

Revista trimestral
TECNOLOGÍA
en marcha

ISSN 0379-3982 Vol. 28 N°2 abril – junio 2015

Contenido

Caracterización de tres organizaciones de producción agrícola de la subregión CARAIGRES: Parte 2. Estadísticas descriptivas de los productores Characterization of Three Organizations of Agricultural Production in the Sub-region Carraigres: Part 2. Descriptive Statistics of Producers <i>Edgar Vargas-Jarquín</i>	3
Mediciones y análisis de vibraciones en el puente Virilla, ruta nacional N° 1 Measurements and analysis of vibrations at Virilla Bridge, national route N° 1 <i>Francisco Navarro-Henríquez, Daniel Ureña-Muñoz</i>	16
Diseño e implementación de un sistema de recuperación de la temporización asíncrono totalmente digital Design and implementation of an all-digital timing recovery system for asynchronous communication <i>José Jaime Valenciano-Rojas, Renato Rímolo-Donadio</i>	33
Herramientas de simulación libres y abiertas para el diseño de unidades de procesamiento de potencia para sistemas fotovoltaicos Free and open source simulation tools for the design of power processing units for photovoltaic systems <i>Sergio Morales-Hernández, Carlos Meza-Benavides</i>	44
<i>Brucella abortus</i> : patogénesis y regulación génica de la virulencia <i>Brucella abortus</i> : pathogenicity and gene regulation of virulence <i>Olga Rivas-Solano</i>	61
Un modelo de finca integrada orientada a contribuir a la seguridad alimentaria de comunidades indígenas de Talamanca (Artículo informativo) Integrated Organic Farm; a model aimed at contributing to food security for indigenous communities in Talamanca <i>Ricardo Salazar-Díaz</i>	74

Evaluación de la fertilización inorgánica en el cultivo de yuca en la región norte de Costa Rica

Evaluation of inorganic fertilization in cassava crop in the northern region of Costa Rica
Parménides Furcal-Beriguete, Sergio Torres-Portuguez, Wagner Andrade-Carballo 84

Estudio ecológico sobre insuficiencia renal crónica y arsénico en las aguas para consumo humano por distritos en Guanacaste

Ecological study on chronic kidney disease and arsenic in drinking water in districts of Guanacaste
Darner Mora-Alvarado, Azucena Urbina-Campos, Horacio Chamizo-García..... 102

Aislamiento de una bacteria endófitas de vainilla (*Vanilla planifolia*) con actividad biocontroladora in vitro contra *Fusarium oxysporum* f. sp. *Vanillae*

Isolation of vanilla-endophytic bacteria (*Vanilla planifolia*) with in vitro biocontrol activity against *Fusarium oxysporum* f. sp. *Vanillae*
Karol Jiménez-Quesada, Alexander Schmidt-Durán, Kevin Quesada-Montero, Ileana Moreira-González..... 116

El agua como parte de la cultura de las comunidades rurales: un análisis para la cuenca del río San Carlos

Water as part of the culture of rural communities: an analysis for the San Carlos River basin
Cristian Moreira-Segura, Freddy Araya-Rodríguez, Claudia Charpentier-Esquivel..... 126

Desafíos en la gestión de residuos sólidos para las ciudades de países en desarrollo
Solid waste management challenges for cities in developing countries

Lilliana Abarca-Guerrero, Ger Maas, William Hogland..... 141

Diagnóstico agroecológico de la microcuenca periurbana Río Platanitos, Guatemala

Solid waste management challenges for cities in developing countries

Miguel Ángel Morales-Cayax, Eddi Alejandro Vanegas-Chacón, Francisco Bautista-Zúñiga 169

Caracterización de tres organizaciones de producción agrícola de la subregión CARAIGRES: Parte 2. Estadísticas descriptivas de los productores

Characterization of Three Organizations of Agricultural Production in the Sub-region Carraigres: Part 2. Descriptive Statistics of Producers

Edgardo Vargas Jarquín¹

*Fecha de recepción: 25 de mayo del 2014
Fecha de aprobación: 17 de agosto del 2014*

Vargas-Jarquín, E. Caracterización de tres organizaciones de producción agrícola de la subregión CARAIGRES: Parte 2. Estadísticas descriptivas de los productores. *Tecnología en Marcha*. Vol. 28, N° 2, Abril-Junio. Pág 3-15.

¹ Magister Scientiae en Computación. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional de San Carlos, Carrera de Computación. Teléfono: (506) 8722-9066. Correo electrónico: edvargas@itcr.ac.cr
Colaborador: German Geovanny Sánchez Benavides. Licenciado en Agronomía. Ministerio de Agricultura y Ganadería, Costa Rica. Teléfono: (506) 8442-6582. Correo electrónico: germansabe60@hotmail.com

Palabras clave

Organizaciones agropecuarias; Análisis de Redes Sociales (ARS); relaciones de producción; redes sociales; agrocadenas; subregión Caraigres.

Resumen

Se realizó un estudio para caracterizar a los asociados de tres organizaciones de carácter agropecuario: la Asociación de Productores Agropecuarios de los cantones de Acosta y Aserrí (ASOPROAAA), la Asociación de Familias Orgánicas de los Cerros Caraigres (AFAORCA) y la Asociación de Apicultores de la Región Caraigres (APICARAIGRES), ubicadas en los cantones de Acosta, Aserrí, Desamparados, León Cortés y Corralillo, al sur de San José.

El estudio pretendió caracterizar tanto las cadenas de producción en las que participan los agricultores como a estos últimos. Además, se buscó identificar los diferentes vínculos de los asociados dentro de su organización, haciendo énfasis en las relaciones productivas e identificando las estructuras subyacentes en las relaciones de producción.

La recolección de información se realizó por medio de una encuesta que se aplicó a la totalidad de los miembros de AFAORCA y APICARAIGRES. Sin embargo, en el caso de ASOPROAAA se tomó una muestra, debido al tamaño de esta organización.

Los resultados de las agrocadenas se presentaron en un primer artículo, entretanto, los del análisis de redes se incluyen en la tercera publicación de esta serie. En el presente artículo se incluyen los datos y análisis que permiten caracterizar a los agricultores que conforman estas agrupaciones.

Al considerar los datos de las edades de los productores de las organizaciones estudiadas, se evidencia que las fincas se encuentran en manos de personas de la segunda y tercera edad. Además, no se vislumbra un cambio generacional, ya que los familiares no aportan sus servicios a las actividades de las fincas.

Keywords

Agricultural Organizations; Social Network Analysis (SNA); Production Relations; Social Media; Agro-supply chain; Sub-region Caraigres.

Abstract

A study was performed to characterize the associates of three agricultural organizations.

The organizations studied corresponded to Agricultural Producers Association of the cantons of Acosta and Aserrí (ASOPROAAA), The Association of Organic Families of Caraigres Hills (AFAORCA) and the Association of Beekeepers of the Caraigres Region (APICARAIGRES) all these located in the cantons of Acosta , Aserrí , Desamparados, León Cortés and Corralillo , to the south of San José.

The study aimed to characterize both agricultural production chains and farmers taking part of them.

It was also intended to identify the different links within partners in their organization. It emphasized on the productive relations and the underlying structures in the relations of production.

Data collection was conducted through a survey that was applied to all members of AFAORCA and APICARAIGRES. However, in the case of ASOPROAAA, due to the size of the organization, a sample was selected.

The results of agro supply chains were described in the first article and the network analysis are included in the third issue of this series. Accordingly, in this article the data and analyzes that characterized farmers who make up these groups are included.

When considering the data on the ages of the producers of the studied organizations, it appears that the farms are in the hands of people in the second and third age. In addition, a generational change is in sight, since the family does not provide services to farming activities.

Introducción

Con el propósito de conocer el comportamiento y los beneficios que tienen las organizaciones sobre los productores agrícolas pertenecientes a ellas y sus dinámicas internas, se planteó la posibilidad de realizar un estudio que permitiera evaluar tres características de tres agrupaciones de pequeños agricultores. La primera característica fue el desarrollo de la agrocadena en la que interviene el agricultor y su organización. En segundo lugar, la situación individual de cada agricultor, que debería estar influenciada por su relación con la organización. Por último, se evaluaron las estructuras sociales subyacentes de las organizaciones, que se encuentran más allá de la estructura definida por las reglas formales que las rigen.

Para publicar los resultados de este estudio se elaboró un primer artículo con el fin de exponer los resultados que muestran la caracterización de las agrocadenas. En la segunda parte (que se desarrolla en el presente artículo), se discuten los resultados que permiten caracterizar al agricultor promedio y sus variaciones dentro de cada una de las organizaciones. Por último, se elaborará un tercer artículo con los hallazgos de las estructuras de las redes sociales de las tres empresas.

En Costa Rica, las organizaciones agrícolas de pequeños productores se formalizan desde la creación de los centros agrícolas cantonales, a inicios del siglo XX (Salazar, 1999). Estas se orientaron a mejorar la organización de sus afiliados, así como a apoyar trabajos de experimentación agrícola y a la transferencia de nueva tecnología. Además, asumieron otros proyectos como el de venta de insumos y servicios.

Con el desarrollo de más sistemas, como el cooperativo, se ha logrado hacer frente a los efectos de la desorganización que se da entre los micro, pequeños y medianos productores agropecuarios (MPMPA), sobre todo porque en forma individual no logran tener capacidad de negociación, lo cual lleva a que los precios de sus productos suelen ser bajos.

La agricultura campesina en Costa Rica está conformada en un 70% por pequeños y medianos productores (Barrantes, 2006). Su aporte a la economía nacional tiene un peso considerable, a pesar de que ha sido fuertemente impactada de diversas formas por las políticas de modernización agropecuaria. Dichas políticas se han desarrollado para favorecer situaciones agrícolas alejadas de la realidad del pequeño y mediano productor y han acentuado la marginalidad de la producción campesina.

