,80	3
Julio	57	184	241	¢ 28 588,94	127,20	4
Agosto	72	201	273	¢ 31 108,62	139,00	3
Septiembre	62	201	263	¢ 30 321,22	120,00	3
Octubre	72	173	245	¢ 28 988,57	120,00	3
Noviembre	78	196	274	¢ 30 827,50	120,00	3
Diciembre	58	212	270	¢ 30 515,58	146,3	4
Total	507,00	1507,00	2014,00	¢ 232 322,43	1007,90	26

* Datos obtenidos de acuerdo con la tarifa actualizada de la Cooperativa de Electrificación Rural de San Carlos, R.L. (COOPELESCA R.L.)

Conclusión

De acuerdo con los resultados obtenidos en la lechería de la Sede Regional del ITCR, se pudo comprobar que los sistemas de captación de energía solar son una fuente eficiente para la disminución de los costos operacionales por concepto de energía eléctrica en una explotación pecuaria, así como también de la huella de carbono que genera. Además, por medio de esta tecnología se contribuye a la disminución de los gases de efecto invernadero. Sin embargo, es necesario confirmar estos resultados con aquellos que se obtengan en otras explotaciones agropecuarias.

Reconocimiento

Los autores agradecen los aportes y ayuda recibidos de parte del Programa de Regionalización Universitaria (PUR), por intermedio de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica; igualmente, de parte del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) de la Región Huetar Norte. También agradecen el apoyo financiero por parte del M.Sc. Luis Paulino Méndez Badilla, Vicerrector de Docencia y del M.B.A. William Vives Brenes, Vicerrector de Administración, ambos del ITCR, para la puesta en marcha de la propuesta de trabajo. Los autores agradecen toda la cooperación y ayuda recibida de la Dirección Administrativa de la Sede Regional de San Carlos, del M.Sc. Edgardo Vargas Jarquín, de la MBA. Mildred Zúñiga Carvajal y del Bach. Dennis Mendez Palma. A la Ing. Marcela María Chavez Alvarez, le agradecen por su colaboración con el programa DIA.

Bibliografía

- ACESOSOLAR (2014). Investigación en Energía Solar en Costa Rica. Asociación Costarricense de Energía Solar.
- Andersen, E.; Furbo, S.; Hampel, M.; Heidemann, W., & Müller-Steinhagen, H. (2007). Investigations on stratification devices for hot water heat stores. *International Journal of Sustainable Energy*, 32: 255-263. En línea, recuperado el 29 de junio, de Wiley Interscience.
- Andersen, E. (2008). Hot water heat stores by termosiphonics system. *International Journal of Sustainable Energy*. En línea, recuperado el 29 de junio, de Wiley Interscience.
- Alvarado, R. (1998). *Boletín Meteorológico* (núms. 1, 2 y 3). San Carlos, Costa Rica:
- Publicaciones ITCR. Berriz, P. L. (2012). La energía solar: base para el desarrollo sostenible. *Energía y Tú*, 58, abril-junio. Cuba.
- Boletines informativos del IMN. Consultados en el 2013 en <http://www.imn.ac.cr>.
- Camejo, J. E. (2012). Conectar el sol con la red. *Energía y Tú*. 57, enero-marzo. Cuba.
- CENSOLAR. (1993). *Valores medios de irradiación solar sobre suelo horizontal*. España.
- Despaigne, H.; Torres, A.; Maceo, F., & Cobián, S. (2003). Sistema solar termosifónico de calentamiento de agua sanitaria en cayo Las Brujas. *Memorias de la Primera Convención Internacional de Energía y Medio Ambiente*, Santiago de Cuba, 13-17 de noviembre.
- Guzmán, T. & Iglesias, J. (1986). Estudio preliminar del diseño, montaje y prueba de planta de tratamiento hidrotérmico a la semilla agámica de la caña de azúcar. *Proyección*, IPROYAZ, pp. 15 - 20, Cuba.
- Guzmán, T. & Iglesias, J. (1987a). *Energía solar para la agroindustria azucarera* [Informe técnico]. Edición ISP JAE.
- Guzmán, T. & Iglesias, J. (1987b). *Evaluación técnico-económica de una planta solar de tratamiento hidrotérmico a la semilla de caña de azúcar*. I Conferencia Científica de la ATAC en la AC de Cuba.
- Guzmán, T. & Iglesias, J. (1989). Planta solar para la termoterapia de la semilla agámica de la caña de azúcar. *Energía*, pp. 3-7, Cuba.
- Guzmán, T. & Iglesias, J. (1991). *Instalación solar para termoterapia de la semilla de caña de azúcar*. Conferencia Internacional de Arquitectura e Ingeniería, Nueva York.
- Guzmán, T. & Iglesias, J. (1999). Planta solar de hidrotratamiento para el control de enfermedades en cultivos económicos. *Memorias del Congreso Costarricense de la Caña de Azúcar* (p. 250). Condovac, Guanacaste, Costa Rica ..
- Guzmán, T. (2014). Uso de tecnologías para el aprovechamiento de la energía solar en actividades económicas agropecuarias en Costa Rica. *Memorias Congreso Internacional Clima, Agua y Energía, Pilares para el Desarrollo Sostenible* (pp. 67-84), Universidad Nacional Campus Nicoya, Guanacaste, Costa Rica. ISBN: 978-9968-638-12-8.
- Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica (2013). Consultado el 9 de febrero del 2013 en www.imn.ac.cr.
- Insunza, J. (2013). *Meteorología descriptiva: Radiación solar y terrestre*. Recuperado el 9 de febrero del 2013 de http://www.met.igp.gob.pe/users/yamina/meteorologia/radiacion_doc_Univ_CHile.pdf,
- Instituto nacional de Tecnologías Agropecuarias (2011). Ganadería y efecto invernadero: mejor producción, menos contaminación. *INTA Informa*. Consultado el 11 marzo del 2013 en <http://intainforma.inta.gov.ar/?p=6579>
- Agencia Internacional de energía renovable (2013). http://www.irena.org/News/Description.aspx?NType=NW&PriMenuID=16&catid=84&mnu=cat&News_ID=312. Consultado en abril del 2013.
- Khan, M.; Abdul Malek, A.; Mithu, M., & Das, D. (2010). Design, fabrication and performance evaluation of natural circulation rectangular box-type solar domestic water system. *International Journal of Sustainable Energy*, 2(3), September, 164-177.
- Landa, M. (2005). *Energía solar en España: El potencial solar de España es el más alto de Europa debido a su privilegiada situación y climatología*. Consultado el día 10 de febrero del 2013 en http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2005/01/11/114942.php.
- Matthews, C. (2006). La ganadería amenaza el medio ambiente. FAO Sala de Prensa. Consultado 12 marzo del 2013 en <http://www.fao.org/newsroom/es/news/2006/1000448/index.html>.

- Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones (2011). *VI Plan Nacional de energía 2012-2013*. Consultado 12 de marzo del 201 en. http://www.dse.go.cr/es/03publicaciones/01PoliticaEnerg/VI_Plan_Nacional_de_Energia_2012-2030.pdf.
- Portilla Pastor, R.; Álvarez Morales, C.; Segura López, W. 2014. 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.
- Quirós, L. (2011). Calentando el agua y cuidando el ambiente. *Construir*. Consultado en <http://www.revistaconstruir.com/construccion-sostenible/836>
- RES & RUE DISEMINATION (2005). *Energía solar térmica: Proyecto de circulación natural y forzada*. Consultado el 10 de febrero del 2013 en <http://www.cesu.es/temas>
- Rizk, J. & Nagrial, M. H. (2008). Impact of reflectors on solar energy. *Proceedings of the World Academy of Science. Engineering and Technology*, 31, July.
- Roman, H. (2007). Here comes the sun: Residential solar systems. *Power energy*. Consultado el 10 de febrero del 2013 en www.techdirections.com.
- Shyam S. N. (2005). *Energía solar: Conceptos básicos y su utilización*. Departamento de Física de la Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.
- Shyam, S N. (1996). *La energía solar y su utilización*. Proyecto de investigación desarrollado en el Departamento de Física de la Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.
- Sistema por termosifón. Consultado el día 9 de febrero del 2013 en http://www.mimacsolar.es/equipos_forzados.html.
- Swift K.D. (2011). Is a solar energy system right for your organization? *Management Accounting Quarterly*, 12(4).
- Sopian, K.; Syarhri, M.; Abdullah, S.; Othman, M., & Yatim, B. (2007). Unglazed fiber glass reinforced polyester solar water heater whit integrated storage system. *Journal of Energy Engineering* 133(1): 26.
- Taiz, L. & Zeiger, E. (2002). Photosynthesis: The light reaction. *Plant physiology* (Chapter 7). USA, pp. 112-115.
- Tinajeros, S. M. (2011). Sistema de calentamiento de agua con energía solar en la ciudad de Arequipa. *XVIII Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente*, Universidad Nacional de San Agustín, Escuela de Física, Perú.
- Torpey, E. (2009). You are a What? Solar Photovoltaic installer. *Occupational Outlook Quarterly*, Bureau of Labor.
- Uribe, M. (2007). Cambio del sistema de calentamiento de agua empleando calderas por paneles y otros procesos. *Producción más limpia*, julio-diciembre, 2(2).
- UPC (1999). Sistema de calentamiento con energía solar. Recuperado el 9 de febrero del 2013 de <http://melca.com.ar/archivos/apuntes/Sistemas%20solares%20termicos%20de%20baja%20temperatura/FI00701C.pdf>.
- Wongsuwam, W. (2005). Forced circulation solar water heater performance prediction by TRNSYS ANN. *International Journal of Sustainable Energy*, 24(2), 69-86.

Uso de la espectroscopia Raman en el análisis de fragmentos de pintura automotriz como evidencia forense

Analysis of automotive paint fragments used as forensic evidence by Raman spectroscopy

Dionisio Gutiérrez-Fallas¹, Ernesto Montero-Zeledón²,
Natalia Murillo-Quirós³, Laura Rojas-Rojas⁴

Fecha de recepción: 15 de abril de 2016
Fecha de aprobación: 23 de junio de 2016

Gutiérrez-Fallas, D; Montero-Zeledón, E; Murillo-Quirós, N; Rojas-Rojas, L. Uso de la espectroscopia Raman en el análisis de fragmentos de pintura automotriz como evidencia forense. *Tecnología en Marcha*. Encuentro de Investigación y Extensión 2016. Pág 57-66.
DOI: 10.18845/tm.v29i8.2985



1. Escuela de Física, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: dgutierrez@itcr.ac.cr
2. Escuela de Física, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: emontero@itcr.ac.cr
3. Escuela de Física, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: nmurillo@itcr.ac.cr
4. Escuela de Física, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: laurarojas@itcr.ac.cr

Palabras clave

Pintura automotriz; evidencia forense; espectroscopia Raman.

Resumen

En muchos accidentes de tránsito es difícil establecer la responsabilidad por los daños materiales, las lesiones a las personas o las muertes, debido a que los conductores de los vehículos responsables abandonan el lugar de los hechos. Por eso, es fundamental, como parte de la recolección de la evidencia, intentar recuperar fragmentos de pintura automotriz. El estudio de las características físicas de estos fragmentos puede permitir la identificación del vehículo del que provienen. Sin embargo, con frecuencia, esta evidencia presenta un tamaño reducido, del orden de milímetros cuadrados o menor, lo cual requiere que el análisis de las diferentes propiedades físicas no ofrezca riesgo de alteración de la muestra. Para ello, resulta conveniente utilizar métodos como los que ofrecen las técnicas microscópicas y espectroscópicas. En el presente trabajo se muestran los resultados de los análisis de varios fragmentos de pintura automotriz, realizados con microscopio óptico y microscopía Raman, que podrían ser utilizados como evidencia forense.

Keywords

Automotive paint; forensic evidence; Raman spectroscopy.

Abstract

Frequently, in many traffic accidents it is difficult to establish responsibilities for material damages, people injuries or death, because people that have been involved in the accident leave the crime scene. Because of that, it is very important to find automotive evidence, like paint fragments, as forensic proof that could help authorities reconstruct the incident. The study of physical characteristics of the fragments could help simplify the identification of the vehicle they come from. Commonly, the fragments are very small, in millimeter order size; therefore, it is essential to examine the samples without risk of destruction, usually by microscopic and spectroscopic techniques.

In this work, optical microscopic and Raman spectroscopy analysis of some automotive paint fragments are shown, especially to introduce the Raman spectroscopy as a complementary analytical technique to obtain forensic evidence.

Introducción

En Costa Rica, los accidentes de tránsito son una de las principales causas de pérdidas materiales y de vidas humanas (Programa Estado de la Nación, 2015). Sin embargo, no siempre se llega a la elucidación de los hechos ni a la identificación de los responsables, debido a que frecuentemente uno de los vehículos involucrados huye del lugar del accidente. Para resolver esta situación, se realizan estudios periciales que establecen, mediante el uso de otras evidencias, la identidad de los responsables. El análisis de fragmentos de pintura, que se obtienen en la escena del accidente, es uno de los estudios complementarios frecuentemente utilizados en Ciencias Forenses, pues normalmente se encuentran estos fragmentos en accidentes donde intervienen vehículos automotores (McIntee, 2008).

Para utilizar los fragmentos como evidencia forense en un juicio, existen distintos tipos de técnicas analíticas como la microscopía óptica, la espectroscopía óptica, la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier y la microscopía electrónica de barrido (McIntee, 2008; Tracton, 2005; Hobbs & Almirall, 2003). Con algunas de estas técnicas se han elaborado, validado y estandarizado protocolos de análisis que permiten el uso judicial de los resultados. En el Laboratorio de Pericias Físicas del OIJ y en la Escuela de Física del ITCR existe un microscopio confocal acoplado a un espectroscopio Raman, que permite el análisis cualitativo, no destructivo, de los constituyentes de muchos tipos de materiales. Esta técnica analítica se utiliza también en un número creciente de aplicaciones forenses: estudio de alteración de documentos (Tague, Wang & Leona, 2010), identificación de tintas (Geiman, Leona & Lombaradi, 2009), análisis de fibras (Miller & Bartick, 2002), identificación de trazas de explosivos (López López & García Ruiz, 2014) y análisis de drogas y compuestos químicos (Vankeirsbilck *et ál.*, 2002), entre otras. Con este instrumento se puede realizar el análisis de los pequeños fragmentos de pintura que se obtienen como evidencia en los accidentes de tránsito. La versatilidad, la especificidad y la sensibilidad, la convierten en una técnica analítica idónea en los laboratorios de Ciencias Forenses. Esta es la técnica que se utilizó en el presente trabajo, con la finalidad de evaluar su eficacia en la identificación de los vehículos involucrados, mediante la caracterización de los fragmentos de pintura.

La pintura de los automóviles está formada fundamentalmente por tres capas, aunque el número puede variar según el modelo y la marca. Estas son la capa base o *primer*, que se coloca inmediatamente sobre el metal de la carrocería; la capa de color, que se coloca sobre la capa base, y la capa de barniz o laca, que es la capa exterior, la cual protege la pintura de las inclemencias del tiempo y de leves rasguños. Además, esta capa externa otorga gran brillo, lo que resalta el color y mejora el acabado de la carrocería. De la misma manera, estas capas están formadas por cuatro componentes principales: un polímero que actúa como aglutinante, el pigmento que da el color, el disolvente para facilitar la aplicación y contribuir al secado, y otros aditivos que se usan para lograr ciertos efectos visuales o proporcionan ciertas propiedades reológicas a la pintura líquida (McIntee, 2008; Van Alphen, 1998).

Cuando se analizan muestras de vehículos sospechosos de distinta marca, las diferencias entre sus capas de pintura suelen ser evidentes. No es así en vehículos de la misma marca y modelo, en donde solo se producen variaciones importantes si la pintura original del vehículo ha sido alterada como resultado de un cambio de color total o parcial. Habitualmente, estas alteraciones de la pintura original crean una combinación de capas que resulta única por la combinación de los colores, la secuencia, los grosores y la composición de ellas. Cuando esta situación se presenta, suele ser más simple establecer la relación entre un fragmento y un vehículo sospechoso, pues resulta muy improbable encontrar la misma combinación de capas en otro vehículo.

En otros países, la técnica de espectroscopía Raman se ha venido utilizado en los últimos años como una técnica complementaria, en el análisis de la pintura de los vehículos automotores (Skenderovska, 2008; De Gelder, Vandenabeele, Govaert & Moens, 2005). En Costa Rica, el uso de esta técnica como una herramienta adicional en el análisis de las evidencias en el área de las Ciencias Forenses es todavía incipiente. Para admitir la posibilidad de aplicación de esta técnica en la identificación de fragmentos de pintura, es necesaria la caracterización de estos mediante varias técnicas convencionales, para luego establecer la correspondencia entre los análisis y los resultados obtenidos con otras técnicas aceptadas, como la espectroscopía infrarroja. Posteriormente, se debe realizar la validación del método para incorporar la espectroscopía Raman dentro de las técnicas de análisis. En el presente trabajo los fragmentos de pintura se caracterizaron mediante las técnicas microscópicas tradicionales y mediante la espectroscopía Raman.

Materiales y métodos

Muestras de pintura

Las muestras de pintura automotriz fueron extraídas de vehículos que se encontraban decomisados en el Laboratorio de Ciencias Forenses del Organismo de Investigación Judicial. Estas muestras se obtuvieron mediante raspado directo, utilizando una hoja metálica afilada con el propósito de desprender la muestra desde la capa base adherida al metal. Este procedimiento asegura la integridad de las capas, pues mediante otros, se pueden causar deformaciones en su espesor o, inclusive, el desprendimiento de alguna de ellas.

Caracterización por el método visual

El número de capas que conforman la pintura automotriz afecta directamente sus características visuales, como la opacidad, el color y el brillo. El número de capas presentes también se relaciona con otras propiedades como la textura, la adhesión al sustrato y la durabilidad mecánica y física de la pintura. Mediante el estudio del grosor, el color y la secuencia de las capas, es posible obtener, en una primera aproximación, la correspondencia entre dos fragmentos de pintura automotriz. En muestras de un mismo vehículo pueden producirse pequeñas variaciones del grosor de las capas, aún de una misma zona, pero en general, el color y la distribución serán los mismos. Cuando el grosor, la distribución y el color de las capas son iguales, es la composición de las capas la característica que permite diferenciar las pinturas o establecer una mejor correspondencia entre ellas.

Distinguir el número de capas de una muestra es un proceso que requiere de varias mediciones y de experiencia por parte del observador, pues en ocasiones no es fácil identificar el límite entre estas. Para determinar las características de las capas es necesario que la posición del corte de la viruta sea paralela al plano focal; además, las medidas se deben repetir con otros cortes de la muestra en distintas secciones, ya que en el proceso es posible que la muestra se astille y sean eliminadas involuntariamente algunas capas. Es importante procurar que esta tarea se lleve a cabo bajo las mismas condiciones de iluminación y humedad. En algunos casos, la muestra presenta diferente número de capas, dependiendo de la sección fotografiada; además, se aprecian diferencias entre los grosores de las capas.

Una vez identificadas las capas de una muestra, estas se miden y se determina su color por comparación con un patrón de referencia (cuadro 1). Este es el procedimiento habitual para caracterizar de forma visual las muestras de pintura automotriz. La caracterización por color y grosor promedio tiene la ventaja de ser muy rápida.

Medición del espesor

El espesor de los fragmentos se midió mediante el análisis de fotografías de la sección transversal de las muestras que fueron preparadas para la espectroscopia Raman. Se utilizó un software de análisis de imágenes para el que se requirió una calibración de la longitud mediante la fotografía de una escala micrométrica, al mismo aumento que las fotografías por analizar. Una vez calibrado el sistema, la medida del espesor se realizó en diferentes secciones, con el propósito de determinar el valor promedio y su incertidumbre estándar.

Determinación del color

El color de los fragmentos de pintura se determinó mediante la comparación visual de la pintura con una escala de patrones de tonalidades de color (*pantone*). El color de cada fragmento correspondió al que por mayoría de un grupo de cuatro personas, le fue asignado; la comparación se repitió en momentos diferentes. Para las mediciones se utilizó una lente de

aumento y luz blanca de 5500 K. Para evitar un posible sesgo en el análisis de los fragmentos, se realizaron pruebas estandarizadas de daltonismo entre los participantes.

Muestras de pintura para la espectroscopia Raman

Con el propósito de eliminar la grasa, los fragmentos de pintura por analizar fueron lavados previamente con agua jabonosa y posteriormente enjuagados varias veces con agua destilada en baño ultrasónico. De estos fragmentos, mediante una hoja metálica afilada, se realizaron cortes longitudinales de pequeñas virutas, de las que se tomó la muestra, que se colocó sobre un vidrio portaobjetos. Los cortes se realizaron sin apoyo de una superficie, para no favorecer esfuerzos que deformaran el espesor de las capas de pintura.

Caracterización mediante el efecto Raman

Para obtener el espectro Raman de una muestra, es necesario iluminarla con un láser. La mayoría de los láseres que se utilizan están en la región visible del espectro; pero también se pueden utilizar otros de regiones cercanas (ultravioleta e infrarroja). Durante la interacción de los fotones del láser con la muestra, la mayor parte de las moléculas son llevadas a un estado energético no permitido; pero luego vuelven al estado energético original (dispersión Rayleigh). Sin embargo, una pequeña fracción de los fotones son dispersados con otra energía (dispersión inelástica). Los fotones dispersados inelásticamente brindan información relacionada con los enlaces moleculares de los componentes de la muestra y de estos se obtiene, precisamente, el espectro Raman de la muestra.

Resultados y discusión

Las muestras de pintura automotriz que se utilizaron en estos ensayos corresponden a pequeños fragmentos. La figura 1 presenta algunos ejemplos de las muestras utilizadas, variables en tamaño, forma y color. Algunos son similares a un polígono de aproximadamente 1 cm² y otros son más pequeños, largos y delgados.



Figura 1. Fragmentos de pintura automotriz utilizados. De izquierda a derecha, corresponden a dos muestras color gris claro, dos muestras color negro y dos muestras color verde.

Para realizar los análisis visual y espectroscópico de las pinturas, primero se limpiaron las muestras y posteriormente, se cortaron pequeñas virutas para exponer la sección transversal. Con el fin de mantenerlas en la posición correcta, las virutas fueron fijadas con plastilina sobre un portaobjetos (figura 2). Se encontró que el tipo de corte que brinda los mejores resultados es el realizado “al aire”, o sea, sin apoyo sobre una superficie, puesto que se producen menores esfuerzos paralelos a la superficie y, por lo tanto, menor deformación de la pintura.

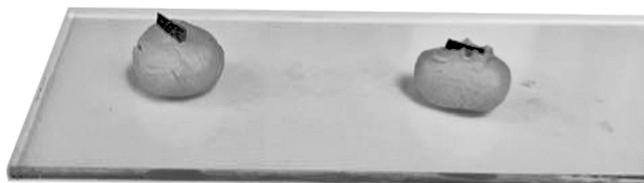
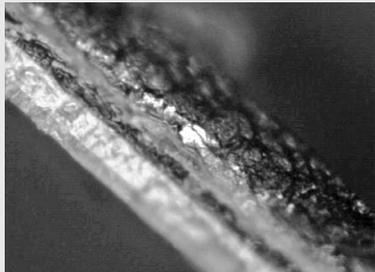


Figura 2. Portaobjetos donde se observa la muestra cortada y en posición para observación y medición bajo el microscopio

En el estudio realizado, se encontraron grosores dentro de un amplio intervalo de valores, desde 5 μm hasta 150 μm . Posiblemente, las capas más gruesas fueran consecuencia de retoques realizados de forma artesanal.

Cuadro 1. Muestra de pintura automotriz color negro, mediciones de su grosor e identificación del color de las capas que la conforman

	Capa	Color	Grosor promedio ($\pm 2 \text{ mm}$)
	1	Gris	23
	2	Gris claro	48
	3	Negro	30
	4	Gris oscuro	30
	5	Negro	33
	6	Negro	80

Las capas que brindan color a la pintura están formadas por mezclas de pigmentos y aditivos. Los pigmentos son compuestos orgánicos o inorgánicos que proveen el color deseado. Es posible obtener un cierto color utilizando un único pigmento o diversas combinaciones de ellos. Generalmente, cada fabricante de pinturas utiliza su propia fórmula para generar un color. El número de capas con pigmentos y su distribución no afecta necesariamente el color final de la muestra. Por ejemplo, la figura 3 presenta fragmentos que corresponden al mismo color exterior de la pintura, negro en este caso, aunque la distribución de las capas internas es diferente. Además, de la diferente distribución del color, las muestras presentan diferente número de capas, 4, 3 y 4, respectivamente.

Una pintura constituida por una serie de capas con una secuencia particular de colores y grosores puede facilitar la identificación del fragmento de pintura de un vehículo. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, no siempre resulta sencillo distinguir los colores ni el número de capas de una muestra.

La espectroscopia Raman es una técnica relativamente reciente en el estudio de la composición de las capas que conforman la pintura. Los espectros Raman son característicos de los compuestos que constituyen la pintura, por esta razón es una poderosa técnica de caracterización, porque es semejante a una "huella dactilar" de una pintura específica. La composición de cada capa genera un espectro con un perfil particular, que incluye la presencia de bandas de determinada energía. Con este espectro es posible la identificación del material por medio de la comparación con un material de referencia, lo que a su vez, posibilita la caracterización química de la muestra.

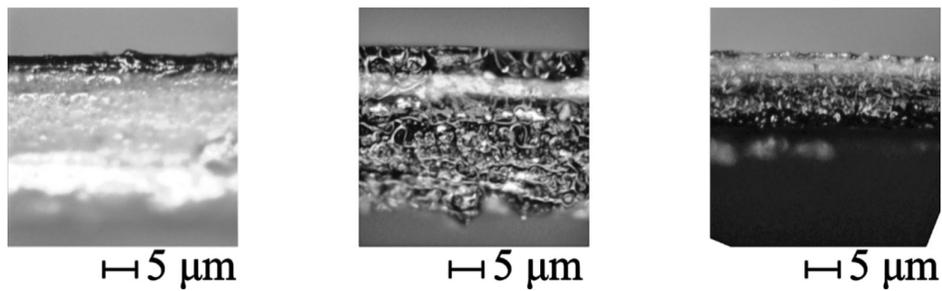


Figura 3. Cortes transversales de tres muestras

No obstante, en muchas ocasiones, la fluorescencia puede enmascarar la señal Raman en los espectros; este efecto puede verse en la figura 4. En la figura 4(a) la intensidad de la fluorescencia es mucho mayor que la señal Raman, de manera que hace imposible el análisis de este espectro; sin embargo, este no siempre es el caso. En la figura 4(b), la fluorescencia es evidente, pero su menor intensidad permite observar algunas líneas del espectro, de manera que es posible hacer un análisis de caracterización a pesar de la fluorescencia.

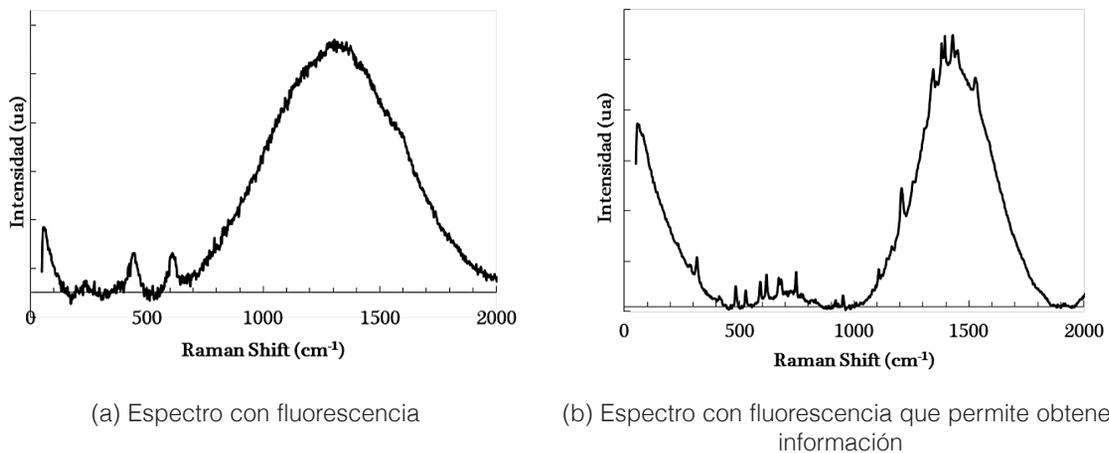


Figura 4. Espectros de muestras de pintura, que presentan fluorescencia.

No obstante, es posible minimizar el efecto de la fluorescencia que aparece en un espectro eligiendo correctamente la longitud de onda del láser incidente, controlando el tiempo de exposición de la muestra y disminuyendo la potencia del láser. Existen otros métodos para mejorar los espectros Raman, como los que requieren el uso de nanopartículas de oro o plata. Estos últimos se conocen como *SERS* (*Surface Enhanced Raman Spectroscopy*).

En el caso de la pintura automotriz que fue analizada en este estudio, las muestras que fue más difícil examinar mediante esta técnica debido a la fluorescencia o a efectos térmicos, fueron las de colores oscuros -negro, azul y gris oscuro-, como también las que tenían gran cantidad de componente perlado en su acabado.

La pintura de automóviles de color claro pudo ser estudiada con la técnica Raman y fue posible su identificación, al comparar las muestras con un fragmento de los vehículos de donde provenían; además, fue posible la identificación de algunos de los constituyentes de la pintura (figura 5).

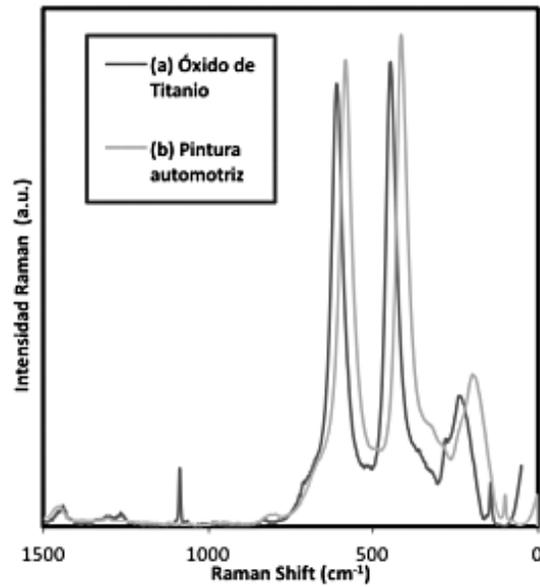


Figura 5. Superposición del espectro Raman de una muestra de pintura blanca de automóvil y el espectro del óxido de titanio.

La figura 5 muestra la superposición de dos espectros, el (a) es el espectro del óxido de titanio, el pigmento utilizado comúnmente para obtener el color blanco; el (b) es de una muestra de pintura de un automóvil blanco. El ligero corrimiento que se aprecia posiblemente se debe a pequeños cambios en la estructura del óxido de titanio utilizado como referencia, con respecto al que contiene la muestra de pintura, sin embargo la diferencia de posición entre picos es constante y la intensidad de los picos es la correcta. Al comparar ambos espectros es posible afirmar que se ha detectado la presencia del óxido de titanio en la muestra analizada, pues hay una clara correspondencia en los picos de ambos espectros.

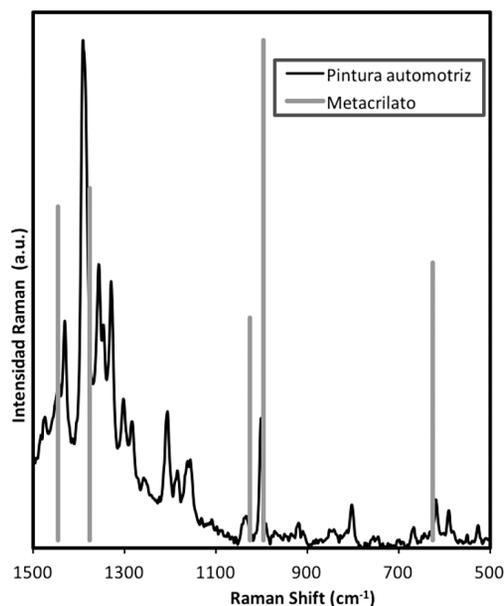


Figura 6. Espectro de pintura automotriz

La figura 6 presenta el espectro de una de las muestras de pintura analizadas y los picos característicos del metacrilato, uno de los aditivos de la pintura automotriz (De Gelder *et al.*, 2005). Es posible observar similitudes en los picos, tanto en su posición como en su relación de intensidad, por tanto, se puede corroborar la presencia de metacrilato.