La sostenibilidad de las economías agrícolas depende no solo del nivel de utilidades generadas, sino también del grado de incorporación de la juventud en sus actividades. Según Samper (2006), como resultado del proceso de deterioro al que han sido sometidos en las últimas dos décadas, las pequeñas y medianas unidades agrícolas no logran incorporar en forma plena a la población joven.

De esta manera, se produce un proceso paulatino de envejecimiento del campesinado, con consecuencias importantes en la construcción de un futuro más próspero. Samper cita, en ese mismo trabajo, un estudio sobre el perfil del pequeño productor agropecuario realizado por el Banco Nacional, en el cual se refiere a la composición por edades de los agricultores. En este sentido, indica que “el 87% lo representan personas mayores a los 35 años, con un 30% de la población en el ámbito de edad adulta mayor a los 50 años y solamente un 4% lo representan personas menores a los 30 años”.

En lo referente al nivel educativo de quienes habitan en la zona rural, según la encuesta nacional de hogares de 2013 (INEC, 2013), al realizar una conversión de los datos aportados de unidades a porcentaje, se obtiene que de la población de 15 años y más, el 17,2% no completó la educación primaria, el 33,5% sí la completó y el 21% no terminó la secundaria. Además, el 11,8% completó la secundaria, el 9,5% tiene estudios superiores incompletos y el 0,9% completó los estudios universitarios.

De acuerdo con el *Decimoctavo Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible* de 2012 (Programa Estado de la Nación, 2012), en la población de 25 a 64 años el promedio de escolaridad a nivel nacional es de 8,5 años. Sin embargo, en el cantón de Acosta el promedio es de 7,3 años, en Aserri de 8,3 años y en el caso de León Cortés de 6,8 años. Estos cantones conforman la mayor parte de la extensión de la región Caraigres.

La forma en que se manifiesta la tenencia de vivienda permite dar cuenta de los esfuerzos por consolidar un patrimonio para propiciar un nivel de bienestar en el hogar. Según la Encuesta Nacional de Hogares de 2012 (INEC, 2012), en Costa Rica el 71% de las viviendas particulares ocupadas son habitadas por sus propietarios y la mayor parte están totalmente pagadas (dos de cada tres). Las viviendas alquiladas representan un quinto del total de viviendas particulares ocupadas. En la zona rural es más frecuente la forma de tenencia propia totalmente pagada (68,3% frente a 60,5% en la zona urbana) y otro tipo de vivienda (15,2% en la zona rural y 6,5% en la urbana).

Aunque en Costa Rica el 90,5% de las viviendas cuenta con acceso a todos los servicios básicos de saneamiento (que es lo que se considera óptimo), existen regiones rurales que se alejan negativamente de este promedio nacional. Así, en la zona rural el porcentaje de viviendas con todos los servicios es del 78,4%, lo que equivale a 19 puntos porcentuales menos que en la urbana, donde el 97% de las viviendas cuenta con todos los servicios (INEC, 2012).

En lo que se refiere a las viviendas que poseen diferentes tipos de tecnologías de información y comunicación, en la zona rural un 65,9% tiene radio, un 93,7% cuenta con televisor, el 46,2% tiene línea de teléfono residencial y el 89,3% línea de teléfono celular. Solamente un 32,7% cuenta con computadora y un 33,5%, tiene acceso a internet (INEC, 2012).

Materiales y métodos

Características generales

Este trabajo se realizó en la subregión de Caraigres, en las siguientes asociaciones de productores agrícolas: Asociación de Familias Orgánicas de los Cerros Caraigres (AFAORCA), Asociación de Productores Agropecuarios de las Comunidades de Acosta y Aserri (ASOPROAAA) y la Asociación de Apicultores de la Región Caraigres (APICARAIGRES).

Subregión Caraigres

Esta subregión se encuentra al sureste del Valle Central y de San José. Incluye los distritos del cantón de Acosta: San Ignacio, Guaitil, Cangrejal y Sabanillas; los distritos del cantón de

Aserrí: Vuelta de Jorco, La Legua, San Gabriel y Tarbaca; los distritos de San Cristóbal, Frailes y El Rosario, del cantón de Desamparados; el distrito de Corralillo de Cartago y, finalmente, el distrito de San Andrés del cantón de León Cortés (SEPSA, s.f.).

La precipitación varía mucho en la subregión debido a las condiciones propias de la zona, que presenta una gran cantidad de microclimas. Esta oscila entre 1850 y 4000 mm anuales, con una precipitación promedio de 2800 mm, distribuidos entre los meses de abril a diciembre (Ortíz y Masís, 2004). Además, presenta una época seca bien marcada, superior a los tres meses.

Como la altitud va desde 600 msnm, en los lugares cercanos a Parrita, hasta 2500 msnm en el cerro El Dragón, la oscilación de la temperatura es muy amplia. La temperatura media máxima es de 29 °C y la media de temperaturas mínimas de 18 °C. La temperatura máxima registrada es de 32 °C y la mínima de 12 °C.

Los principales suelos de esta subregión corresponden a los órdenes entisoles, inceptisoles y ultisoles (Alvarado, 1984). Son suelos pobres, con baja fertilidad y bastante erosionados, que se distribuyen en una topografía ondulada y escarpada; el 80% de estas tierras presenta pendientes superiores al 30%.

El área en estudio se encuentra inmersa en las siguientes zonas de vida: bosque muy húmedo montano bajo, en las zonas altas de Tarbaca, Cedral, La Legua, Frailes y Corralillo; bosque muy húmedo premontano, en las zonas de San Ignacio, Guaitil, Cangrejal, Vuelta de Jorco y San Gabriel; y bosque húmedo tropical transición a premontado en Sabanillas (ECOPLAN, 2011).

Las organizaciones en estudio se pueden caracterizar como sigue:

AFAORCA: se funda en 1997 e incursiona de forma exitosa con un producto orgánico de café de alta calidad en los cada vez más exigentes mercados internacionales. Con número de cédula jurídica 3-002-337600, tiene su sede al costado norte de la estación terrena del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) en Tarbaca de Aserrí, San José. Está conformada por 25 familias de pequeños agricultores, distribuidas en los cantones de Acosta, Aserrí, Desamparados, León Cortés y Barva y están certificadas en la producción de café orgánico.

ASOPROAAA: se funda el 11 de septiembre de 1998, su cédula jurídica es 3-002-235584 y su sede se encuentra en Potrerillos, San Ignacio de Acosta, 600 m al sureste del Centro Turístico La Laguna. Dispone de una infraestructura amplia: oficina para la atención de sus afiliados, un centro de capacitación y gestión empresarial, microbeneficio, patios y bodega de almacenamiento y un invernadero para la producción de injertos de cítricos, todo esto distribuido en una propiedad de 4 hectáreas. Actualmente, posee 1142 asociados pequeños y medianos agricultores de una gran cantidad de comunidades de los cantones de Acosta, Aserrí y Desamparados. En la actividad cafetera, la organización ha realizado un gran esfuerzo al incursionar no solo en la fase productiva, sino que ha explorado la parte de transformación y comercialización con mucho éxito, posicionando al café de esta zona como un producto de alta calidad a nivel internacional.

APICARAIGRES: inicia sus funciones en 1999 y surge para dar respuesta a la problemática de la "africanización" de las abejas. Gestiona diversos proyectos para mejorar la competitividad, entre los cuales se destacan el de crianza de abejas reina de alta calidad genética. Además, posee un centro de acopio, empaque y comercialización, que le permite llegar directamente al consumidor, con un producto inocuo y de alta calidad que contribuye al mejoramiento de los ingresos. Su cédula jurídica es 3-002-245238 y está asentada en la comunidad de La Minilla de Vuelta de Jorco de Aserrí. Según los registros, cuenta con 29 apicultores asociados, quienes provienen de los cantones de Acosta, Aserrí y Mora, con una cantidad de colmenas y una producción de miel significativas.

Instrumento de recolección de la información

Se elaboró una encuesta según la aplicación de juicio de experto y se sometió a pruebas preliminares para medir su efectividad.

La encuesta consideró dos tipos de datos convencionales con los que se caracterizaron; por un lado, las agrocadenas, que se explican en el primer artículo de esta secuencia; y las estadísticas descriptivas de los miembros de las organizaciones, datos que se ofrecen en este artículo. Por el otro, se consideraron los datos relacionales para evaluar las redes sociales de cada una de las organizaciones, los cuales se expondrán posteriormente.

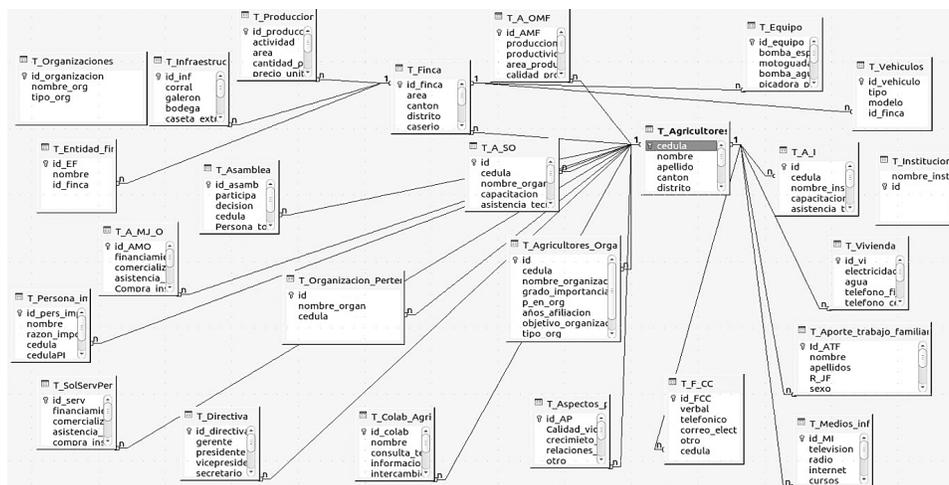
Las variables consideradas para la obtención de datos para los análisis descriptivos tienen que ver con cifras sobre: datos personales de los agricultores, sobre la familia y el trabajo de esta en la unidad productiva; además, la situación de vivienda y la actividad productiva.