Conclusiones

En este trabajo, se ha demostrado cómo las características físicas de las muestras de pintura automotriz, como el color, el espesor de las capas, el número y la secuencia de las capas aportan información que en muchas ocasiones permite establecer la coincidencia entre dos muestras, o sea, asegurar que su procedencia es la misma. Sin embargo, para sustentar la evidencia, es necesario complementar estos resultados con otras técnicas analíticas como la espectroscopia infrarroja o, en el caso estudiado, la espectroscopia Raman.

En el análisis de las muestras por espectroscopia Raman, se observó que es posible obtener el espectro de muestras muy pequeñas, aún de las capas individuales que conforman los fragmentos. Sin embargo, por las características de algunas de las muestras, los efectos térmicos o de fluorescencia no permitieron obtener el espectro de ciertas capas, principalmente aquellas de colores oscuros.

El espectro Raman es característico de la composición de las pinturas para automóviles, por lo que puede ser suficiente la correspondencia entre dos espectros de muestras diferentes para establecer que provienen de la misma fuente. Además, si el análisis lo requiere, también es posible identificar algunos de los constituyentes, lo que permite reconocer la eficacia de esta técnica complementaria en la obtención de resultados de mayor solidez en el análisis de la evidencia forense, para el esclarecimiento de los casos.

Agradecimientos

Agradecemos el apoyo del Consejo de la Escuela de Física y el respaldo y financiamiento de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica. También agradecemos la colaboración del Lic. Max Méndez, del Departamento de Pericias Físicas del Laboratorio de Ciencias Forenses del OIJ, por su ayuda en el suministro de las muestras de pintura y en la explicación de las técnicas de caracterización visual de los fragmentos de pintura automotriz. Finalmente, agradecemos a los estudiantes del TEC que participaron como asistentes en este proyecto, por su valiosa colaboración.

Bibliografía

- De Gelder, J.; Vandenabeele, P.; Govaert, F., & Moens, L. (2005). Forensic analysis of automotive paints by Raman spectroscopy. *Journal of Raman Spectroscopy*, 36(11), 1059-1067.
- Geiman, I.; Leona, M., & Lombardi, J. R. (2009). Application of Raman spectroscopy and surface enhanced Raman scattering to the analysis of synthetic dyes found in ballpoint pen inks. *Journal of Forensic Sciences*, 54(4), 947-952.
- Hobbs, A. L. & Almirall, J. R. (2003). Trace elemental analysis of automotive paints by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry (LA-ICP-MS). *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 376(8), 1265-1271.
- López López, M., & García Ruiz, C. (2014). Infrared and Raman spectroscopy techniques applied to identification of explosives. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 54, 36-44.
- McIntee, E. M. (2008). *Forensic Analysis of Automobile Paints by Atomic and Molecular Spectroscopic Methods and Statistical Data Analyses* (Doctoral dissertation). University of Central Florida Orlando, Florida.

- Miller, J. V. & Bartick, E. G. (2002). Forensic analysis of single fibers by Raman spectroscopy. *Applied Spectroscopy*, 56(1), 1729-1732.
- Programa Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible (2015). *Vigésimo Primer Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible*. San José, Costa Rica, p. 311.
- Skenderovska, M.; Minčeva-Šukarova, B., & Andreeva, L. (2008). Application of micro-Raman and FT-IR spectroscopy in forensic analysis of automotive topcoats in the Republic of Macedonia. *Macedonian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 27(1), 9-17.
- Tague, T.; Wang, P., & Leona M. (2010) Forensic analysis of documents using Raman spectroscopy. Application Note (N.º 522). Consultado en Bruker Optics: www.bruker.com/optics.
- Tracton, A. A. (Ed.) (2005). *Coatings technology handbook* (capítulo 8). Boca Ratón, Florida: CRC Press.
- Van Alphen, M. (1998). Paint Film Components. *National environmental health forum monographs, general series* (N.º 2).
- Vankeirsbilck, T; Vercauteren, A.; Baeyens, W.; Van der Weken, G.; Verpoort, F.; Vergote, G., & Remon, J. P. (2002). Applications of Raman spectroscopy in pharmaceutical analysis. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 21(12), 869-877.

Situación de la gestión del agua potable en las zonas rurales de la provincia de Cartago, Costa Rica

Status of Management of drinking water in rural zones of Cartago, Costa Rica

Silvia M. Soto-Córdoba¹, Lilliana Gaviria-Montoya²,
Macario Pino-Gómez³

Fecha de recepción: 20 de mayo de 2016

Fecha de aprobación: 16 de julio de 2016

Soto-Córdoba, S; Gaviria-Montoya, L; Pino-Gómez, M.
Situación de la gestión del agua potable en las zonas rurales de la provincia de Cartago, Costa Rica. *Tecnología en Marcha*.
Encuentro de Investigación y Extensión 2016. Pág 67-76.

DOI: 10.18845/tm.v29i8.2986



- 1 Carrera de Ingeniería Ambiental, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago. Costa Rica. Correo electrónico: ssoto@itcr.ac.cr
- 2 Carrera de Ingeniería Ambiental, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago. Costa Rica. Correo electrónico: lgaviria@itcr.ac.cr
- 3 Carrera de Ingeniería Ambiental, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago. Costa Rica. Correo electrónico: mpino@itcr.ac.cr

Palabras clave

Acueductos comunales rurales; ASADA; condiciones de la red; aguas residuales; residuos sólidos.

Resumen

En Costa Rica, cerca del 95 % de la población en las zonas urbanas recibe agua de buena calidad, gracias a que los grandes distribuidores de agua del país cuentan con la tecnología y los recursos humanos y financieros para la adecuada gestión de abastecimiento. En las zonas rurales, esta gestión está en manos de las asociaciones administradoras de agua (ASADA), que son integradas por juntas de vecinos voluntarios; en esas zonas persisten áreas que no reciben agua potable. El estudio que aquí se publica se enfocó en las ASADA de la provincia de Cartago, con el propósito de determinar mediante la visita y evaluación la situación real de los acueductos administrados por ellas, y los problemas ambientales asociados a su manejo, y poder ofrecer así recomendaciones para lograr un servicio de calidad sostenible. Los resultados aquí expuestos solo se enfocaron en el estudio de caso de la provincia de Cartago, Se encontró que las ASADAs denominadas pequeñas cuentan con mayores problemas operativos y de mantenimiento de la red.

Keywords

Rural acueducts; ASADA; distribution mains; residual waters.

Abstract

In Costa Rica, almost 95 % of its urban population is benefited with public water services of good quality, because providers are supported on technology, human resources and financial resources. On the other hand, in rural zones water is distributed through aqueducts managed by associations of volunteers (named ASADA). This study focuses on rural aqueducts in Cartago, in rural areas. It verifies their actual conditions and the environmental problems originated from their operation, with the main purpose of setting technical improvements that will ensure a sustainable water service. The case study focus on the Cartago Province. The small ASADAs have the main operation and management problems.

Introducción

El tema del agua para consumo humano es uno de los de mayor importancia para las comunidades. En Costa Rica, cerca del 95 % de la población en las zonas urbanas recibe agua de buena calidad; sin embargo, en las zonas rurales persisten áreas que no reciben agua potable. Los grandes distribuidores de agua del país cuentan con la tecnología y los recursos humanos y financieros para la adecuada gestión de abastecimiento; pero en las zonas rurales, esta gestión está en manos de las ASADA, asociaciones administradoras de agua creadas a partir del año 2011 por ley, a solicitud del Instituto Nacional de Acueductos y Alcantarillados, más conocido como AyA; estas son integradas por juntas de vecinos voluntarios.

En este artículo se presentan los resultados de la determinación de los principales problemas ambientales encontrados en las zonas abastecidas por las ASADA en la provincia de Cartago. Estos resultados se enmarcan en el proyecto “Propuesta para el mejoramiento de las condiciones de saneamiento ambiental, calidad y distribución de agua potable en las ASADA de la provincia

de Cartago, utilizando un enfoque de prevención [ante el] cambio climático”, financiado por la Vicerrectoría de Investigación del Instituto Tecnológico de Costa Rica, código 1460-038.

La provincia de Cartago, ubicada en la parte central de Costa Rica, tiene una población de 490 903 habitantes, según el INEC (2011). Administrativamente se divide en 8 cantones y 2 concejos municipales de distrito.

El 84% de la población de Cartago se encuentra en zonas urbanas, a diferencia del restante 16%, en zonas rurales. Los cantones con mayor proporción de población rural corresponden a Turrialba (43%), Jiménez (47 %), Alvarado (45 %) y Paraíso (23 %) (INEC, 2011).

En esta provincia los investigadores identificaron en total 89 de estas asociaciones, que abastecen a cerca de 131 000 habitantes, lo que representa un 27% de la población de la provincia. Para estudiar este sector se utilizó una muestra representativa de 22 ASADAs, que se visitaron para confirmar su situación y donde se aplicaron instrumentos de evaluación.

Las principales fuentes de agua para distribución en las zonas rurales son las nacientes ubicadas en las zonas altas de las montañas; las ASADAs prácticamente no utilizan las aguas superficiales para brindar el servicio de abastecimiento a la población.

La agenda ambiental del agua en Costa Rica no está claramente definida. Actualmente existe una crisis de gobernabilidad, ya que son muchos los actores institucionales, comunales, privados e incluso empresas estatales (Segura-Bonilla, 2002) que compiten por el recurso, antes abundante y desperdiciado, pero a la fecha en grave riesgo. Algunos sectores del país, como la región Chorotega (Barquero, 2015), padecen de escases de agua, mientras que otros como la provincia de Cartago, abastecen el agua que recibe la Gran Área Metropolitana (Barrantes, 2005).

Con el fin de estudiar el estado actual de la gestión del recurso hídrico por las ASADAs en la provincia de Cartago fue necesario definir con exactitud el estado de la distribución del agua en la provincia, ya que en Costa Rica cada sector maneja sus datos por separado. Es así como el AyA maneja estadísticas de sus acueductos (ALCANTARILLADOS, 2015), las Municipalidades también (Rodríguez, 2006) y, por otra parte, las ASADA llevan estadísticas en forma dispersa. En general, los acueductos operados por AyA y las Municipalidades han conseguido niveles muy altos de calidad en el servicio; sin embargo, en el caso de las ASADAs, debido a las particularidades de cada administración, no existe homogeneidad en este.

En el caso de las aguas residuales, el país solamente trata el 4 % de su volumen. La inversión social en alcantarillados sanitarios en la década de 1980 a 1990 alcanzó el 14 %, pero disminuyó a un 4 % en la década de los noventa (CEPIS, 2000).

La gestión de los residuos sólidos en el país está normada por la Ley 8839 (Ministerio de Salud, 2016); pese a esto, en las zonas rurales persisten la quema de materiales y la proliferación de botaderos clandestinos.

Objetivos o hipótesis

El objetivo de este trabajo es ofrecer una visión general de la gestión del recurso hídrico y las condiciones de saneamiento, en el caso específico de las zonas atendidas por las ASADAs, en la provincia de Cartago.

Metodología empleada

Para realizar esta investigación fue necesario crear una base de datos actualizada con la información de la ubicación, las personas encargadas de la gestión, el número de abonados y el estado de la desinfección en los acueductos administrados por todas las ASADA que funcionan en la provincia de Cartago. La recolección de información se realizó durante los años 2014 y 2015. En la primera parte del proyecto se utilizaron las bases de datos en línea del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), del Ministerio de Energía y Minas (MINAET), del Instituto Nacional de Acueductos y Alcantarillados (AyA) y del Ministerio de Salud (MinSalud); sin embargo, esta información estaba desorganizada y dispersa, por lo que fue necesario acudir directamente a las oficinas gubernamentales para tratar de entenderla; como los datos eran inconsistentes entre sí, fue necesario realizar una depuración de todas las bases y corroborar la información en cada una de las oficinas de las ASADA. Un resumen general de los resultados obtenidos se muestran en este artículo, sin embargo, para profundizar se puede revisar (Soto-Córdoba S.M, Gaviria-Montoya L, Pino-Gómez M, 2016)

Se agruparon las ASADA según el estado de desinfección de las aguas y el número de abonados que atendían, pero debido a que en el país no existe una clasificación de estas organizaciones, fue necesario agrupar los datos usando el paquete estadístico Minitab7 mediante la distribución de frecuencias y los cuartiles respectivos. Se estableció que las ASADA con más de 217 abonados se considerarían para los efectos del estudio como grandes; como medianas, las ASADA con un número de entre 57-216 abonados, y finalmente, como pequeñas, las ASADA con menos de 56 abonados.

Posteriormente se hizo una segunda clasificación según el estado de desinfección. Se seleccionaron 21 ASADA representativas de la situación general de la provincia, las cuales se visitaron durante los años 2014 y 2015, para determinar los principales problemas ambientales de cada comunidad atendida con suministro de agua por cada ASADA.

Actividades realizadas

1. Solicitud de información en bases de datos a los entes rectores del sector, a saber: AyA, Ministerio de Salud, Municipalidades, Contraloría General de la Republica, ARESEP, MINAE y otras
2. Construcción de una base de datos actualizada y consolidada, con la información de la actividad 1
3. Visita de inspección a cada una de las ASADA incluidas en la muestra de estudio
4. Levantamiento de información sobre los principales problemas ambientales
5. Entrevistas con los administradores y fontaneros
6. Análisis de la información

Resultados obtenidos

Se encontró que en general las ASADA que se clasifican como pequeñas, tienen muchos más problemas de operación y administración, y dificultades para el mantenimiento de la red, en comparación con las ASADA grandes; además, que un 71 % de las ASADA pequeñas no realizan desinfección. Sin embargo, las ASADA denominadas grandes, también presentan algunos problemas operativos, técnicos y financieros. Todo lo anterior apunta al riesgo que significaría para la salud de la población a futuro inmediato y para la sostenibilidad del servicio. A la fecha no se han presentado problemas con respecto a la oferta del agua; pero la variación en los regímenes de lluvia en Cosa Rica y el inadecuado uso del suelo han provocado una

disminución de los caudales en las nacientes de agua, lo que ha puesto en apuros a algunas de estas organizaciones.

Distribución de los prestadores de servicio

De acuerdo con la investigación realizada, se construyó la figura 1 donde se resume la distribución porcentual de abonados según el tipo de ente administrador en la provincia de Cartago. El 60 % de los abonados de la provincia es abastecido por acueductos municipales, y cerca del 26 % mediante la figura de ASADA. Esta figura se concentra principalmente en los cantones con mayor población rural con menores ingresos. En el caso del cantón de Turrialba, que incluye territorios indígenas, estos poseen sus propios sistemas de abastecimiento y en algunos casos son administrados por una ASADA.

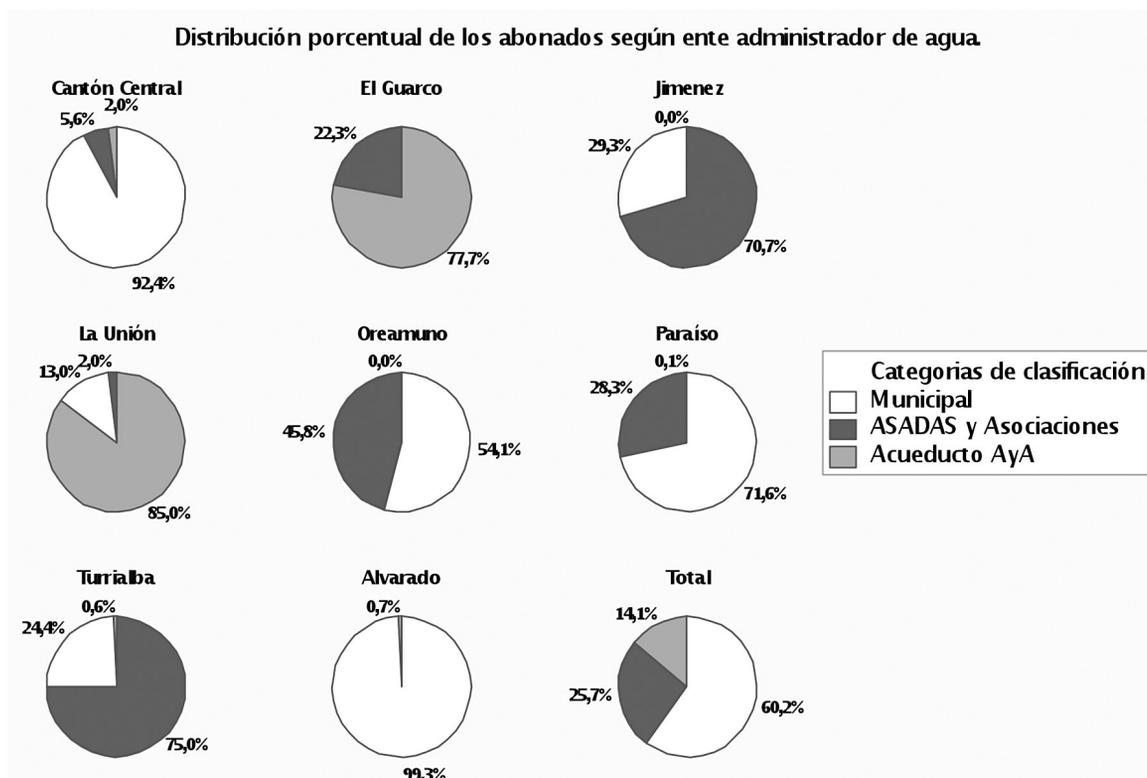


Figura 1. Distribución porcentual de abonados según tipo de prestador de servicios, provincia de Cartago

Descripción de los sistemas de captación de agua en los acueductos administrados por las ASADA

Las ASADA estudiadas se abastecen mediante la captación de agua a partir de nacientes ubicadas en las montañas. En general se determinaron muchos riesgos asociados a las zonas de captación, entre los que se enumeran los siguientes:

- Los sistemas de captación han sido construidos en forma muy artesanal por los fontaneros y generalmente son muy rudimentarios.
- La gestión de los sistemas de captación es realizada por fontaneros y agricultores (figura 2). Como se observa, se construyó un sistema colector con una tubería de captación y la protección es mínima.

- Algunas de las nacientes se ubican en propiedades que no pertenecen a las ASADA.
- La mayoría de las zonas donde se ubican las captaciones son lejanas, peligrosas, de difícil acceso y con grandes riesgos de derrumbes, deslaves e inundaciones.
- Las redes de conducción desde las zonas de captación hasta la población son muy extensas.
- Las zonas de captación de agua no están debidamente protegidas del acceso de personas y animales.
- Aunque existe normativa específica que delimita las áreas de protección de nacientes, esta generalmente no se cumple.
- Junto a las nacientes se desarrollan diversas actividades agrícolas, ganaderas, de construcción, turismo e incluso tránsito de personas.
- Existen muchas nacientes que abastecen a cada ASADA, lo que dificulta el control y la fiscalización.
- Los caudales recolectados en cada naciente son muy variables, desde 0,5 litros/segundo hasta 20 litros/segundo.
- En un mismo territorio operan varias ASADA simultáneamente.
- En los últimos años se han presentado inconvenientes para colocar infraestructura en los acueductos o realizar inspecciones en los predios privados.



Figura 2. Sistema de captación de una fuente superficial de montaña

Descripción de la conducción del agua

Se observó que las distancias entre las zonas de captación y las de distribución varían entre 4 km y 20 km. Debido a que los terrenos por donde se colocan las tuberías son montañosos, muchas veces estas son destruidas por deslaves, animales, tránsito de personas, sismos o simplemente por la acción de las condiciones ambientales que degradan los materiales de conducción. Es poco común el uso de tuberías enterradas, y las que existen no están debidamente registradas en planos de red. En la mayoría de las ASADA la información es referida por los fontaneros y administradores, y no se cuenta con registros escritos. Se dispone de muy poca información

técnica; casi todo se hace en forma empírica por las personas que administran la ASADA. Las redes utilizadas para la conducción no son las apropiadas (figura 3); se observa que se usan mangueras que no cumplen con las normas de seguridad y resistencia; además, las uniones entre mangueras favorecen la pérdida de agua y la contaminación.



Figura 3. Sistema de las redes de conducción

Uso de desinfección

De la base de datos general para la provincia de Cartago, se identificaron 43 acueductos ASADA sin sistemas de desinfección, que abastecen a 33 000 personas, ubicadas principalmente en zonas rurales más alejadas y de difícil acceso. En estos acueductos, el agua es simplemente capturada de las nacientes y conducida hasta las casas de habitación. A la fecha no se reportan incidentes en la salud humana debido al consumo de este tipo de agua; sin embargo, el país cuenta con una sólida red de atención primaria, gracias a la existencia de EBAIS y Hospitales públicos. En el caso de los restantes 44 acueductos ASADA que sí aplican desinfección, la población atendida asciende a 99 000 habitantes. Un porcentaje muy alto, que aún no ha sido definido con exactitud, cuenta con sistemas de desinfección obsoletos, en mal estado o que son manipulados inadecuadamente. El personal que labora en las ASADA cuenta con muy poca capacitación técnica, por lo que no se llevan controles periódicos de cloro residual en el agua. Se observó, durante las visitas técnicas, que muchas veces a pesar de que se realiza la cloración en los tanques de almacenamiento, las condiciones de la red provocan la contaminación del líquido.

Manejo de las aguas grises

Las aguas grises provenientes de las duchas, lavamanos, pilas (ropa y platos) y otros procesos de limpieza en su totalidad son descargadas sin tratamiento en los colectores pluviales (figura 4a), o bien en caños construidos en el terreno, o inclusive son vertidas directamente en las aguas superficiales sin que se haya considerado disponer de una infraestructura de descarga debidamente construida (figura 4b). En algunos casos extremos se identificaron rebases de aguas negras en zonas muy transitadas, con el consiguiente riesgo de infecciones y enfermedades relacionadas con coliformes fecales, zancudos y otros vectores (figura 4c).



Figura 4. Vertidos de aguas grises en la provincia de Cartago

Manejo de las aguas negras

El 89 % de la población ubicada en la zona de estudio utiliza el sistema de tanque séptico para el tratamiento de sus aguas negras. No se han evidenciado problemas de contaminación en mantos acuíferos por el uso del tanque séptico con área de infiltración en la zona de estudio. El uso de letrinas no llega al 1 % de la población. La evidencia de conexiones clandestinas de aguas negras que descargan directamente en los ríos es mínima.

Manejo de los residuos sólidos

Se identificaron residuos sólidos de todos los tipos. Resalta la presencia de envases de agroquímicos, sacos de polietileno, restos de lavado de vegetales, restos de productos agropecuarios de rechazo, botellas plásticas de refrescos, papeles, cartones, bolsas plásticas, artículos electrónicos, de construcción y los relacionados con actividades agroindustriales y veterinarias, en los cauces de los ríos. Se encuentran muchos materiales en las corrientes de agua superficial, como lo ilustra la figura 5.



Figura 5. Residuos sólidos encontrados en los cauces de los ríos

Conclusiones y recomendaciones

Costa Rica se ha caracterizado por tener un elevado porcentaje de saneamiento básico y acceso al agua potable en las zonas urbanas, esto gracias a los servicios prestados por AyA, las Municipalidades y algunas empresas privadas. En las zonas rurales la realidad es otra, debido a las condiciones del terreno, la distancia entre las casas y la baja rentabilidad del servicio. La creación de la figura de las ASADA respondió en parte a las dificultades que enfrentaba la compañía estatal AyA para brindar el servicio en las zonas rurales. Esta figura de administración ha funcionado gracias al esfuerzo y compromiso de los vecinos, pero conforme aumenta la densificación de la población y la cantidad de actividades productivas, los riesgos por contaminación y deterioro del recurso aumentan; además, el cambio en los patrones del clima, que provoca la variación de los regímenes de lluvia, junto con los usos inadecuados del suelo, afecta directamente la distribución del agua potable en las zonas rurales de Costa Rica, incluso se han venido reportando la disminución de los caudales en las fuentes, lo que ya está ocasionando racionamientos del servicio en los casos más extremos. Esta realidad hace necesario transformar las ASADA en organizaciones especializadas desde el punto de vista técnico.

En general, muchas ASADA se manejan confiando en que nadie afectará las nacientes; pero la ubicación de algunas en zonas de difícil acceso y a grandes distancias de los puntos de distribución eleva costos por concepto de vigilancia y mantenimiento de redes; mientras tanto, el uso de nacientes ubicadas en terrenos privados provoca conflictos; algunos propietarios continúan explotando sus terrenos con agricultura o ganadería, o bien no facilitan las actividades de protección de nacientes; por ejemplo, se ha reportado a la fecha en otros sectores de la provincia la contaminación con nitratos provenientes de la actividad agrícola.

A raíz de la oferta hídrica del país, la cual en su mayoría depende de fuentes de tipo naciente, la calidad del agua que se brinda a la población es muy alta, inclusive sin cloración, pues el agua de las nacientes en las montañas cumple con los parámetros físicos, químicos y biológicos requeridos por la legislación nacional. Por esta razón no se han presentado incidentes de salud importantes, ni tampoco de intervención ambiental.

Sin embargo, como se ha indicado previamente, el panorama en cuanto a la calidad del agua puede ser preocupante si se considera que los acueductos ASADA enfrentan muchos riesgos, como ya se señaló, el uso inapropiado de los terrenos, el aumento en la deforestación y la incorporación de actividades productivas, que provocarán a mediano plazo la contaminación de estas aguas.

Para brindar un servicio de calidad y sostenible, los autores consideran que es necesario lo siguiente:

1. Mayor apoyo institucional a las ASADA.— Actualmente, el AyA es el ente rector de la distribución del agua. Personeros de la institución visitan al menos una vez al año cada ASADA, pero les es imposible darles a estas asociaciones un seguimiento día a día. Por esto, urge contar con alguna figura técnica que asesore esta importante labor. A la fecha, las juntas de vecinos se encargan de recolectar muestras para los análisis físico-químicos, contratar empresas para que hagan los análisis, enviar los resultados al AyA y al Ministerio de Salud, transportar el agua y atender cualquier emergencia; pero conforme aumente la cantidad de necesidades que atender por el aumento de población, los problemas de operación también serán mayores.
2. Implementar en todas las ASADA sistemas de cloración de bajo costo, que los vecinos puedan manejar.— A la fecha, la mayoría de estos sistemas están abandonados, no son bien manejados y muchas veces no se están en funcionamiento por quejas de los vecinos.

3. Establecer políticas a mediano plazo para fortalecer el concepto de grupos de ASADA.— Los autores encontraron serios problemas de competencia por las mismas fuentes de aguas, por lo que una opción para fortalecer el sector sería que estas ASADA se unieran para obtener economías de escala.
4. Adquirir los terrenos donde se ubican las nacientes, con lo cual se lograría más control sobre ellos, y establecer los procesos de protección adecuados.— A la fecha, las ASADA tienen poco control sobre las actividades de ganadería, agricultura, e inclusive sobre acciones vandálicas, en ciertas nacientes.
5. Incorporar más estudios para poder asegurar que la excelente calidad del agua en las ASADA que no proveen desinfección se mantendrá con el tiempo.

En la zona de estudio se encontró que prácticamente el 100 % de la población no realiza ningún tratamiento de las aguas grises, las cuales son canalizadas directamente a los ríos, con la consiguiente contaminación de estos. Esta práctica pone en riesgo la salud y se puede constituir en un problema grave ante los escenarios inminentes de cambio climático, ya que es inviable utilizar el agua de los ríos para el consumo humano, bajo el esquema actual de distribución.

En el caso de los residuos sólidos, también se evidencian serios problemas por la proliferación de botaderos clandestinos y el desperdicio. Las acciones de recuperación de materiales son mínimas; a excepción de una comunidad de menos de cien abonados, que realiza actividades de separación de papeles y latas de aluminio, el resto de las zonas estudiadas no cuenta con planes para ese fin. A pesar de que en la zona se practica una alta recolección de residuos sólidos, no existe el servicio de aseo de zonas comunes y vías públicas. Se combina la mala educación ambiental con la falta de un servicio de limpieza, aunque la comunidad tiene claro que los residuos sólidos se recolectan e inclusive se separan.

Bibliografía

- ALCANTARILLADOS, I. C. (2015). Obtenido del sitio web oficial: <https://www.aya.go.cr/SitePages/Principal.aspx>
- Barquero, M. (13 de enero de 2015). Hoteleros alistan medidas de emergencia por falta de agua. *Periodico La Nación*.
- Barrantes, G. (2005). Disponibilidad del recurso hídrico y sus implicaciones para el desarrollo en Costa Rica. En *Estado de la Nación*. San José, Conare
- CEPIS. (2000). Analytical Report Costa Rica. Assessment of drinking water and sanitation 2000 in the Americas. On line: <http://www.bvsde.paho.org/enwww/eva2000/costarica/informe/inf-04.htm>.
- La Gaceta (18 de 11 de 2011). Proyecto de ley n.º 17914 del 18/11/2010, pp. 1-25.
- Ministerio de Salud (2016). Ley 8839. Obtenido de <http://www.ley8839.go.cr/>
- Rodríguez, G. R. (2006). *Gestión Ambiental Municipal y Participación Local*. Estado de la Nación. San José, Conare
- Segura Bonilla, O. (2002). Agenda ambiental del agua en Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 40, pp 39-49.
- Soto-Córdoba S.M, Gaviria-Montoya L, Pino-Gómez M, (2016). Build up a database for determinate the management of drinking water in the Province of Cartago - Costa Rica. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 6(3). doi: 10.2166/washdev.2016.092.

Visualizador 3D de la geografía de Costa Rica

3D visualization of the geography of Costa Rica

Franklin Hernández-Castro¹, Jorge Monge-Fallas²

Fecha de recepción: 26 de mayo de 2016

Fecha de aprobación: 6 de agosto de 2016

Hernández-Castro, F; Monge-Fallas, J. Visualizador 3D de la geografía de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Encuentro de Investigación y Extensión 2016. Pág 77-85.

DOI: 10.18845/tm.v29i8.2987



1 Escuela de Diseño Industrial. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Hochschule für Gestaltung Schwäbisch Gmünd. Alemania. Correo electrónico: franhernandez@itcr.ac.cr

2 Escuela de Matemática. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: jomonge@itcr.ac.cr

Palabras claves

Sistemas de visualización en 3D; geografía de Costa Rica; navegación 3D.

Resumen

El presente artículo describe un sistema de visualización de la geografía de Costa Rica en tres dimensiones. Se detallan aspectos de eficiencia del sistema y de la navegación.

Keywords

3D visualization system; Geography of Costa Rica; 3D navigation.

Abstract

This paper describes a 3D visualization system of the geography of Costa Rica. It concerns topics about efficiency and navigation the tridimensional space.

Introducción

En Costa Rica hay varios lugares donde se puede consultar diferentes datos sobre la geografía nacional. Los más visitados posiblemente sean

- el Atlas Digital (Ortiz, 2008)
- el Proyecto PRIAS(CeNat)
- el Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT).

Sin embargo, ninguna de estas fuentes muestran los datos en tres dimensiones.

El proyecto iReal 3.0 consiste en la visualización de los hipocentros de los terremotos ocurridos en los últimos veinte años y en la animación de los movimientos de la península de Nicoya producidos por el terremoto del 5 de septiembre del 2012.

En ambos casos se necesita un visualizador en tres dimensiones georreferenciado, que permita mostrar los datos en su posición real y explorarlos con detalle.

Esta necesidad nos llevó a la programación de esta herramienta, que más tarde nos servirá para relacionar con estos proyectos y otros tipos de datos, como por ejemplo, dirección y velocidad de los vientos, precipitaciones, clima, etc.

Del dominio

Como se dijo en Costa Rica hay varias fuentes de datos geográficos. En nuestro caso, se recurrió al proyecto PRIAS(CeNat), que tiene magníficas fuentes de este tipo de datos, y al Atlas Geográfico realizado por el Instituto Tecnológico de Costa Rica (Ortiz, 2008).