La encuesta se aplicó a la totalidad de los asociados de APICARAIGRES, que suman 29, y a todos los afiliados de AFAORCA, que son 25. Además, se realizó una muestra de 83 asociados, de un total de 106 caficultores, de ASOPROAAA. Para la obtención del tamaño de la muestras se utilizó la fórmula indicada por Hank Y Reitsch (1997).

Caracterización por parámetros descriptivos de los agricultores y las organizaciones

Las tres organizaciones que se estudiaron presentan una serie de características, las cuales se definieron aplicando la encuesta al grupo o subgrupo, según correspondió. El análisis de la encuesta se realizó creando primero una base de datos, cuyo esquema se describe en la figura 1.

La base de datos se creó usando el modelo entidad-relación, luego se transformó al modelo relacional para implementarlo en un manejador de bancos de datos. Para la implementación del esquema de la base de datos, se utilizó el manejador de base de datos del *software* de oficina LibreOffice (Base). Todas las consultas se elaboraron con ese manejador y se utilizó SQL estándar. Los gráficos y algunas de las estadísticas descriptivas se elaboraron con Calc, la aplicación de hoja electrónica de LibreOffice. Además, para realizar o corroborar algunos cálculos se utilizó “R” (R Core Team, 2014).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1. Esquema de la base de datos para gestionar los datos de la encuesta.

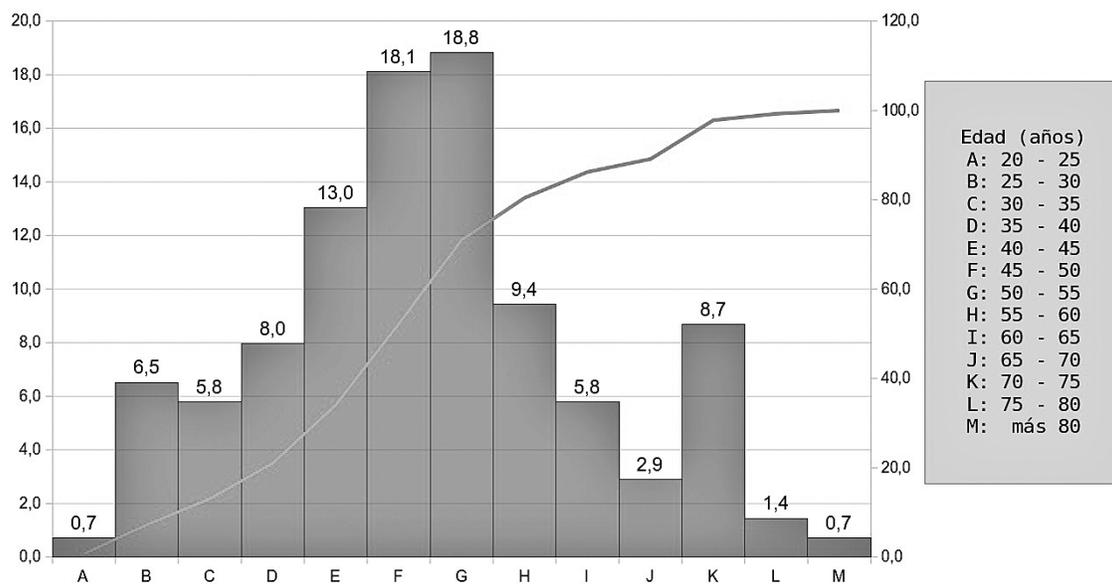
Resultados y discusión

Las organizaciones estudiadas están conformadas por pequeños productores agrícolas, quienes sintieron la necesidad de organizarse para enfrentar de manera colectiva los grandes retos de la producción y sin saber que esta acción podría haber sido la única que los prepararía para desenvolverse en una economía globalizada. Así, se organizaron con la esperanza de tener mayor posibilidad de acceder a recursos financieros, tecnológicos, conocimientos e infraestructura, entre otros, que les permitieran ser más eficientes en su pequeña empresa agropecuaria. A su vez, con el objetivo de poder articular en forma conjunta la producción con el mercado. Es decir, para ser capaces de operar de forma rentable en ese entorno.

Edad y grado de escolaridad del agricultor y de la familia

Como se puede observar en la figura 2, en los grupos E, F, G y H se acumula el 59,4% de todos los agricultores, que tienen edades mayores de 40 años y menores de 60. Además, se observa que los agricultores con menos de 40 años solo suman el 21%, un número menor al de los que tienen más de 60 años, que representan el 27,5% de los agricultores.

Por lo anterior, se puede percibir que la edad de los productores asociados a estas organizaciones es alta, lo cual significa que a este nivel el sector podría estar envejeciendo.



Fuente: Elaboración propia.

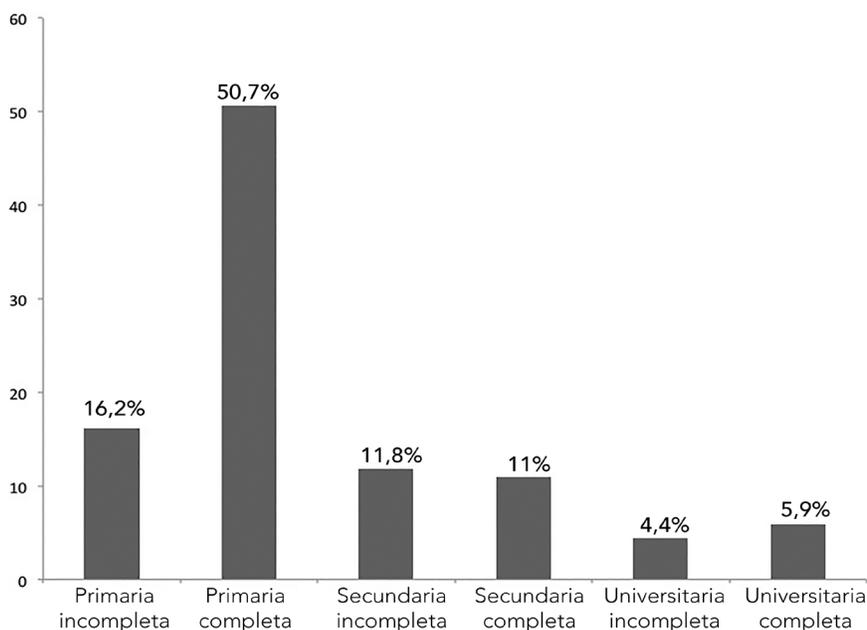
Figura 2. Porcentaje por rango de edad de los agricultores encuestados de las tres organizaciones. Acosta, San José, 2013.

Es importante indicar que la mayoría de dichos afiliados debió estudiar hace treinta o cuarenta años, cuando prevalecían deficientes condiciones socioeconómicas y limitadas oportunidades de estudio. En este sentido, en la figura 3 se muestra el grado de escolaridad de los asociados de estas organizaciones.

Cuando se analizan los datos de edad y de escolaridad de los agricultores, se observa que existe una tendencia inversa entre la edad y la escolaridad, es decir, cuanta más edad tengan,

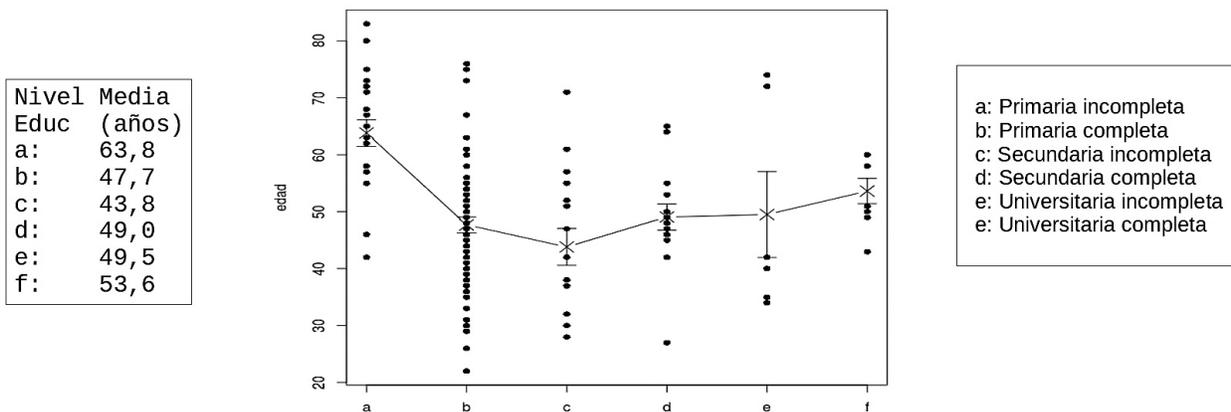
menos escolaridad y viceversa. Sin embargo, dicha tendencia es muy débil, pues el coeficiente de correlación de Spearman es de -0,257, aunque según la prueba de hipótesis respectiva es altamente significativo.

Para comparar las medias de edad de los diferentes grupos educativos, se utilizó la prueba *oneway.test* de Welch, según la cita Dalgaard (2002).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. Nivel de escolaridad de los asociados de las tres organizaciones estudiadas, en porcentaje. Acosta, San José, 2013.