Los datos venían en formatos de dBASE (.dbf) y en modelos de elevación en forma de imágenes del tipo que se muestra en la figura 1.

Con esta información a la mano, se procedió a generar pruebas de eficiencia en el manejo de este tipo de datos. La primer opción fue trabajar con Javascript (Hernández-Castro & Monge-Fallas, 2017), y como se menciona en el artículo citado se determinó usar el enfoque de

`requestAnimationFrame()` de Javascript con la biblioteca Three.js corriendo en Apple Safari® para obtener los mejores resultados.

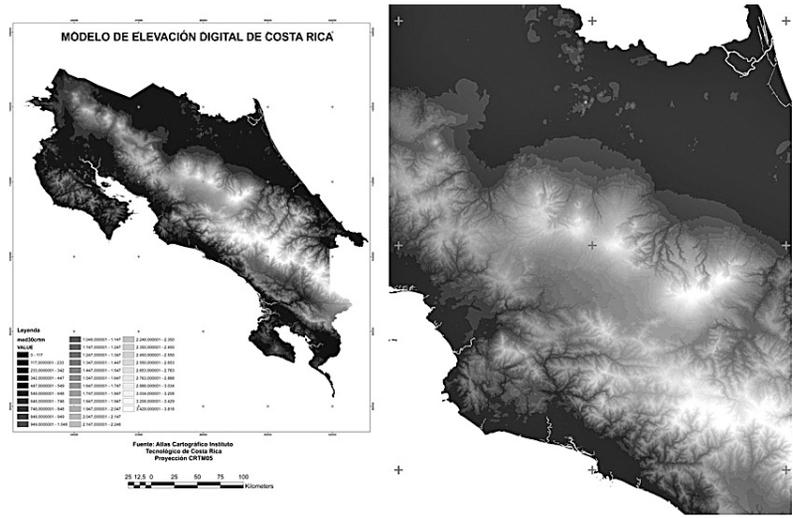


Figura 1. Modelos de elevación del tipo que sirvieron de base para la programación del sistema

Posteriormente se programaron prototipos similares, tanto en JavaScript/Three.js como en Java/Processing y Apple Swift®, con la misma idea de seleccionar la plataforma que se desempeñara mejor en el manejo de datos en espacios 3D.

En la figura 2 se muestran los resultados de las pruebas.

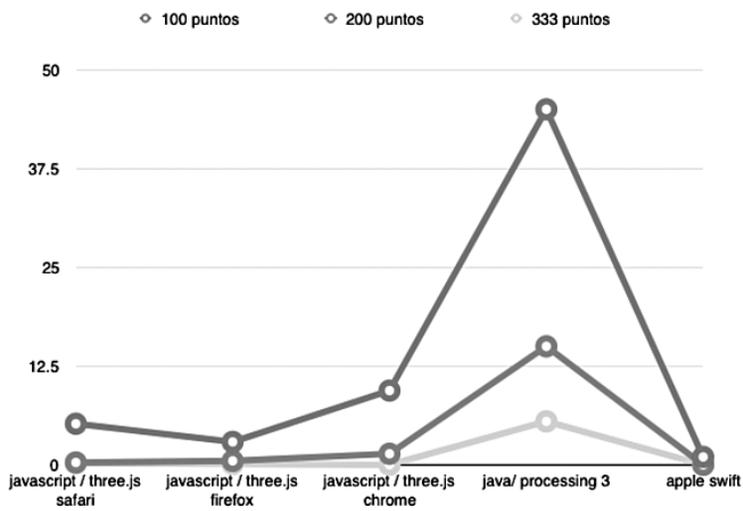


Figura 2. Comparación de la eficiencia en frames per seconds (fps) de diversas plataformas

Como se observa JAVA, específicamente Processing 3 con el motor interno de OpenGL (P3D) obtuvo un rendimiento muy superior a todas las demás plataformas. Con esto claro, se procedió a realizar la implementación en este ambiente.

Estado del arte

Se ha escrito mucho desde el artículo clásico del Kenneth G. D Geographic Network Displays (Cox, Eick & He, 1996), hasta trabajos como los de SABINA (Wilhelm, Mailhiot, Arany, Chardine, Robertson, & Ryan, 2015), del año pasado, con mejores técnicas en el manejo de la data para visualizaciones en tres dimensiones.

Existen algunas referencias de enfoques y algoritmos para tratamiento de data relacionada con modelación en 3D, como el caso de Mei-Po Kwan (Kwan, 2000), y de Gallerini (Gallerini & Donatis, 2007); sin embargo, poco se ha trabajado en la visualización de estos ambientes.

También encontramos algunos sistemas propietarios como el Scroops3D (Reid, Christian, Brien & Henderson, 2015), que tiene buenas prestaciones pero, por supuesto, son herramientas costosas.

Un enfoque que sí ha trabajado en los aspectos de visualización y eficiencia es el modelado 3D para juegos por computadora, como ejemplo los casos de Ruzinoor Che Mat (Mat, Shariff, Zulkifli, Rahim & Mahayudin, 2014) y Dieter Fritsch (Fritsch & Kada, 2004). En estos trabajos se evidencia una tendencia hacia el uso de las tecnologías de *gaming* para modelar datos geográficos aprovechando la tecnología de alta eficiencia que esta industria necesita.

En nuestro caso, seguimos precisamente esta tendencia, con ambientes como Three.js y Java/processing, que fueron diseñados más para generación de animaciones y juegos que para herramientas de visualización.

La aplicación

Navegación

El primer problema en que se trabajó fue el conocido como “perdidos en el hiperespacio” (Theng, 1999). Para corregir este aspecto usamos un enfoque ya probado por nuestro grupo (Hernández-Castro, Mata-Montero & Monge-Fallas, 2009), que consiste en limitar la navegación del usuario a dos tipos de giros. Esta estrategia permite que el usuario no se pierda “volando” por el ambiente, sin que se sienta limitado por la herramienta.

El problema conocido como “perdidos en el hiperespacio” radica en la complejidad de navegar en un espacio que tienen tres dimensiones y, por tanto, también tres ejes de giro. Así, en un sistema de “vuelo” normal, se conocen los giros alabeo, dirección o guiñado y cabeceo; los tres giros juntos definen el nuevo vector de dirección sobre el cual se instala “nuevo sistema coordenado”. En otras palabras, un usuario normal puede girar en los tres ejes y definir en qué dirección desea avanzar, esta idea se conoce como el “vuelo de helicóptero” (Fairchild, Poltrock & Furnas, 1999).

Nuestra solución al problema también pasó por limitar los movimientos del usuario pero de otro modo. “Partiendo de que siempre existe un centro de interés, se limita la navegación del usuario a la superficie de una esfera cuyo centro se ubica en este punto de interés.” (Hernández-Castro, Mata-Montero & Monge-Fallas, 2009).

La cámara gira en dos circunferencias; la circunferencia vertical, que siempre es del mismo diámetro, y la circunferencia horizontal, que varía de diámetro según su “latitud” en la esfera (figura 3). Todo el sistema puede hacerse más pequeño o más grande dando la sensación de *zoom in* y *zoom out*. De este modo, la navegación resulta más fluida y sin la sensación de estar limitada.

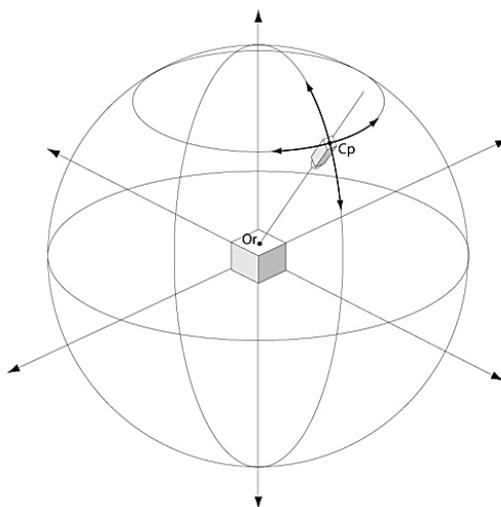


Figura 3. Esfera de navegación implementada

Triangulación

En el caso de la triangulación, y para mejorar la eficiencia en cuanto a la manipulación de la geografía, se modificaron los datos de tal modo que se pudiera etiquetar qué parte de la matriz cuadrada correspondía a áreas en el mar. La idea era solo mostrar en esta implementación las áreas correspondientes a tierra firme y con esto reducir al menos a la mitad la cantidad de datos visualizados al mismo tiempo.

La secuencia de triangulación también debía ser la misma en todos los polígonos, de modo que las normales de los triángulos tuvieran todas la misma dirección y así el visualizador OpenGL las renderizara del mismo lado.

En la figura 4 se muestra cómo se planificó esta triangulación y la diferencia entre áreas en el océano y en tierra firme. En este caso, si un triángulo tiene un punto “gris” (en el mar) se desiste de renderizarlo. Más abajo se ve el resultado del algoritmo.

Resultados

Zoom

Con la estrategia de la esfera de navegación se hace fácil hacer acercamientos, rotaciones y giros desde cualquier punto, para esto se cambian los tamaños de los diámetros sobre los que gira la cámara en forma proporcional:

$$Cx = R_{menor} * \cos(\alpha) + Ox$$

$$CY = R_{mayor} * \sin(\beta) + OY$$

$$CZ = R_{menor} * \sin(\alpha) + OZ$$

$$R_{menor} = R_{mayor} * \cos(\beta)$$

Donde Cx, Cy, Cz son la coordenadas de la cámara.

Ox, Oy, Oz son las coordenadas del punto que se desea observar α es el giro sobre el eje Y y β sobre el eje X; Rmenor el radio del círculo de giro horizontal y Rmayor el radio del círculo de giro vertical (ver detalle en figura 5).

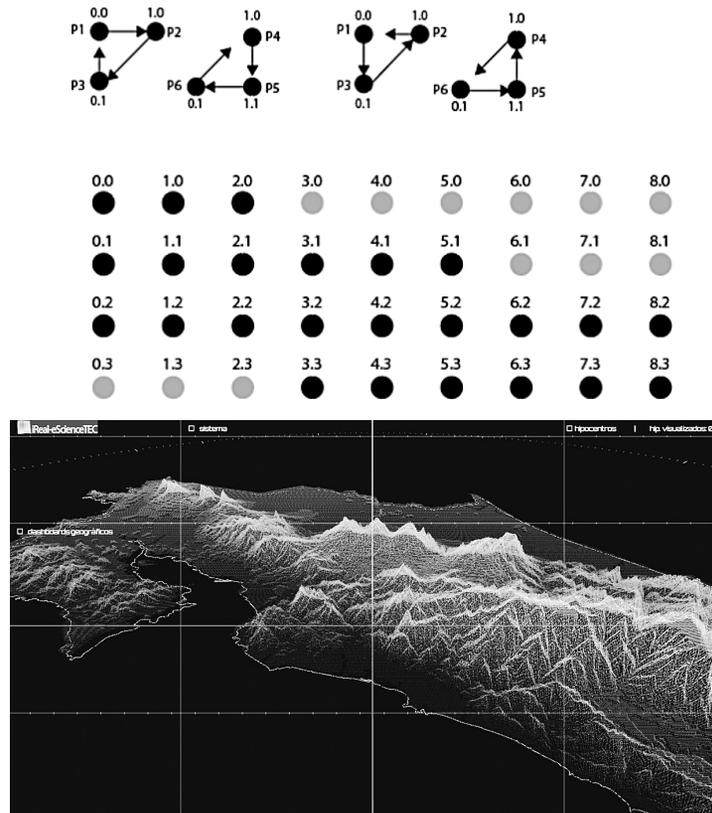


Figura 4. Estrategia de triangulación usada y su resultado al eliminar los puntos correspondientes al océano

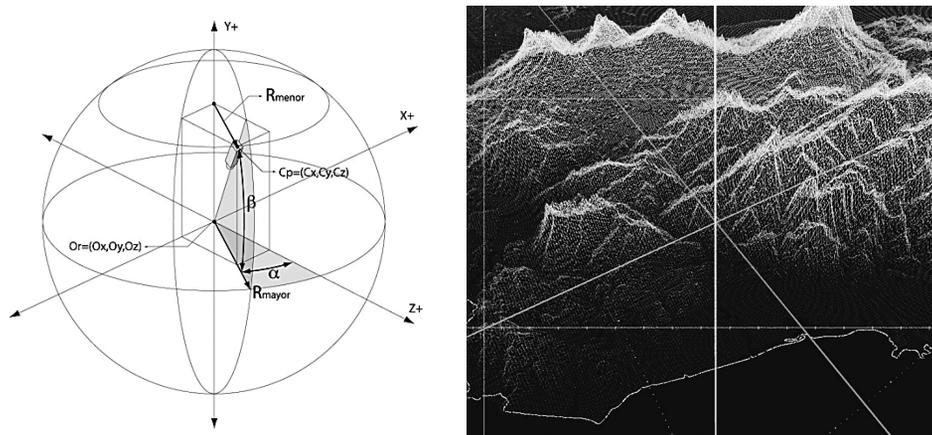


Figura 5. Variables involucradas en los movimientos de la cámara y su resultado

Lugares de referencia

También es posible visualizar lugares de referencia (figura 6), los cuales se pueden alimentar con un simple archivo “csv”, donde se adjuntan, además del nombre del lugar, sus coordenadas en latitud y longitud. De este modo todo el sistema se visualiza con relación a las latitudes y longitudes de Costa Rica.

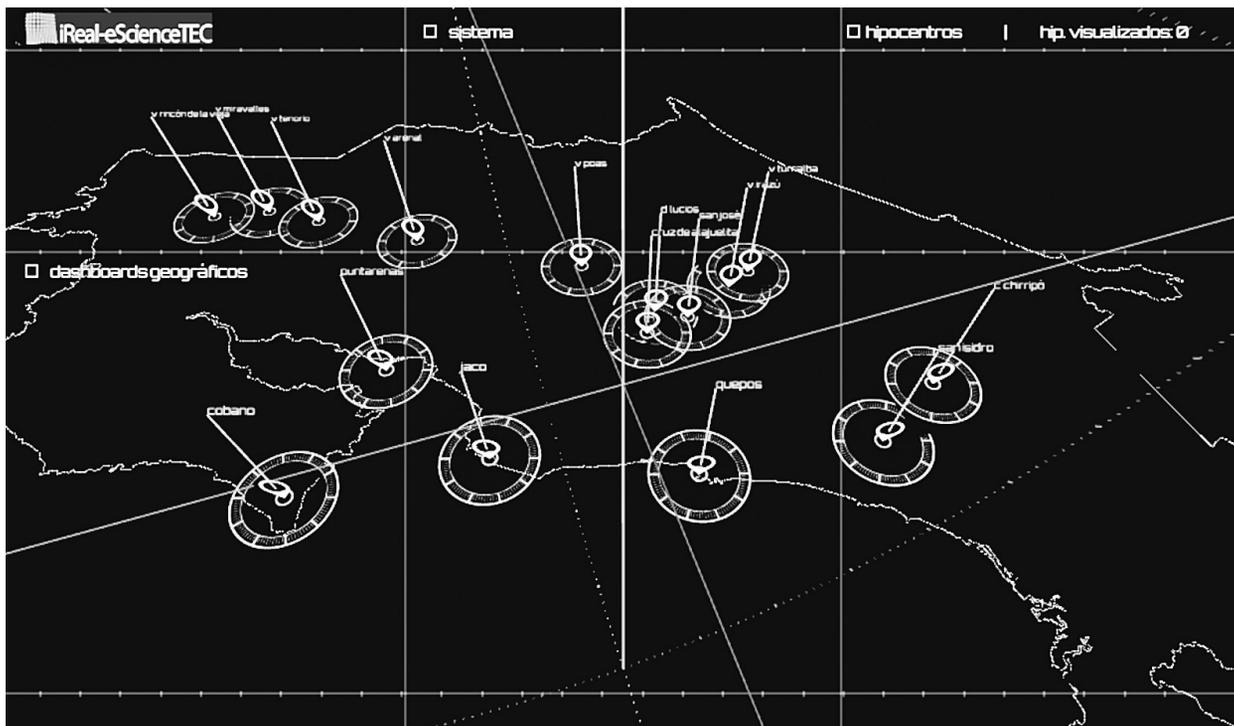


Figura 6. Visualización de lugares de referencia definidos por su latitud y longitud

Resoluciones y eficiencia

Debido a que el sistema debe ser escalable y a que los datos fácilmente llevan al procesador (y su tarjeta gráfica) al máximo de sus capacidades, incluye un *dashboard* (figura 7) para mostrar la cantidad de *frames per seconds* (ftp) en cada momento. Además, es posible cambiar la cantidad de puntos desplegados, o resolución en que se despliega la geografía, para poder ajustarla a la capacidad del equipo en cada momento.

Conclusiones y trabajo futuro

El sistema fue implementado de modo escalable y georreferenciado, para visualizar otros datos en función de su longitud y latitud, sin necesidad de hacerle ningún cambio. Es una plataforma estable para continuar con los proyectos siguientes, que son la visualización de los hipocentros de terremotos en dos décadas y del movimiento de la península de Nicoya producido por el terremoto de septiembre del 2012.

Para el futuro, se debe continuar tratando de incrementar la eficiencia. En este momento, con una computadora personal, solo es posible visualizar hasta un millón de puntos a la vez. Para algunas aplicaciones esto puede resultar poco. Con el fin de lograrlo, se pretende hacer pruebas en C++, que en aplicaciones preliminares ha mostrado un mejor desempeño. La otra posibilidad es implementar una versión del sistema en la nueva máquina de juegos de Apple, "METAL", que promete ser más rápida porque se salta la capa de OpenGL y trabaja directamente con el procesador gráfico.

Este modelo, además, servirá en el futuro para visualizar otra data, como velocidades y direcciones de vientos, precipitaciones y datos meteorológicos.

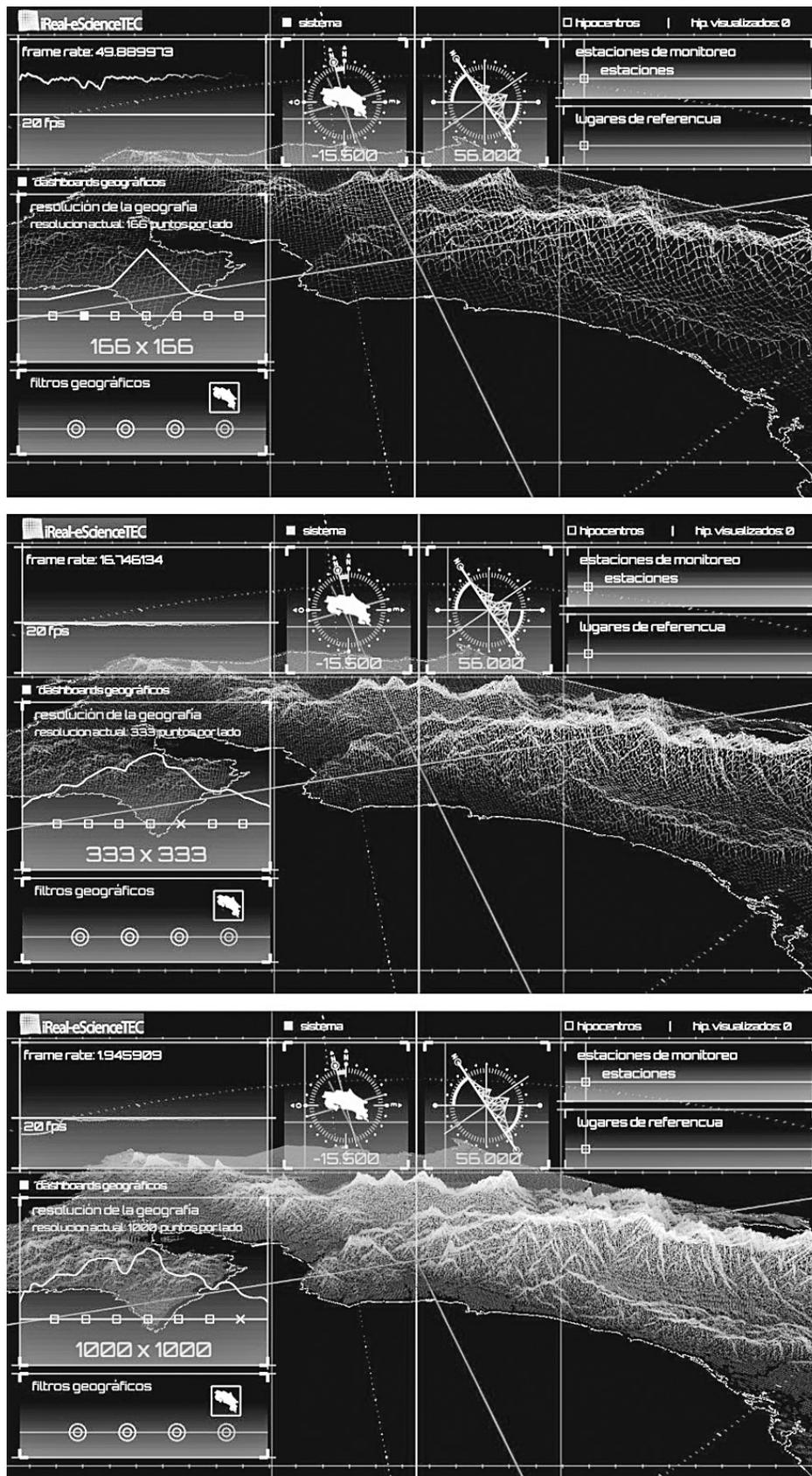


Figura 7. Visualización que muestra los dashboards usados para cambiar la resolución y controlar la eficiencia del sistema

Bibliografía

- CeNAT (Centro Nacional de Alta Tecnología), Costa Rica. Disponible http://www.cenat.ac.cr/index.php?option=com_content&view=article&id=76&Itemid=112
- Cox, K.; Eick, S. & He, T. (1996). 3D Geographic Network Displays. *ACM SIGMOD*, 24(4), pp. 50-54.
- Fairchild, K. M.; Poltrock, S. E., & Furnas, G. W. (1999). SemNet: three-dimensional graphic representations of large knowledge bases. *Readings in information visualization: using vision to think*.
- Fritsch, D., & Kada, M. (2004). Visualisation using game engines. *Archiwum ISPRS*, 35, B5.
- Gallerini, G., & Donatis, D. (2007). Three-Dimensional GIS Geostatistical Analysis for the Stratigraphic Reconstruction of the Foglia River Aquifer (Pesaro, Italy).
- Hernández-Castro, F.; Mata-Montero, E., & Monge-Fallas, J. (2009). Biovisualizador: Visualizando los anfibios de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 22(1), 15-23.
- Hernández-Castro, F., & Monge-Fallas, J. (2017) Eficiencia comparativa en animaciones en javascript. *Tecnología en marcha*, 30(2).
- Kwan, M. P. (2000). Interactive geovisualization of activity-travel patterns using three-dimensional geographical information systems: a methodological exploration with a large data set. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 8(1), 185-203.
- Mat, R. C.; Shariff, A. R. M.; Zulkifli, A. N.; Rahim, M. S. M., & Mahayudin, M. H. (2014). Using game engine for 3D terrain visualisation of GIS data: A review. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 20, N. 1, p. 012037). IOP Publishing.
- Ortiz, E., & Soto, C. (2008). Atlas Digital de Costa Rica 2008. *Cartago, Costa Rica*: Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Reid, M. E.; Christian, S. B.; Brien, D. L., & Henderson, S. T. (2015). Scoops3D: software to analyze 3D slope stability throughout a digital landscape (N. 14-A1). US Geological Survey.
- SNIT(Sistema Nacional de Información Territorial), Costa Rica. Disponible <http://www.snitcr.go.cr>
- Theng, Y. L. (1999, January). "Lost in hyperspace" problem revisited and framework for building digital libraries. In *COLLOQUIUM DIGEST-IEE* (pp. 1-1). IEE.
- Wilhelm, S.; Mailhiot, J.; Arany, J.; Chardine, J.; Robertson, G. & Ryan, P. (2015). Update and trends of three important seabird populations in the western North Atlantic using a geographic information system approach. *Marine Ornithology*, 43, pp. 211-222.

Medición automática del metano en biogás, por columnas de desplazamiento

Automatic measurement methane by displacement columns

Nicolás Vaquerano-Pineda¹, Teresa Salazar-Rojas²,
María Porrás-Acosta³

Fecha de recepción: 15 de junio de 2016

Fecha de aprobación: 30 de agosto de 2016

Vaquerano-Pineda, N; Salazar-Rojas, T; Porrás-Acosta, M.
Medición automática del metano en biogás, por columnas de desplazamiento. *Tecnología en Marcha*. Encuentro de Investigación y Extensión 2016. Pág. 86-96.

DOI: 10.18845/tm.v29i8.2988

-
- 1 Escuela de Ingeniería Electromecánica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: nvaquerano@itcr.ac.cr
 - 2 Escuela de Ingeniería Electromecánica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: tsalazar@itcr.ac.cr
 - 3 Escuela de Química. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: mporras@itcr.ac.cr



Palabras clave

Impedancias; columnas de desplazamiento; flujo; biogás; microfugas.

Resumen

Aquí se describe un sistema automático implementado mediante el controlador LOGO de Siemens, para la medición de volumen, flujo y concentración de metano en biogás, producto de sustratos celulósicos. La determinación de la composición del biogás por cromatografía es un método que consume tiempo, recursos y detalla innecesariamente un amplio espectro de elementos. Debido al interés por el metano en biogás, se ha desarrollado una técnica por columnas de desplazamiento para la determinación de volumen y flujo de muy bajo caudal. Se implementa un procedimiento indirecto para estimar la presencia de metano en altas proporciones mediante sensores de bajo costo, ideados para concentraciones del 1% en volumen.

Keywords

Impedance; displacement columns; flow; biogas; leaks.

Abstract

It describes an automatic process implemented through the use of the Siemens LOGO controller for measuring volume, flow and methane concentration in biogas produced by cellulosic substrates. It determines the composition of biogas without the time consuming and unnecessarily detailed chromatography method. Due to the interest in methane in biogas, a technique has been developed by means of displacement columns for determining volume and low flow. An indirect procedure has been implemented to estimate high proportions of methane, using inexpensive sensors designed for concentrations of 1% in volume.

Introducción

la producción de biogás en reactores depende del tipo de sustrato, la temperatura y acidez, condiciones que determinan la actividad metanogénica. También es relevante la medición de las variables de operación para controlar y proveer un ambiente adecuado en un proceso de fermentación o digestión (Salazar-Rojas y Porrás-Acosta, 2014). Este proceso biológico produce una mezcla de gases compuestos principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), pero se tienen trazas de ácido sulfhídrico (SH_2), nitrógeno e hidrógeno (Farret & Simoes, 2006). De este conjunto, solo el metano adquiere interés como combustible debido a su alta proporción y potencial calórico; la reacción de metano con oxígeno es altamente exotérmica (Masterton, Slowinsky & Stanitski, 1991), comparable con la de combustibles fósiles, de aquí el aprovechamiento frecuente de algunos subproductos agropecuarios para la producción de este gas (Carta, Calero, Colmenar & Castro, 2009; Mihic, 2004).

Los equipos para medición de flujo comerciales son calibrados para gases específicos con densidades constantes; pero la composición altamente variable del biogás no los hace útiles. Además los rangos de medición comerciales son muy superiores a los requeridos en este desarrollo, debido a las dimensiones reducidas de los biorreactores empleados en este análisis. Por esta razón, se ha desarrollado una técnica que emplea columnas de desplazamiento para determinar el volumen y el flujo de bajo caudal (Parajuli, 2011). Mediante esta, se procura

estimar automáticamente la producción de metano con una técnica de bajo costo, que excluye análisis por cromatografía. El empleo de sensores electrónicos para gases específicos es un método conocido, pero se limita a unos cuantos dispositivos debido a las altas concentraciones de metano, que sobrepasan en varios órdenes los rangos de medición para los que fueron diseñados en estos dispositivos. Para adaptar estos elementos a las características del biogás, se presenta una técnica de disolución automática y lectura de impedancias; los datos resultantes se exponen.

Procedimientos

Medición de volumen

La inoculación de un sustrato apropiado produce después de varias horas un burbujeo de biogás del orden de mililitros por hora (mL/h). Es un microflujo de magnitudes imperceptibles para los medidores comerciales; por ello se emplea un procedimiento indirecto mediante columnas de desplazamiento especiales. Debido al interés en metano propiamente, el dióxido de carbono disuelto es separado antes de ejecutar la medición; cualquier otro gas presente corresponderá a trazas proporcionalmente insignificantes. Este proceso de selección es implementado mediante una trampa de CO_2 , solución acuosa de hidróxido de sodio. El biogás producido es filtrado y llevado posteriormente a una columna de desplazamiento para determinar solo volumen. Inicialmente la altura Δh es cero, pero esta aumenta conforme el metano escapa de la trampa. El proceso anterior es descrito en la figura 1.

La presión interna del sistema está directamente asociada al peso de la columna h . El volumen de CH_4 se determina con exactitud conociendo el volumen de esa columna; sin embargo, existen ciertos factores que afectan esta medición:

- Tras la disolución inicial del biogás en medio acuoso, se presentan desviaciones importantes en las lecturas. La solubilidad del metano en agua ronda los 3,3 gramos por cada 100 ml de agua a 20°C , por lo que 500 ml como medio para medición implican 16,5 gramos en disolución, es decir, cerca de 10 ml de metano (0,6 g/ml) en las primeras horas.

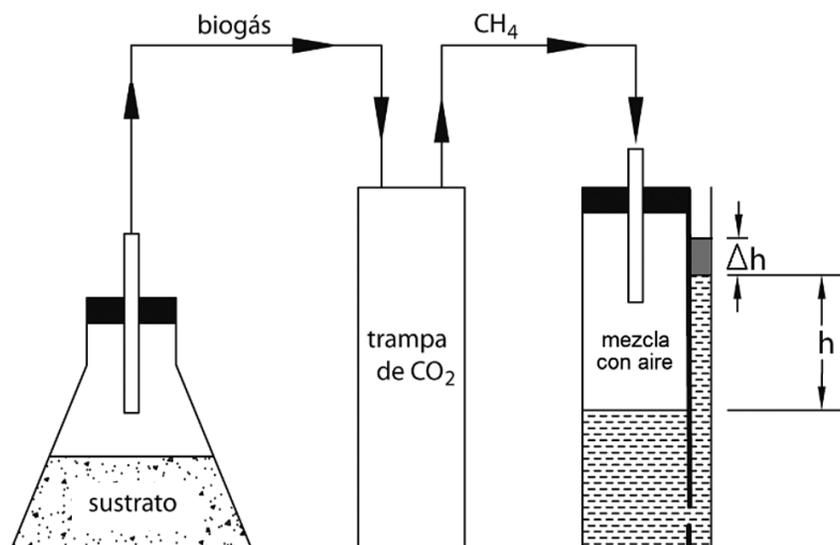


Figura 1. Esquema general para medición de volumen

- La presión atmosférica local afecta la altura h . Este desplazamiento confina el gas, pero expone al medio ambiente la solución acuosa a través de una pequeña sección transversal. Al igual que el barómetro de Torricelli, el aumento de la presión atmosférica implica una desviación Δh que puede interpretarse erróneamente como disminución del volumen desplazado.
- Las microfugas en sellos y tuberías hacen de esta técnica un sistema delicado, ya que la simple presencia de estas produce pérdidas sensibles que imposibilitan la medición de volumen. En sistemas comunes, inyectar aire a presión facilita la detección de fugas, pero es una herramienta limitada, ya que el tamaño de la molécula de metano es comparativamente más pequeño y propensa a escapar cuando el sistema entra en operación.
- La porosidad de muchos plásticos utilizados en sellos y uniones entre las distintas partes del sistema degrada el desempeño de esta técnica. Detectar burbujeos con agua jabonosa es un procedimiento inútil por el reducido caudal visible; por ello se inyectó gas helio (fácil disponibilidad y suficientemente liviano) para delatar cualquier microfuga. El empleo directo de metano no es práctico debido a su reducida disponibilidad.