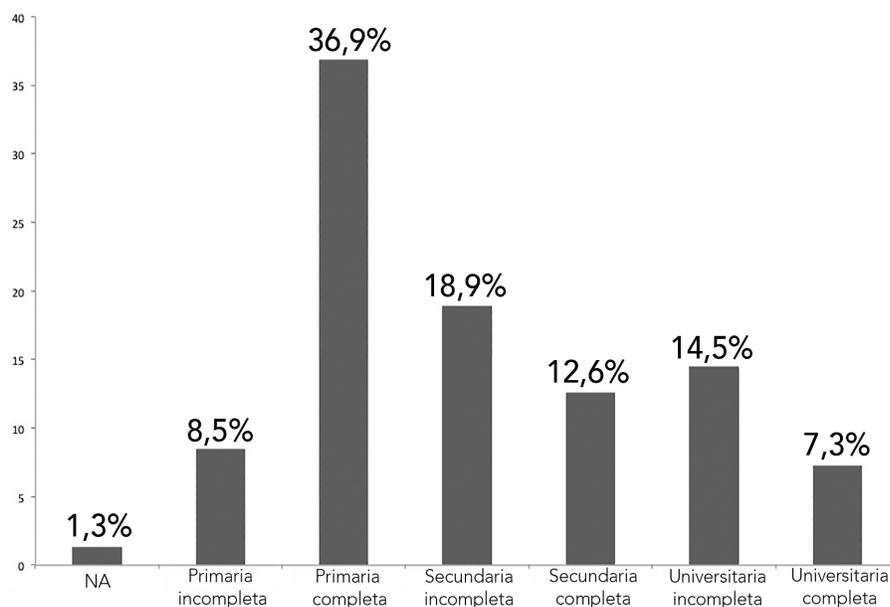


Fuente: Elaboración propia.

Figura 4. Nivel de escolaridad y edad de los agricultores de las tres organizaciones en estudio: ubicación de sus

medias y el rango de la desviación. Acosta, San José, 2013.

En la figura 4 se puede observar cómo se distribuyen los datos de todos los agricultores a los que se les aplicó la prueba antes citada, y la ubicación de sus medias por nivel educativo. Según se observa, existen diferencias significativas entre la edad del grupo que tiene menor educación (primaria incompleta) con respecto a las demás agrupaciones, pero no existen diferencias entre los otros grupos de los otros niveles educativos. Así, se ve claramente que la edad disminuye de primaria incompleta a primaria completa, pero los cambios adicionales observados no son significativos, por lo que habría que decir que la edad promedio es igual entre los distintos grupos a partir de la primaria completa.



Fuente: Elaboración propia.

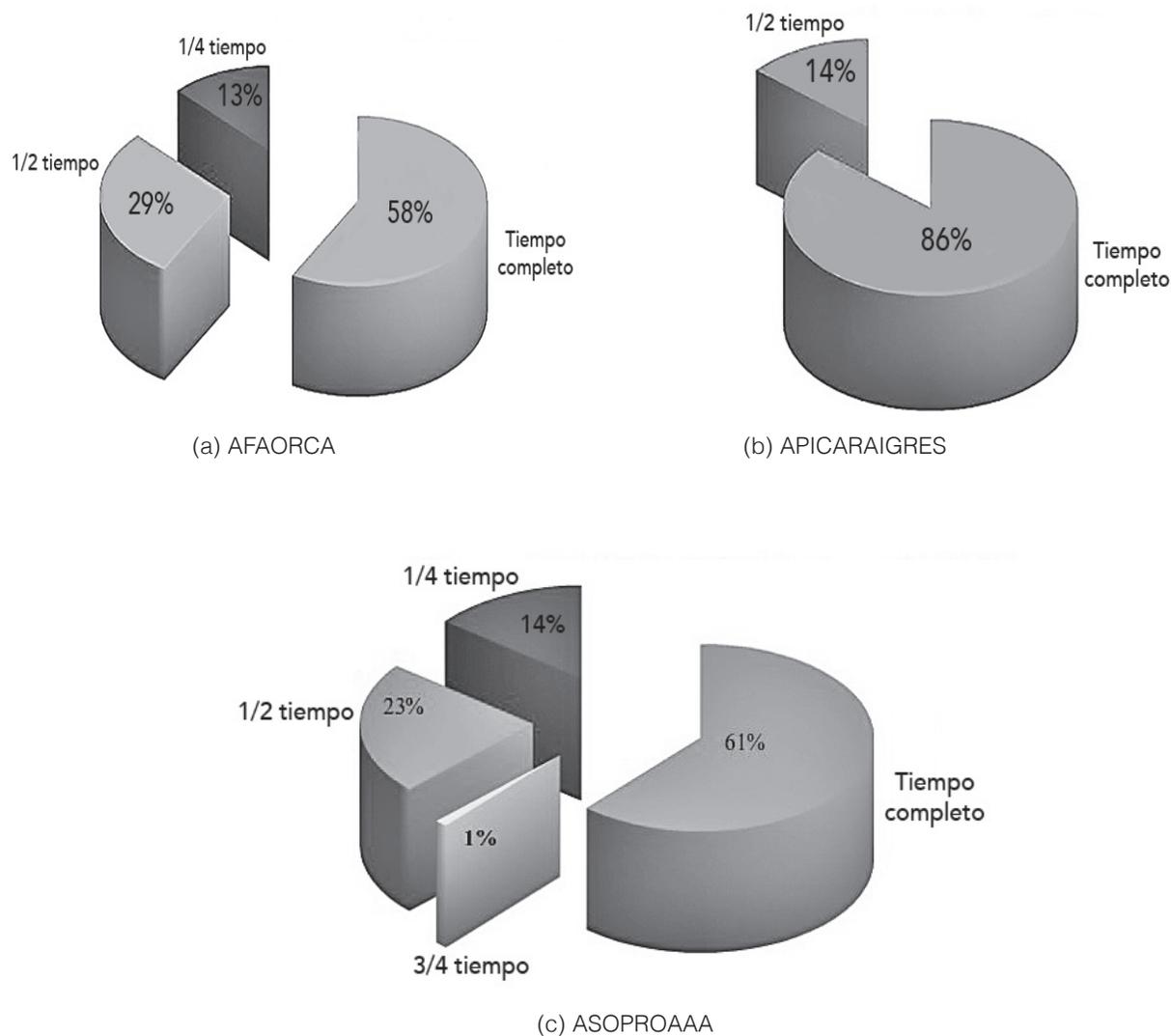
Figura 5. Porcentaje de miembros del núcleo familiar de los asociados mayores de 12 años, por nivel de escolaridad, de las tres organizaciones estudiadas. Acosta, San José, 2013.

En cuanto al nivel de escolaridad de los miembros del núcleo familiar, se aprecian algunas diferencias importantes de destacar, como se muestra en la figura 5. Por ejemplo, entre los familiares de los agricultores no predomina el nivel de primaria completa, como sí ocurre entre los agricultores. Además, existe una disminución importante en el nivel de primaria incompleta y un aumento en los niveles de secundaria y universitario. Esta situación, posiblemente, se explique porque han mejorado las condiciones de vida para los hijos y estos pueden alcanzar metas más elevadas en el sistema educativo.

Aporte de mano de obra a los sistemas productivos

En la figura 6 se aprecia que el aporte de mano de obra del agricultor a su sistema productivo empieza a ser parcial. Así, es importante hacer notar que, en las tres organizaciones, solo los apicultores tienen un nivel de aporte alto de mano de obra, pues el 86% se dedica a esta actividad a tiempo completo. Por su parte, en las organizaciones cafetaleras dicho valor ronda el 60% de los productores y el 40% de estos se dedica a la actividad solo a tiempo parcial. Asimismo, esto puede indicar que ya no pueden vivir y sostenerse exclusivamente de estas

actividades y han tenido que recurrir a otras. En las dos asociaciones cafetaleras existe un 13% o 14% de personas que solo dedican un cuarto de tiempo a las actividades de su predio, =lo que equivale a 12 horas o menos su atención.

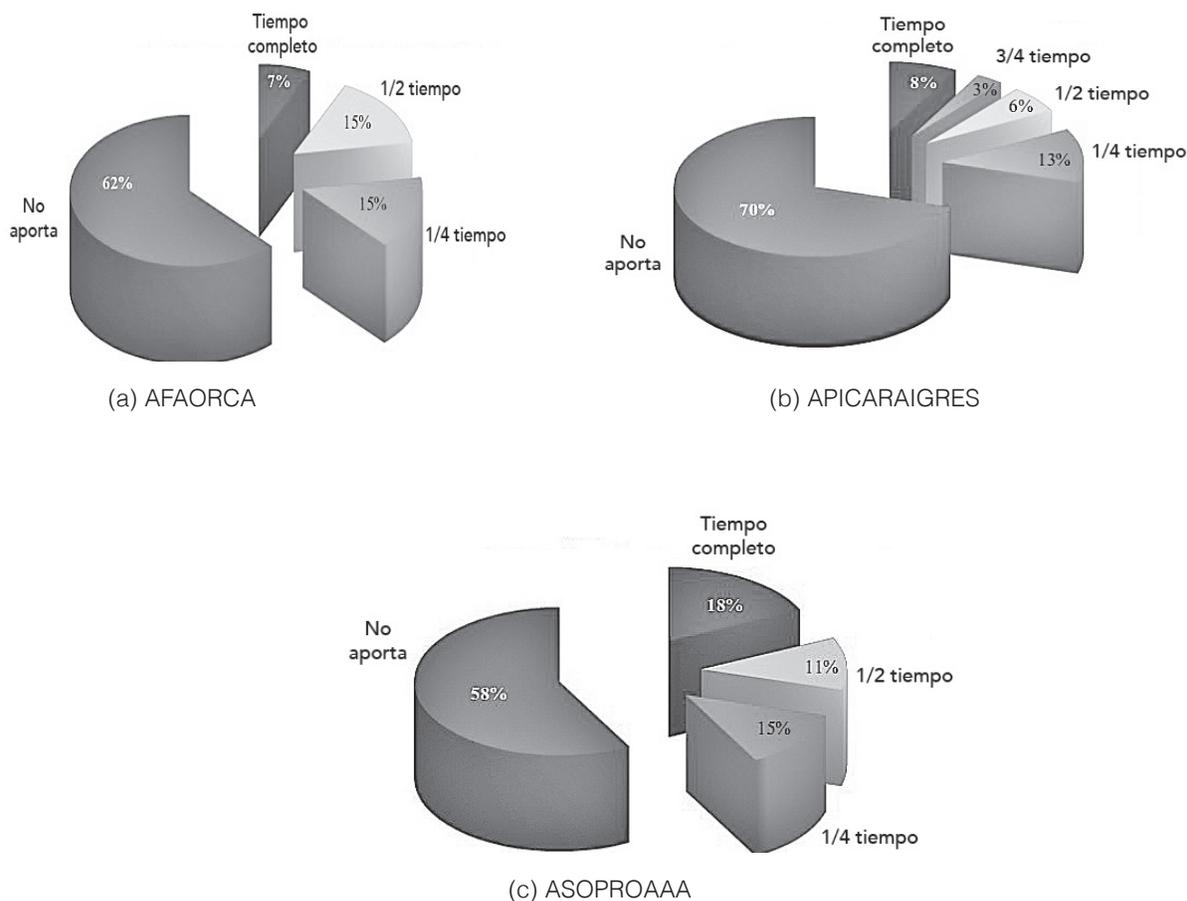


Fuente: Elaboración propia.

Figura 6. Porcentaje de los asociados que aportan mano de obra a su sistema productivo por asociación. Acosta, San José, 2013.

Hay que mencionar que los sistemas de producción de los pequeños y medianos empresarios han enfrentado las consecuencias de las políticas sectoriales agropecuarias del país, que se han caracterizado por el desmantelamiento de la estructura y de la capacidad de respuesta de las instituciones, lo que se ha traducido en un escaso apoyo. A esto se le suman los tratados de libre comercio que ponen a competir en términos desiguales a los agricultores locales, por ejemplo, contra los productos subsidiados y los bajos precios de sus cosechas. Por ello se han visto obligados a desplazarse en forma temporal a otras labores, que les permiten obtener recursos económicos para el sostén de su familia y la asistencia de sus cultivos, durante su tiempo libre.

La figura 7 muestra el aporte de mano de obra familiar a los sistemas productivos y, como se observa, sucede lo mismo que con el aporte del asociado, en el sentido de que es parcial y posiblemente por las mismas razones antes expresadas.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7. Aporte de mano de obra por los miembros del núcleo familiar al sistema productivo por asociación. Acosta, San José, 2013.

En las tres organizaciones, el aporte de mano de obra a tiempo completo por parte de los miembros de la familia no sobrepasa el 11%, mientras que quienes no contribuyen alcanzan el 70% en la organización de apicultores y 62% y 58% en el caso de los caficultores. Cabe destacar que el aporte de mano de obra directa a tiempo completo, en el caso de los apicultores, llega al 86%. Este es el valor más alto entre todas las organizaciones y coincide con el más alto en la categoría de *no aporta mano de obra*, lo cual pareciera indicar que el aporte familiar no es tan importante si se cuenta con el trabajo a tiempo completo del agricultor.

En resumen, se puede indicar que el aporte familiar, sin considerar la modalidad, no sobrepasa el 40% de los miembros y solo en ASOPROAAA el aporte a tiempo completo es importante, pues llega al 18%. En las otras dos organizaciones solo alcanza 7% (AFAORCA) y 8% (APICARAIGRES).

Un aspecto importante que se debe destacar con base en estos datos de participación de los familiares es que, por las edades de los agricultores, de los cuales casi el 80% tiene más de 40 años y el 47,8% más de 50 (figura 1), era de esperarse una gran participación de los familiares

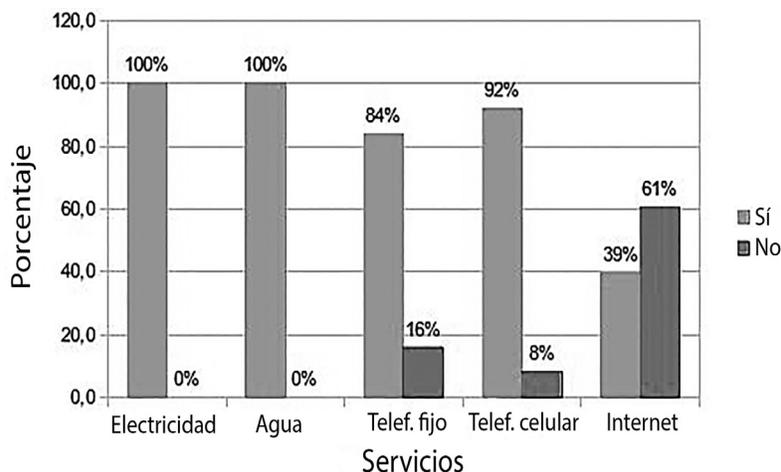
en las actividades agrícolas, pues es lógico pensar que agricultores de 40 años tengan hijos con edades de trabajar y que los mayores de 50 tengan prácticamente a sus sustitutos trabajando con ellos. No obstante, la participación más bien es exigua y si a esto se suma el hecho de que en el grupo de los agricultores solo el 21% son menores de 40 años, se puede concluir que este colectivo envejece y no cuenta con reemplazo generacional.

Vivienda y servicios

Según este estudio, la mayoría de los asociados de las organizaciones cuenta con vivienda propia, pues el 95,6% así lo indica y solo el 4,4% señala que tiene vivienda en otra condición.

En la figura 8 se muestran los servicios de los que disponen en sus hogares, tanto públicos como de comunicación.

Los datos de electricidad y agua concuerdan con los esperados. Ha sido una política nacional brindar estos servicios a la totalidad de la población. Sin embargo, se encuentra una situación diferente para los servicios de comunicación. Así, el caso de la telefonía fija y de celular muestra valores muy altos, que difieren del acceso a internet. Es necesario aclarar que la encuesta preguntó por el acceso a este servicio en los hogares, por lo tanto, si el 92% tiene acceso a telefonía celular, la variable de acceso a internet podría modificarse fácilmente por medio de teléfonos inteligentes.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 8. Porcentaje de los asociados que cuenta con servicios públicos y de comunicación. Acosta, San José, 2013.

Conclusiones

Con base en los resultados se concluye que:

1. La edad de los agricultores encuestados es alta, solo el 21% tiene menos de 40 años; el 59,4% oscila entre 40 y 60 años, mientras que los mayores de 60 años representan el 19,5%.
2. El nivel educativo predominante de los agricultores encuestados es de primaria. El nivel de educación primaria incompleta alcanza el 16,2% y la completa el 50,7%. Sin embargo, existen niveles de preparación altos, en los que encontramos un 5,9% con estudios universitarios completos.
3. Existe una relación inversa entre la edad y la preparación o nivel educativo, sobre todo porque predominan edades altas en el grupo de primaria incompleta. No obstante, entre

los grupos de otros niveles educativos no se encontraron diferencias significativas en los promedios de edad.

4. Los niveles educativos de los miembros de las familias de los agricultores varían respecto a esta misma variable en los agricultores. El núcleo de primaria completa sigue alojando el mayor porcentaje de los miembros de las familias, con un 36,9% y, al sumar el de primaria incompleta, que es de 8,5%, se obtiene un 45,4%. Entonces, el 54,6% de los miembros tiene niveles de secundaria y estudios universitarios.
5. Los aportes de mano de obra del asociado a los predios es bajo en las asociaciones cafetaleras (58% AFAORCA y 61% ASOPROAAA), mientras en la de apicultores esta variable llega al 86%. En contraste, el aporte de mano de obra familiar es mucho más débil: en la organización apícola el 70% de los familiares no apoya estas labores, lo que podría explicarse en parte porque en esta asociación hay un mayor porcentaje de agricultores dedicados a esta labor a tiempo completo. Sin embargo, los aportes en las otras dos asociaciones son similares. En este sentido, se encontró que 58% (ASOPROAAA) y 62% (AFAORCA) de los miembros de las familias no contribuye a estas labores.
6. La edad de los agricultores y la poca participación de los miembros de las familias hacen pensar que estas asociaciones no están produciendo una generación que los reemplace cuando sea el momento.
7. Se puede inferir que los miembros de esas organizaciones agrícolas cuentan con recursos vitales para superarse. El 100% cuenta con vivienda, de este, el 95,6% tiene casa propia. Todos cuentan con servicios de electricidad y agua potable y disponen de medios de comunicación. El 84% tiene teléfono fijo y el 92% teléfono celular. Solo el servicio de internet en la casa es relativamente bajo, pues el 39% de los encuestados cuenta con él. Sin embargo, este porcentaje podría modificarse con relativa facilidad si se usaran teléfonos inteligentes a los que se les agregara el servicio de internet.