Medición del flujo y concentración

Eliminando los factores anteriores, el flujo de metano en un lapso de tiempo fue estimado cada vez que la columna Δh de la figura 1 alcanzaba la altura determinada. El sensor de nivel para líquidos modelo *Electtrosonda Z11* (Mac 3) establecía ese umbral y su señal era procesada por el sistema de control. Se dispuso una electroválvula que igualaba la presión interna de la columna con el exterior de ese modo, la variable Δh retornaba a cero nuevamente. Una vez liberado el gas mediante esta electroválvula, el sistema estuvo listo para sucesivas mediciones. El conteo y el tiempo transcurrido serían los únicos dos parámetros que intervendrían.

Los dispositivos electrónicos para medición de la concentración de metano hacen uso de diversas técnicas (X. Liu, Cheng, H. Liu, Hu, Zhang & Ning, 2012). Estas incluyen variaciones en semiconductores de óxidos metálicos (MOS) (S. Kanan, El-Kadri, Abu-Yousef & M. C. Kanan, 2009) como los sensores de este trabajo, empleo de polímeros y nanotubos de carbono (Wongshoosuk, Wisitsoraat, Phokharatkul, Tuantranont & Kerdcharoen, 2010), sustratos con propiedades de absorción específicas a ciertas frecuencias (RF), electroscopia en las bandas del infrarrojo (Rubio et al., 2007), calorimetría por *pellistores* (Zheng, 2008), cambios acústicos y extendidamente, la cromatografía.

Independientemente de su tipo, los sensores ideales para CH_4 en el rango de 100% en volumen son dispositivos con respuesta lineal y realmente onerosos (<http://www.dynament.com/infrared-sensors/methane/methane-gas-sensors.php>), del orden de 100 veces los utilizados en este desarrollo. Se empleó el modelo de bajo costo TGS-2611-C00 del fabricante FIGARO (tipo MOS), optimizado para concentraciones máximas del 1% en volumen (10 000 ppm). Este presenta cambios en su impedancia R_s según la concentración de metano (figura 2). Esta variación es comparada con el valor inicial (R_s/R_o) para determinar el porcentaje de metano presente en el medio. Este dispositivo posee también respuesta a carburantes como el etanol y el isobutano, ausentes en el biogás.

La medición del cambio de R_s se logra indirectamente al analizar la tensión en un divisor de voltaje, como en la figura 3. Es una relación inversamente proporcional con respecto a R_s , y por lo tanto, el voltaje aumenta conforme se incrementa la concentración (disminuye R_s).

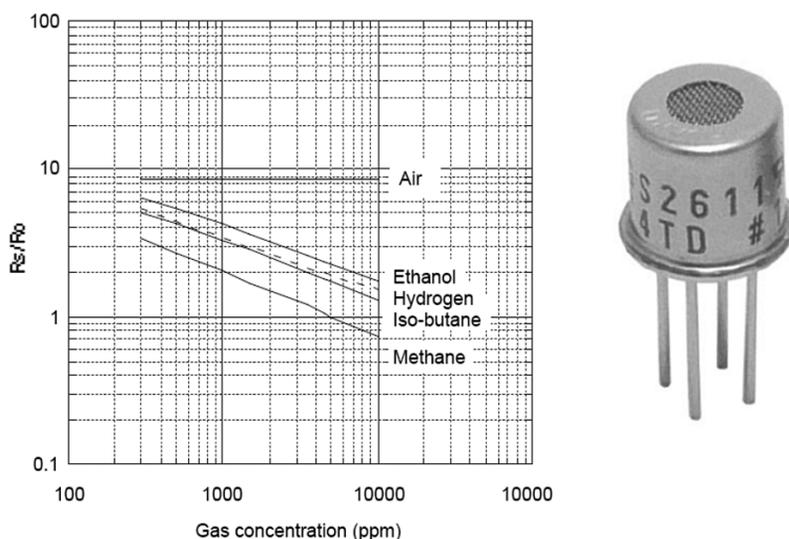
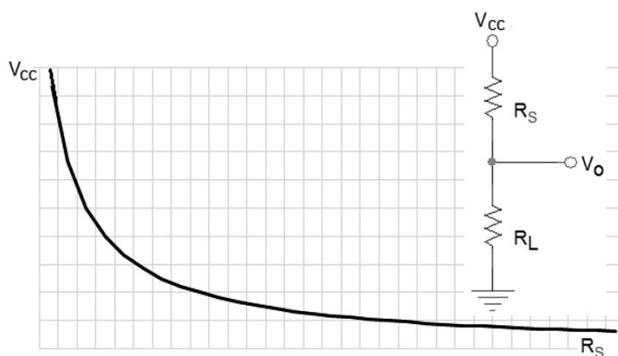


Figura 2. Respuesta del sensor FIGARO TGS-2611-C00

Se introdujeron en el medio dos sensores iguales, en una muestra carente de metano. Las tensiones obtenidas se amplificaron y filtraron apropiadamente para ser leídas por las entradas de un controlador LOGO de Siemens. El promedio de estas lecturas permitió definir una desviación en la electrónica de los dispositivos cuya corrección permitió establecer los valores iniciales. Al otro extremo, para definir el patrón de concentraciones del 100% en volumen, se tomó la lectura de tres sensores pero en muestras con gas metano de 10 000 ppm. Las tensiones de salida se acondicionaron de la misma forma anterior para obtener el promedio de las tres lecturas.

La descripción anterior corresponde al procedimiento para determinar la concentración de una sola muestra; en la figura 4 se define el mecanismo físico de medición. La primera columna determina el volumen de metano que ingresa, y posteriormente se libera controladamente una parte a la segunda sección. Ahí se lleva a cabo la disolución con aire para normalizar la muestra final con respecto a 10 000 ppm y pasar finalmente a la cámara de análisis. Cada uno de los sensores empleados está acondicionado para amplificar y filtrar sus respectivas salidas.



$$V_0 = \frac{R_L}{R_L + R_S}$$

Figura 3. Relación de tensión V_0 en función de la impedancia interna

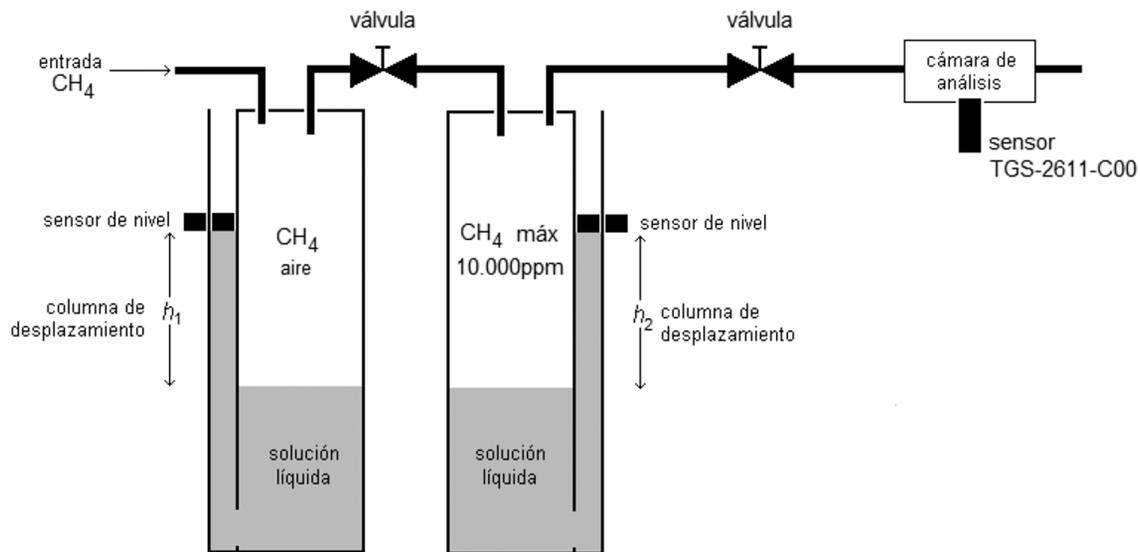


Figura 4. Esquema de dos columnas para el proceso de medición

Si en la primera columna de desplazamiento ingresaran 10 ml de metano puro en 490 ml de aire; la concentración interna de CH₄ sería del 20%. En la segunda medición de h_1 ya existiría un porcentaje previo que modificaría la concentración final en esa columna. El aumento sería sucesivo hasta tender a la misma concentración de entrada al cabo de varias lecturas. Esto rebasaría fácilmente los límites de medición del TGS-2611-C00, por su tope de 10 000 ppm. Sin embargo, esa nueva variable en la concentración, conforme se procesaran mediciones, incorporaría un error creciente en cada lectura.

Este sistema mecánico se adecuó para mediciones sucesivas insertando un paso intermedio antes de la segunda medición: inyección de aire a presión justo después de haber liberado el gas en ambas columnas, garantizando un medio limpio cada vez que ingrese una nueva muestra.

La segunda columna de desplazamiento tiene como objetivo disolver apropiadamente una fracción de la muestra tomada del primer reservorio para ser medida en la cámara de análisis. De este modo se logra que la proporción sea siempre menor o igual al 1% (10 000ppm) en la segunda columna. Se extrae una muestra de la mezcla metano-aire contenida en la primera columna para disolverla en un volumen controlado: 1 mL de la mezcla inicial se disuelve en 99 mL de aire. La columna h_2 tiene la función de medir cuánto volumen ingresa desde el primer reservorio y así garantizar la relación de volúmenes apropiada. El gas contenido en la segunda recámara ya posee la proporción adecuada (no mayor al 1%) para el TGS-2611-C00. Cada vez que se determina la concentración en la cámara de lectura, se inyecta aire para normalizar las concentraciones del medio.

Resultados

Medición de volumen

La medición de volumen fue desarrollada para la producción de biogás en muestras contenidas en kitsatos. Inicialmente no fue posible tomar lecturas de volumen a pesar de una evidente actividad metanogénica debido a dos factores: microfugas y presión. El primero estaba asociado a la calidad de los acoples y sellos en las electroválvulas, ya

que estas últimas deben ser expresamente fabricadas para gases volátiles. A pesar de haber minimizado los problemas en los sellos, este tipo de conexiones introducía errores importantes, ya que el volumen desplazado por estas fugas (V_{fugas}) es comparable a la misma producción ($V_{entrada}$).

$$\frac{V_{entrada}}{V_{fugas}} \approx 1 \quad (1) \text{ (Farret \& Simoes, 2006)}$$

El segundo factor que introducía errores en la medición del volumen era ocasionado por el mismo peso de la columna de agua desplazada. El incremento de Δh aumenta la presión interna y hace más evidentes los escapes de metano en esta sección. Se pudo observar que confinando momentáneamente el biogás dentro del reactor y liberando su contenido en forma brusca, se minimizaban los efectos de fugas, ya que el flujo de entrada era muy superior a estos escapes.

$$\frac{V_{entrada}}{V_{fugas}} \gg 1 \quad (2) \text{ (Carta et al., 2009)}$$

Muestras cercanas a 200 gramos de sustrato no lograban elevar 500 ml de agua porque en ese punto las microfugas F eran evidentes. Es obvio que la presión interna del kitasato conteniendo la muestra aumentaba junto con la altura de la columna. La razón es que el peso del agua y su presión no detienen la actividad metanogénica propiamente, sino que las potenciales microfugas (F) tienen un peso mayor y su efecto es más evidente bajo estas condiciones de presión, a tal punto que se cumple la ecuación [1] (Farret & Simoes, 2006).

Medición de flujo y concentración

La lectura de concentración presentó diferencias importantes con respecto a lo esperado. Suponiendo que existían trampas adecuadas de CO_2 , la proporción de gas dada por los sensores distaba de las lecturas esperadas. La electrónica de los sensores fue calibrada para reflejar concentraciones del 100% cuando se tenían 10 000 ppm de CH_4 en la segunda columna. En mediciones sucesivas y después de diluir la mezcla inicial, el sistema arrojó datos con tendencias a la baja, que rondaban entre el 40% y el 35% aproximadamente (ver figura 5). Se explica este comportamiento con la estabilización térmica de los sensores, la cual se debe comprobar antes de cualquier proceso de lectura como consecuencia de la temperatura en filamento interno.

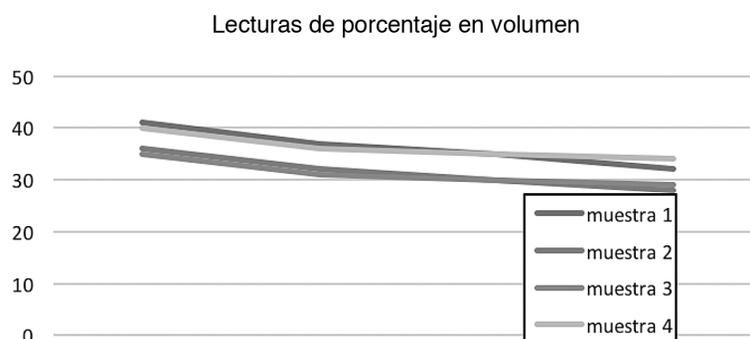


Figura 5. Lecturas sucesivas de varias muestras de 10 000 ppm

Se observó también una baja estabilidad de los sensores durante la medición. Diferencias de lectura se asociaron al empleo de estos dispositivos en el medio, probablemente por saturación del sustrato semiconductor bajo concentraciones permanentemente altas. Debido a este comportamiento, la cámara de análisis retenía la muestra solo en los momentos necesarios, después de los cuales la liberaba al medio ambiente. La medición fue repetida en varias ocasiones, en las que mostró tendencias similares.

Analizando el sistema implementado, en el que se diluye la muestra en aire para reducir la concentración máxima a 10 000ppm, se detectó que este procedimiento es poco exacto, ya que se introducen cantidades importantes de aire en la muestra y obligando a cambios del orden de 100:1 en proporción de volumen. Se presentaron otros errores al obviar el contenido de gas a lo largo de las mangueras, variable que tiene un efecto permanente en cada muestra.

La evaluación de la calidad del medidor construido se realizó mediante la medición del volumen de metano, conociendo el desplazamiento h en la columna, que a su vez está directamente relacionado con la presión interna. En este sentido existen tres factores identificados que podrían haber afectado la medición de volumen.

- El primero está relacionado con el mismo líquido dentro de la columna, el cual es en sí mismo un vehículo para la disolución del gas, que se manifestaba como errores presentes solo en la primera lectura, como se mencionó anteriormente.
- El segundo fue la presencia de microfugas en sellos y tuberías, que en las primeras etapas imposibilitó la medición confiable de volumen. El empleo de válvulas optimizadas para gas fue obligatorio, ya que las fabricadas para agua y aire por sí mismas permitían escapes de metano, convirtiendo estos elementos en problemas de naturaleza mecánica. En este mismo sentido, la porosidad de plásticos utilizados en sellos y uniones también degradó la confiabilidad de este procedimiento hasta que fue solucionada. La inyección de aire a presión no facilitó la detección de estas microfugas, ya que el tamaño de la molécula de metano es comparativamente pequeño, por lo que este gas es propenso a escapes por donde el aire no lo hace. Esto es evidente cuando el sistema entra en operación debido a que los flujos de entrada que emanan de los sustratos son bajos. Mediciones sucesivas fueron confiables solo cuando se descartaron fugas como las descritas.
- El tercero fue la presión atmosférica, única variable que afectó directamente la exactitud del equipo. En función de esta, la presión interna de metano requerida para alcanzar la altura h variaba ligeramente sin posibilidad de control externo. Al igual que el barómetro de Torricelli, el aumento de la presión atmosférica se manifestaba como una desviación Δh (figura 1) cercana a ± 5 mm, según lo observado. Como la sección transversal de la columna ronda los $0,8 \text{ cm}^2$, la desviación de volumen ΔV equivale a $\pm 0,4 \text{ cm}^3$ para cualquier medición. La validación se realizó inyectando aire a presión hasta que el sensor de nivel detectara el nivel apropiado de la columna h . Este punto fue calibrado cuidadosamente mediante la cantidad inicial de agua en el reservorio de la columna; se definieron así mediciones de $300 \pm 10 \text{ mL}$ para cada ocasión, por la escala de la probeta. A esta desviación se añadió la incertidumbre asociada a la presión atmosférica de $\pm 0,4 \text{ ml}$ y se obtuvo así un total de $\pm 10,4 \text{ ml}$ por medición.

Cuando el nivel en la columna alcanzaba el electrodo del sensor de nivel, el control enviaba la señal de apertura a la válvula de escape, igualando presiones y liberando el gas contenido, para una segunda medición. Repitiendo este proceso en seis ocasiones para tiempos diferentes, se obtuvo el detalle del volumen desplazado con un error propagado en el último dato (figura 6).