Bibliografía

- Alvarado, A. (1984). *Manejo y clasificación de suelos derivados de cenizas volcánicas de Costa Rica y Guatemala*. VI Congreso Agronómico Nacional, San José.
- Dalgaard, P. (2002). *Introductory Statistics with R*. New York: Springer.
- ECOPLAN. (2011). *Elaboración del Índice de Fragilidad Ambiental, Revisión, Actualización y Homologación del Actual Plan Regulador del Cantón de Acosta*. San José.
- Hank, J; Reitsch, A; 1997, *Estadística para negocios*. Mc Graw Hill, Segunda Edición, España
- INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos). (2012). *Encuesta Nacional de Hogares*. San José: INEC.
- INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos). (2013). *Encuesta Nacional de Hogares*. San José: INEC.
- Ortiz, E. & Masís, M. (2004). *Atlas digital de Costa Rica 2004*. Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica, Esc. de Ing. Forestal, Vicerrectoría de Investigación y Extensión.
- Programa Estado de la Nación. (2012). *Decimotavo Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible*. San José: PEN.
- R Core Team. (2014). *R: A language and environment for statistical computing*. Viena: R Foundation for Statistical Computing. Disponible en <http://www.R-project.org/>.
- Salazar, W. (1999). *La organización campesina para la comercialización agrícola*. XI Congreso Nacional Agronómico. Costa Rica. Disponible en http://www.mag.go.cr/congreso_agronomico_XI/a50-6907-l_439.pdf
- Samper, M. (2006). *Jornada de Reflexión y Debate: Políticas Agropecuarias, Estrategias de Desarrollo Rural, Seguridad Alimentaria, Pobreza Rural y Servicios de Extensión Agrícola*. San José: IICA.
- SEPSA. (s.f.) *Información Básica del Sector Agropecuario y de Recursos Naturales Renovables de Costa Rica. Número 3*. San José. Disponible en <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/a00014.pdf>

Mediciones y análisis de vibraciones en el puente Virilla, ruta nacional N° 1

Measurements and analysis of vibrations at Virilla Bridge, national route N° 1

eBridge 2.0: sistema integrado para el desempeño de puentes

Francisco Navarro-Henríquez¹, Daniel Ureña-Muñoz²

Fecha de recepción: 19 de agosto del 2014

Fecha de aprobación: 10 de octubre del 2014

Navarro-Henríquez, F; Ureña-Muñoz, D. Mediciones y análisis de vibraciones en el puente Virilla, ruta nacional N° 1. *Tecnología en Marcha*. Vol. 28, N° 2, Abril-Junio. Pág 16-32.

-
- 1 Ingeniero en Electrónica, M.Sc., MBA, Profesor Investigador eBridge 2.0 sistema integrado para el desempeño de puentes. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Teléfono: (506) 2550-9242. Correo electrónico: fnavarro@itcr.ac.cr
 - 2 Ingeniero Civil con énfasis en estructuras, M.Sc., asesor en análisis de vibraciones eBridge 2.0 sistema integrado para el desempeño de puentes. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Teléfono: (506) 8910-8072. Correo electrónico: durenamunoz@gmail.com

Palabras clave

Dinámica estructural; análisis modal; Transformada Rápida de Fourier (FFT); sensores de fibra óptica FBG; sensores de esfuerzo y vibración.

Resumen

Este artículo presenta la experiencia generada durante la inspección detallada de la superestructura del puente Virilla, ruta nacional N° 1, como parte del proyecto de investigación *eBridge 2.0: sistema integrado para el desempeño de puentes* y a solicitud del Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI), con base en el Contrato interadministrativo entre el CONAVI y el Tecnológico de Costa Rica (TEC).

En este trabajo se realiza una descripción general del puente en estudio, así como una inspección inicial de la estructura y se dispone de un modelo analítico del puente para el análisis estructural.

Las mediciones realizadas permitieron cuantificar las magnitudes vibratorias y la deformación en varias secciones del puente, en condición de tránsito vehicular en servicio (comportamiento ambiental). Los resultados experimentales obtenidos se comparan con el modelado analítico computacional de la estructura y este a su vez con normas nacionales e internacionales.

Keywords

Structural Dynamics; modal analysis; Fast Fourier Transform (FFT); FBG fiber optics sensors; Strain and vibration sensors.

Abstract

This article presents the experience generated during the detailed inspection of the superstructure at the Virilla bridge, National Route N° 1, as part of the research project “eBridge 2.0: integrated bridge system performance”, by request of the National Roads Authority (CONAVI) and based on the existing inter-contract between CONAVI and the Technological Institute of Costa Rica (TEC).

In this paper an overview of the bridge main features is described with an initial inspection of the structure is performed and also it is provided an analytical model of the bridge for structural analysis.

The measurements allowed quantifying the vibration magnitudes and deformation in various sections of the bridge, on condition of vehicular traffic service (environmental performance). The experimental results are compared with computational analytical modeling of the structure and also with national and international standards.

Introducción

El presente trabajo busca determinar algunas de las características dinámicas del puente sobre el río Virilla por medio de pruebas de vibración, para establecer una condición de referencia conocida de la estructura, previamente al proceso de rehabilitación al que se encuentra sometido.

Una vez concluida la obra de rehabilitación del puente, se contrastaría una nueva prueba de vibración con los datos de las mediciones de vibración originales anteriores al trabajo de restauración.

La prueba de vibración desarrollada permite la medición de las magnitudes de aceleración en las direcciones vertical, lateral y longitudinal, la determinación de las frecuencias naturales de la estructura, así como la deformación (esfuerzo dinámico) presente en algunos de los elementos de la superestructura. El esquema de instrumentación empleado define dos puntos de medición en la cercha central y otro punto de medición en una de las secciones laterales.

Los resultados obtenidos de la prueba experimental se comparan con el modelo analítico del puente, para verificar que el comportamiento del mismo se ajusta a las condiciones de diseño y a la normativa nacional e internacional.

Las pruebas de carga dinámicas no destructivas (NDT) permiten la medición de la respuesta de un puente sujeto a excitaciones predeterminadas sin causar cambios en la respuesta elástica de la estructura. Estas pruebas sirven para verificar el desempeño global del puente y el rendimiento de algunos de sus componentes (AASHTO, 2011).

En forma general, las pruebas dinámicas pueden clasificarse en tres grandes categorías, a saber: peso en movimiento (WIM), prueba de respuesta dinámica y prueba de vibraciones (AASHTO, 2011).

Una prueba de peso en movimiento abarca el conteo y pesaje de unidades e incluso ejes de tracción del tránsito vehicular regular. Luego, una prueba de respuesta dinámica busca, bajo tráfico normal o en condiciones controladas con un vehículo de prueba, determinar un estimado realista de la carga dinámica permitida y rangos de tensión de carga viva que pueden ser utilizados para la cuantificación de límites de carga y evaluación de fatiga. Las pruebas de vibración se utilizan para determinar características dinámicas del puente, tales como frecuencias naturales de vibración, forma modal y amortiguamiento.

En el caso de la labor desarrollada en el puente sobre el río Virilla, se puede indicar que corresponde a una prueba de vibración.

Características generales del puente

El puente sobre el río Virilla, ubicado en la ruta nacional 1, en el distrito La Uruca, del cantón de San José en la provincia de San José, fue diseñado en 1960. Tiene una longitud de 160 metros, cuenta con dos secciones de 19,84 m cada una, su alineación es recta. Posee siete superestructuras (seis de vigas I de acero y una de cercha), dos bastiones y dos pilas. Inicialmente se diseñó para una carga HS 15-44 con las especificaciones AASHTO 1957 (Ortiz et al., 2014).

En el año 2010 se diseñó el reforzamiento de la losa, utilizando las especificaciones AASHTO 2002 y una carga HS20-44 + 25% (AASHTO, 2011).

La figura 1 muestra una fotografía con la vista del puente y en la figura 2 puede observarse un diagrama con la vista en planta y lateral del puente con los puntos de medición para vibración y esfuerzo de deformación.



Figura 1. Vista del puente sobre el río Virilla, febrero 2014.

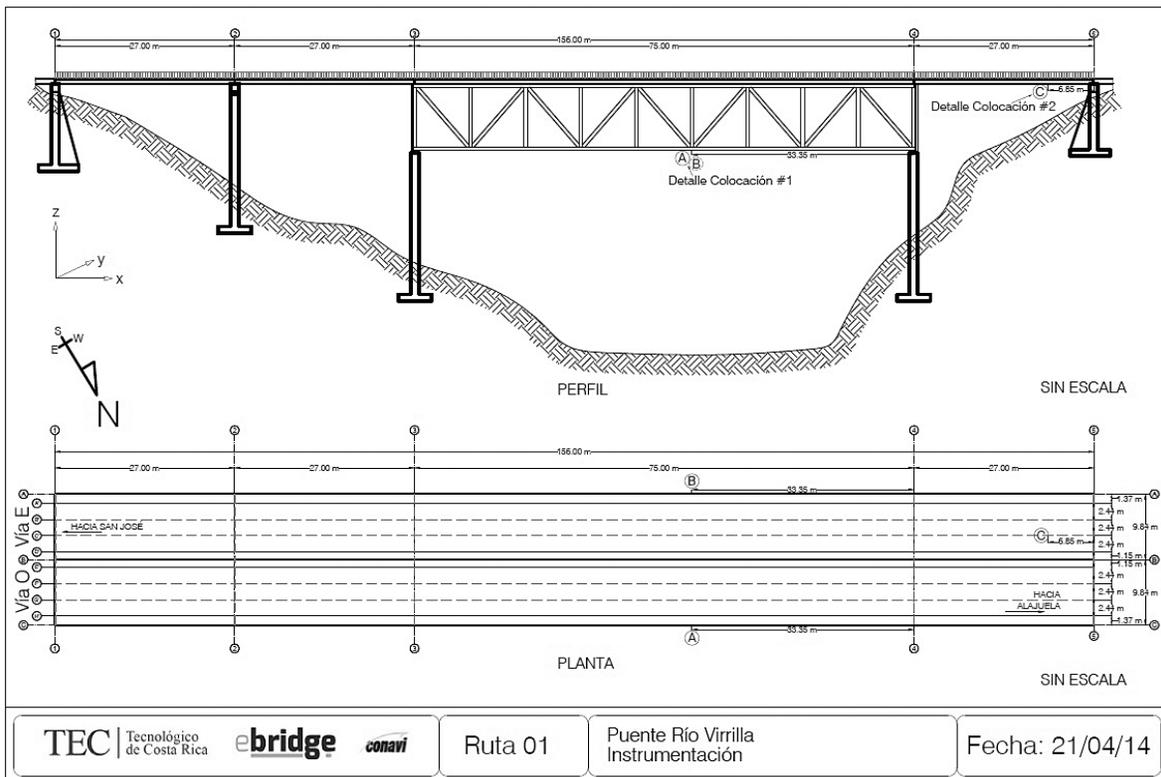


Figura 2. Vista en planta y pateral del puente sobre el río Virilla. Ubicación puntos de medición A, B y C.

Inspección inicial

La estructura actualmente se encuentra en proceso de intervención para su reforzamiento, por esta razón el análisis se orientará únicamente hacia los elementos de acero de la superestructura. Las vigas principales en las seis superestructuras presentan problemas de oxidación, especialmente cerca de los apoyos, y la pintura se encuentra en mal estado. La vigas diafragmas en su mayoría presentan oxidación y alguna corrosión.

La cercha del puente muestra un mayor nivel de deterioro, encontrándose corrosión en muchos puntos y falta de mantenimiento básico, además presenta vibraciones y sonidos fuertes. Los apoyos tienen un alto nivel de deterioro.

El puente presenta un incremento significativo en la carga vehicular de diseño. El registro de tránsito promedio diario del año 2013 realizado por la Dirección de Planificación Sectorial de la Unidad de Estudios de Tráfico e Investigación del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) indica que el tránsito promedio diario (TPD) en el puente es de 87,407 vehículos.

El cuadro 1 presenta el desglose por tipo de vehículo y su participación respecto al total.

Cuadro 1. Distribución promedio diario del número de vehículos.

Tipo de vehículo	% del TPD	# Vehículos diarios
Particular	75,22	65,748
Carga Liviana	11,02	9,632
Buses*	4,43	3,872
2 ejes	5,73	5,008
3 ejes*	1,2	1049
4 ejes*	0	0
5 ejes*	2,4	2,098
TOTALES	100	87,407

El número promedio diario de camiones en un sentido por carril es de aproximadamente 3,100 unidades (Ortiz et al., 2014).

Modelo analítico de puente

Se construye un modelo estructural del puente con apoyo de la herramienta de *software* de análisis estructural SAP 2000.

Los planos consultados para la elaboración del modelo corresponden a los planos originales de construcción de la estructura, que representan la configuración con la cual ha funcionado el puente durante la mayor parte de su vida útil.

La figura 3 muestra la vista superior tridimensional del modelo estructural elaborado con SAP 2000.

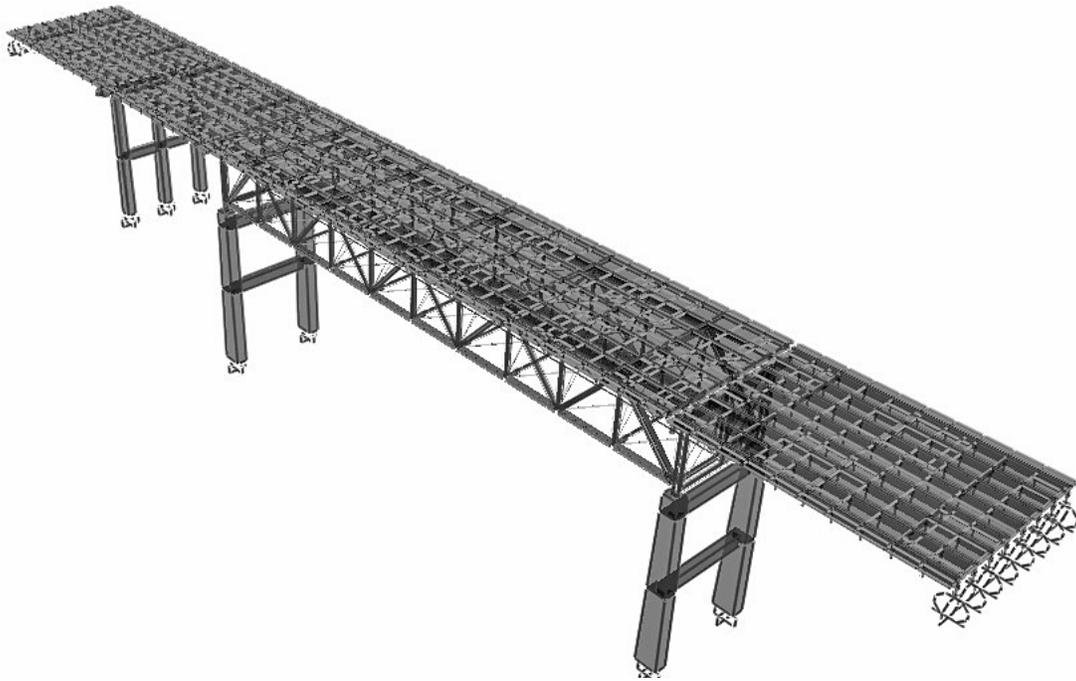


Figura 3. Vista superior tridimensional del modelo computacional.

La figura 4 muestra el modelo estructural del puente con la forma modal 9, cuya frecuencia natural de vibración teórica corresponde a 3.23HZ. Esta frecuencia tiene participación en las direcciones Y (transversal) y Z (vertical).

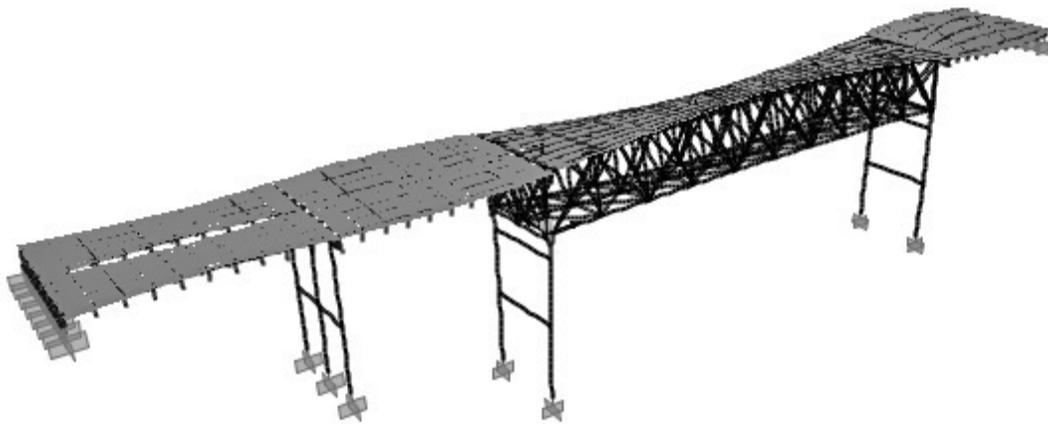


Figura 4. Modelo analítico. Modo de vibración y frecuencia.

Estudio de vibraciones y esfuerzos dinámicos

Las mediciones experimentales de vibración y esfuerzo dinámico se llevaron a cabo durante el mes de abril de 2014, permitiendo la circulación vehicular normal en servicio sobre el puente en ambas direcciones (comportamiento ambiental).

Se establecieron tres puntos de medición en el puente, correspondientes a A, B y C, como se puede apreciar en la figura 2. En cada punto de medición se cuantificaron las magnitudes vibratorias y deformación (esfuerzo dinámico) por medio de la tecnología de sensores de fibra óptica FBG (Fiber Bragg Grating) (Kumar y Madhav, 2010).

Las mediciones de las aceleraciones se realizaron para cada punto en sentido longitudinal, transversal y vertical, que respectivamente corresponden a las coordenadas del modelo estructural, x, y, z. En todos los casos, el tiempo de medición fue de 30 minutos, capturando 1000 datos por segundo de cada sensor.

La instrumentación utilizada estuvo compuesta de un Interrogador óptico sm130 de 4 canales, 1KHZ, un computador portátil con *software* para el registro de los datos ENLIGHT v1.5.59, un acelerómetro óptico de tres ejes como sensor de vibraciones, os7103, un medidor de deformación os3610 y un sensor de temperatura absoluta os4230 (Micron Optics, 2012).

En la figura 5 se muestra el esquema de instrumentación.

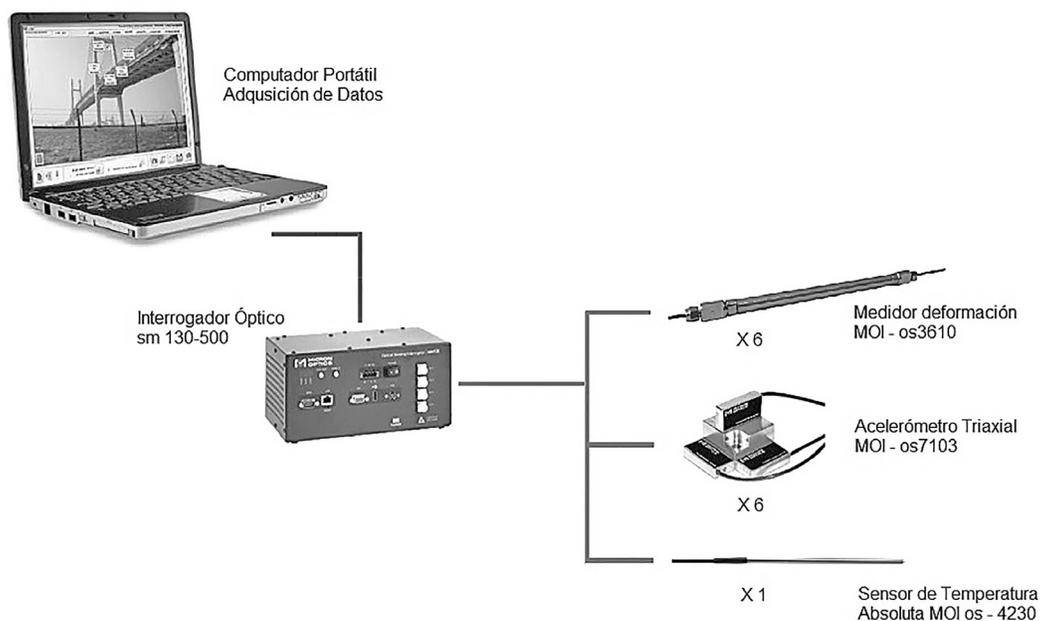


Figura 5. Esquema de instrumentación.