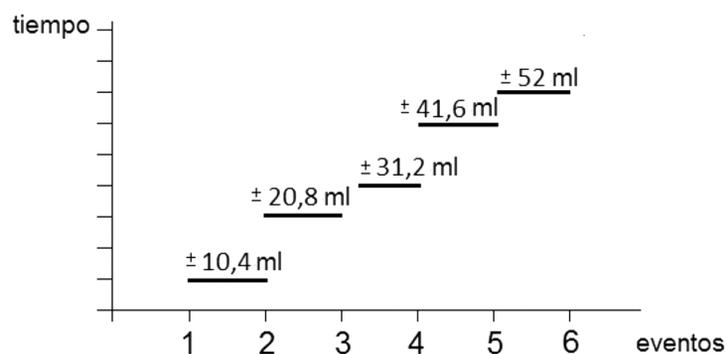


Figura 6. Incertidumbre en la medición de volumen

Debido a que el tiempo entre eventos fue realmente variable (determinado por la cantidad de biogás producido), y además teniendo valores discretos múltiplos $300 \pm 10,4$ ml, se desplegaron en la pantalla el volumen en múltiplos de 0,3 L únicamente y el tiempo transcurrido en horas (bloque B042 de la figura 8). Esta desviación en la lectura de volumen se considera constante, por lo que reduciendo el volumen base desplazado (en este caso 300 ml) se incrementa el error. Aumentando la base se reduce la incertidumbre, pero aumenta el peso de la columna de agua y se somete el sustrato a sobrepresión.

La implementación física del dispositivo se muestra en la figura 7. En ella se observan distintas partes como las columnas para medición de volumen y disolución de la muestra (identificadas por el n.º 1 y el n.º 2). El controlador, los sensores de metano, la cámara de análisis y el sensor de nivel están contenidos en la caja plástica identificada por el n.º 3. La segunda columna de desplazamiento descrita está identificada por el n.º 4. La primera electroválvula, que permite el paso de gas de la primera columna a la segunda, está identificada por el n.º 5.

La coordinación, los cálculos internos y el despliegue de la información fueron implementados mediante el controlador LOGO de SIEMENS, modelo 6ED1052-1MD00-0BA6. Este dispositivo recibe la entrada analógica proveniente de los sensores para metano (AI2 y AI4) y del sensor de nivel (I3); esta última entrada maneja el contador de descargas. Las múltiples salidas de este dispositivo son las siguientes:

- Q1: Apertura y cierre de la válvula hacia la cámara de análisis
- Q2: Apertura y cierre de la válvula externa para igualar presiones
- Q3: Activación de bomba de aire para limpieza de cámaras
- Q4: Alimentación de los sensores

La lógica de coordinación y manejo de señales de las variables involucradas es representada mediante la figura 8.

Como se observa, la señal de los sensores que indican el porcentaje de metano se acondiciona desde la entrada mediante los bloques B03 y B04. Estos dispositivos son alimentados mediante el bloque B049 únicamente cuando se requiere su lectura, pero se someten antes a un período de calentamiento.

Conclusiones

El empleo de las trampas de CO_2 garantiza la presencia de metano durante el proceso de medición, pero elimina información útil como la proporción del biogás según el tipo de sustrato.

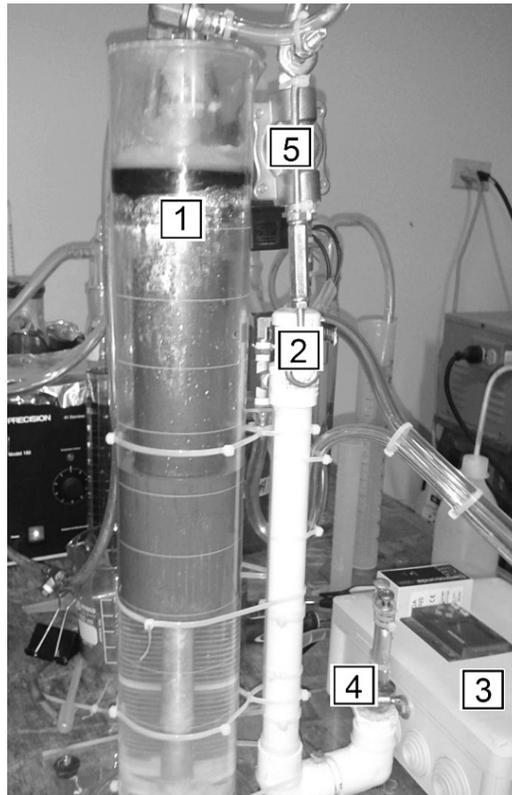


Figura 7. Prototipo del sistema de medición

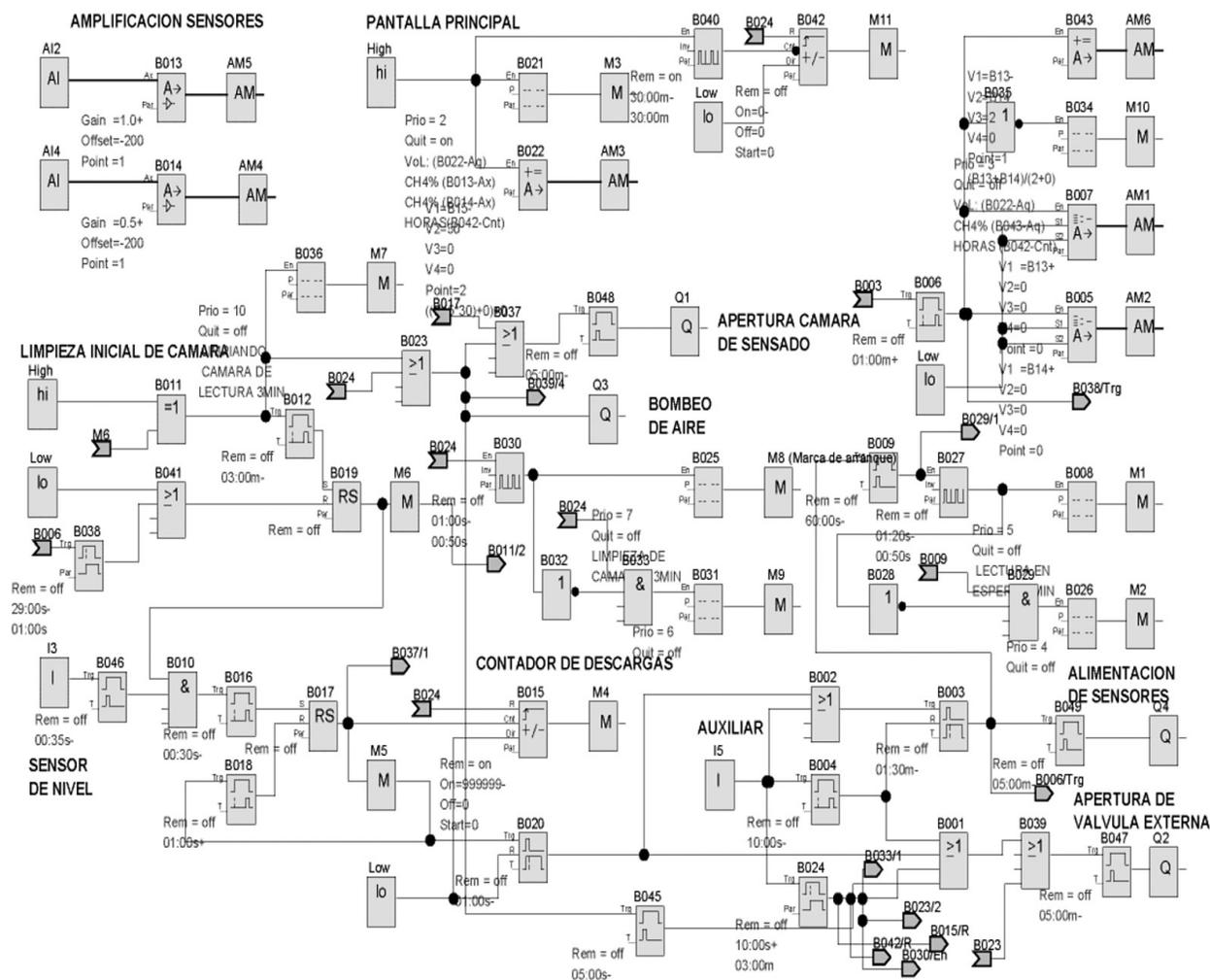
En un segundo proyecto se dispondrá también de sensores de CO₂ específicos para determinar con más detalle la proporción del biogás producido.

Es factible escalar este diseño para la medición de otros gases cuyo flujo sean del orden de mL/h. Existen sensores del mismo tipo con respuesta a alcohol, amoníaco, butano, hidrógeno, oxígeno, propano y monóxido de carbono principalmente, que pueden ser empleados para otro tipo de análisis que no requiera cromatografía.

La utilización de sensores de 10 000 ppm permitió el ajuste a la complejidad de los mecanismos y su debida sincronización. Conviene el uso de dispositivos dentro del rango apropiado y con respuesta lineal a pesar de un incremento en los costos del diseño. El método de columnas de desplazamiento es adecuado para caudales del orden de mL/h siempre y cuando no existan fugas de gas en los acoples y sellos. Esta condición es de especial atención debido al bajo caudal desarrollado en los biorreactores analizados.

Bibliografía

- Carta González, J. A.; Calero Pérez, R.; Colmenar Santos, A.; Castro Gil, M. A. (2009). *Centrales de energía renovables: generación eléctrica con energías renovables* (capítulo 10, p. 491). Madrid: Pearson Prentice Hall .
- Farret, F. A., & Simoes, M. G. (2006). *Integration of alternative sources of energy*. Wiley-Interscience.
- Kanan, S. M.; El-Kadri, O. M.; Abu-Yousef, I. A., & Kanan, M. C. (2009). *Semiconducting metal oxide based sensors for selective gas pollutant detection*. *Sensors*, 9(10), 8158-8196.
- Liu, X.; Cheng, S.; Liu, H.; Hu, S.; Zhang, D., & Ning, H. (2012). *A survey on gas sensing technology*. *Sensors*, 12(7), 9635-9665.



Cronograma 2016

	Vol. 29-1	Vol. 29-2	Vol. 29-3	Vol. 29-4	Vol. 30-1	Vol. 30-2	Vol. 30-3
Recepción de artículos	Mayo - julio 2015	Agosto - octubre 2015	Noviembre 2015 - enero 2016	Febrero - abril 2016	Mayo - julio 2016	Agosto - octubre 2016	Noviembre 2016 - enero 2017
Evaluación de expertos y aprobación	Agosto - setiembre 2015	Noviembre - diciembre 2015	Febrero - marzo 2016	Mayo - Junio 2016	Agosto - setiembre 2016	Noviembre - diciembre 2016	Febrero - marzo 2017
Revisión de estilo y corrección	Octubre 2015	Febrero 2016	Abril 2016	Julio 2016	Octubre 2016	Enero 2017	Abril 2017
Diagramación y correcciones finales	Enero 2016	Marzo 2016	Mayo - junio 2016	Agosto - setiembre 2016	Noviembre - diciembre 2016	Febrero - marzo 2017	Mayo - junio 2017
Publicación del número	Febrero 2016	Mayo 2016	Julio 2016	Octubre 2016	Febrero 2017	Abril 2017	Julio 2017

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.

1. Los artículos deberán ser originales, inéditos y no pueden participar simultáneamente en otros procesos de publicación.
2. La extensión de los trabajos debe oscilar entre 10 y 20 páginas de 21,59 x 27.94 cm (8,5 x 11 pulgadas). Se debe presentar en un documento de Microsoft Word, con interlínea de espacio y medio, en una columna, en letra Times 12 pts.
3. Los títulos de los artículos deben ser sencillos, claros, cortos y estar en español e inglés.
4. Es necesario indicar claramente el nombre y los dos apellidos del autor, nacionalidad, profesión, teléfonos, correo electrónico, dirección exacta, lugar de trabajo y país de origen de dicha entidad.
5. Las palabras clave deben presentarse en español y en inglés. Además, el resumen debe estar compuesto por 250 palabras y aparecer en ambos idiomas.
6. Las imágenes se deben enviar en un archivo aparte del documento principal. En caso de ser escaneadas, la resolución mínima es de 300 ppi. Los formatos permitidos son: .jpg, .tiff, .eps, .psd y .ai.
7. Las fórmulas y ecuaciones matemáticas deben realizarse con el editor de ecuaciones de Word.
8. En lo pertinente, se usará el Sistema Internacional de Unidades.
9. La bibliografía debe aparecer al final del documento, ordenada según su aparición en el documento y utilizar el formato IEEE.
10. Los documentos deberán enviarse a las direcciones electrónicas editorial@itcr.ac.cr o alramirez@itcr.ac.cr
11. La Comisión editorial no dará trámite de edición al artículo que no cumpla con estos requisitos.

Nota importante

Los originales serán sometidos a un proceso editorial que se desarrollará en varias fases. En primer lugar, serán objeto de una evaluación preliminar por parte de los miembros del Comité Editorial, quienes determinarán la pertinencia de su publicación. Una vez establecido que cumple con los requisitos temáticos y formales indicados en estas instrucciones, será enviado a dos pares académicos externos para decidir en forma anónima (doble ciego) si debe publicarse, si necesita cambios o si se rechaza. En caso de que ambos llegaran a discrepar, el artículo será enviado a un tercer evaluador, para tomar la decisión. Los resultados del dictamen académico serán inapelables en todos los casos. En caso de que el artículo sea aprobado para su publicación, el autor autoriza a la Editorial Tecnológica de Costa Rica para que lo incluya en la revista y pueda editarlo, reproducirlo, distribuirlo, exhibirlo y comunicarlo en el país y en el extranjero mediante medios impresos y electrónicos bajo la licencia *Creative Commons*.

Instructions to publish in **TECNOLOGÍA** *en marcha*

The journal *Tecnología en Marcha* is published by the Editorial Tecnológica de Costa Rica every three months. It focuses mainly in disseminating the results of research of engineering areas. The journal's contents are intended for researchers, experts, teachers and university students around the world.

1. All articles must be originals, unpublished, and cannot be simultaneously used in other processes.
2. Papers may be 10-20 pages long (8.5 x 11 in, or 21.59 x 27.94 cm). All documents must be submitted in MS Word, 1.5 line spacing, using Times 12 pts. font and in one column.
3. Article titles must be simple, clear, short, and be included in both Spanish and English.
4. The name and (two) last names of the author should be clearly indicated, along with their profession, telephone numbers, email, physical address, place of work (organization, department, school), and where the organization is based.
5. The key words must be included in both Spanish and English. Furthermore, the abstract must be 250 words long, and should also be submitted in both languages.
6. The images must be delivered in a separate document. If scanned, the minimum resolution is 300 ppi. The formats allowed are .jpg, .tiff, .eps, .psd, and .ai.
7. Mathematical equations and formulas must be done with MS Office's Equation Editor.
8. Where necessary, use the International System of Units.
9. Bibliography will be included at the end of the document, arranged order based on IEEE format.
10. Papers should be sent to the following emails: editorial@itcr.ac.cr, or alamirez@itcr.ac.cr
11. The Editorial Committee will only consider for publication the articles meeting the above requirements.

Important note

All originals will be subject to an editorial process consisting of several phases. First, a preliminary assessment will be done by members of the Editorial Committee, the Director, and the editors, who will jointly determine whether the article would make a relevant publication. After determining that an article meets the thematic and formal requirements established in these Instructions, it will be sent to two outside academic peers who will decide anonymously (double-blind) whether it should be published, if it needs any changes, or whether it should be turned down. In case of disagreement between these peers, the article will be sent to a third evaluator in order to reach a decision. In no case may the results of this decision be appealed. If the article is accepted for publication, the author authorizes the Editorial Tecnológica de Costa Rica to edit, reproduce, distribute, exhibit and communicate at the country and abroad through print media and electronic equipment under the *Creative Commons* license.

Ya a la venta

Orquídeas y orquideología en América Central

500 años de historia

Carlos Ossenbach Sauter

Adquiéralo también
en su versión electrónica



ebooks.tec.ac.cr