Medidas de vibración

Para cada una de las mediciones de vibración, dado que se tienen los valores de aceleraciones en función del tiempo, se procedió a aplicar filtros de paso de banda entre los 0.1 Hz a los 25 Hz. Una vez aplicados dichos filtros con el fin de evitar vibraciones por ruido, se procedió a realizar la FFT (transformada rápida de Fourier) con el fin de determinar las frecuencias predominantes, las cuales se definen como frecuencias "in situ" (Davis et al., 1996).

La figura 6 muestra el registro de los datos de vibración y su correspondiente espectro de frecuencia en el punto de medición A.

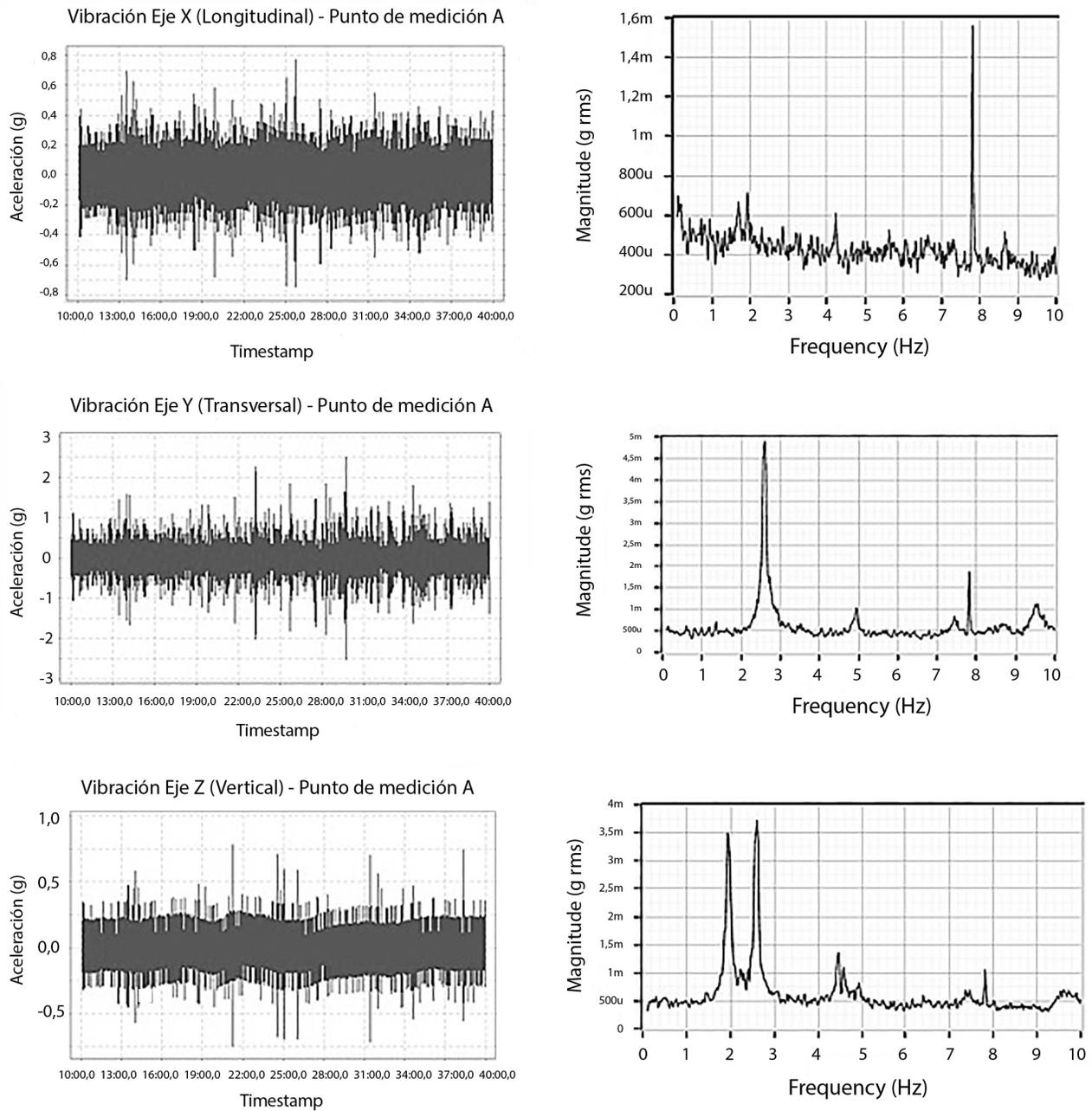


Figura 6. Señales de vibración y espectro de frecuencia, punto de medición A.

Una vez obtenidas las frecuencias “in situ”, se procedió a compararlas con las frecuencias del modelo estructural computacional. Inicialmente se determinó la participación modal en cada una de las direcciones x, y, z.

Del modelo analítico se obtuvieron los primeros 96 modos de vibración, sus participaciones en cada una de las tres direcciones y el porcentaje de participación con respecto al número de modo y a la frecuencia.

La figura 7 muestra una gráfica con la participación modal versus la frecuencia, obtenida por medio de la herramienta de *software* de análisis estructural SAP 2000.

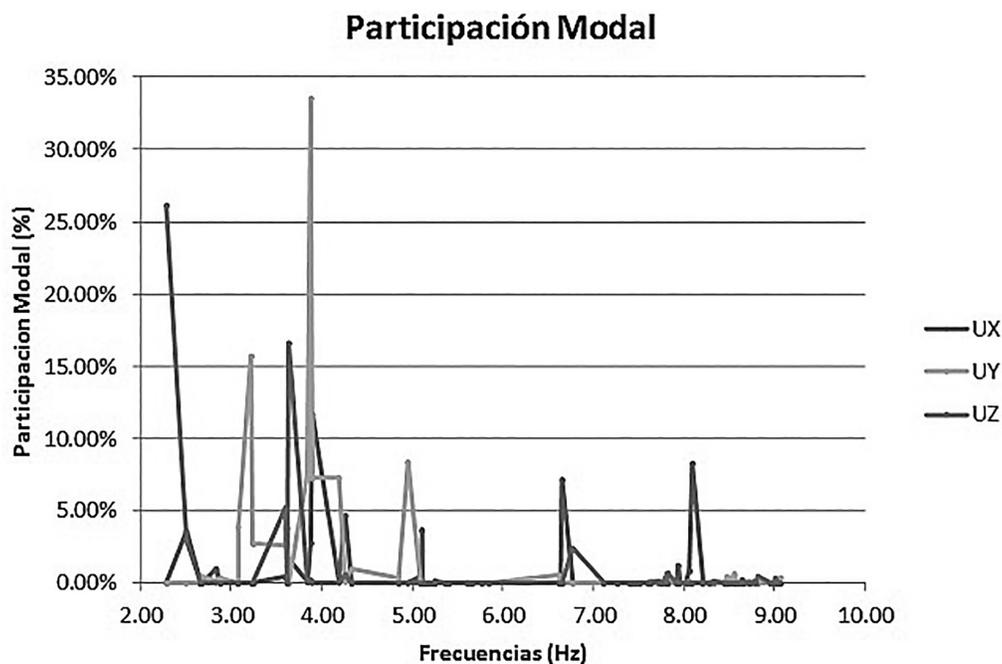


Figura 7. Participación modal vs frecuencia

Para cada uno de los puntos de medición en el puente se determinó su correspondiente nodo en el modelo. Luego, para cada uno de los nodos, se determinó el desplazamiento máximo modal, para cada uno de los modos, y posteriormente se comparó con su respectivo punto de medición experimental.

La figura 8 presenta la comparación de frecuencias experimentales con las del modelo estructural computacional en el punto de medición A correspondiente al nodo 7.

En el cuadro 2 y la figura 9 se presenta, para los puntos de medición A y B, los valores de las frecuencias identificadas experimentalmente y las del modelo estructural computacional. Los porcentajes de diferencia varían de un 4% a un 20%. Dicha diferencia se debe a factores tales como que el modelo tiene una rigidez mayor a la que realmente tiene la estructura, los materiales se están considerando isotrópicos y con características mecánicas iguales, además los nodos pueden tener una rigidez diferente a la que se está considerando en el modelo; también podría deberse a respuesta no lineales en los materiales.

El cuadro 3 resume la estadística descriptiva en los puntos de medición para observar las magnitudes de los valores mínimos, máximos y rangos de las mediciones de vibración obtenidas.

Se determinaron las aceleraciones máximas en los lapsos de los gráficos en donde los picos máximos y mínimos son estables y no hay variaciones mayores a un 5% (Wenzel, 2009). El cuadro 4 resume los resultados obtenidos.

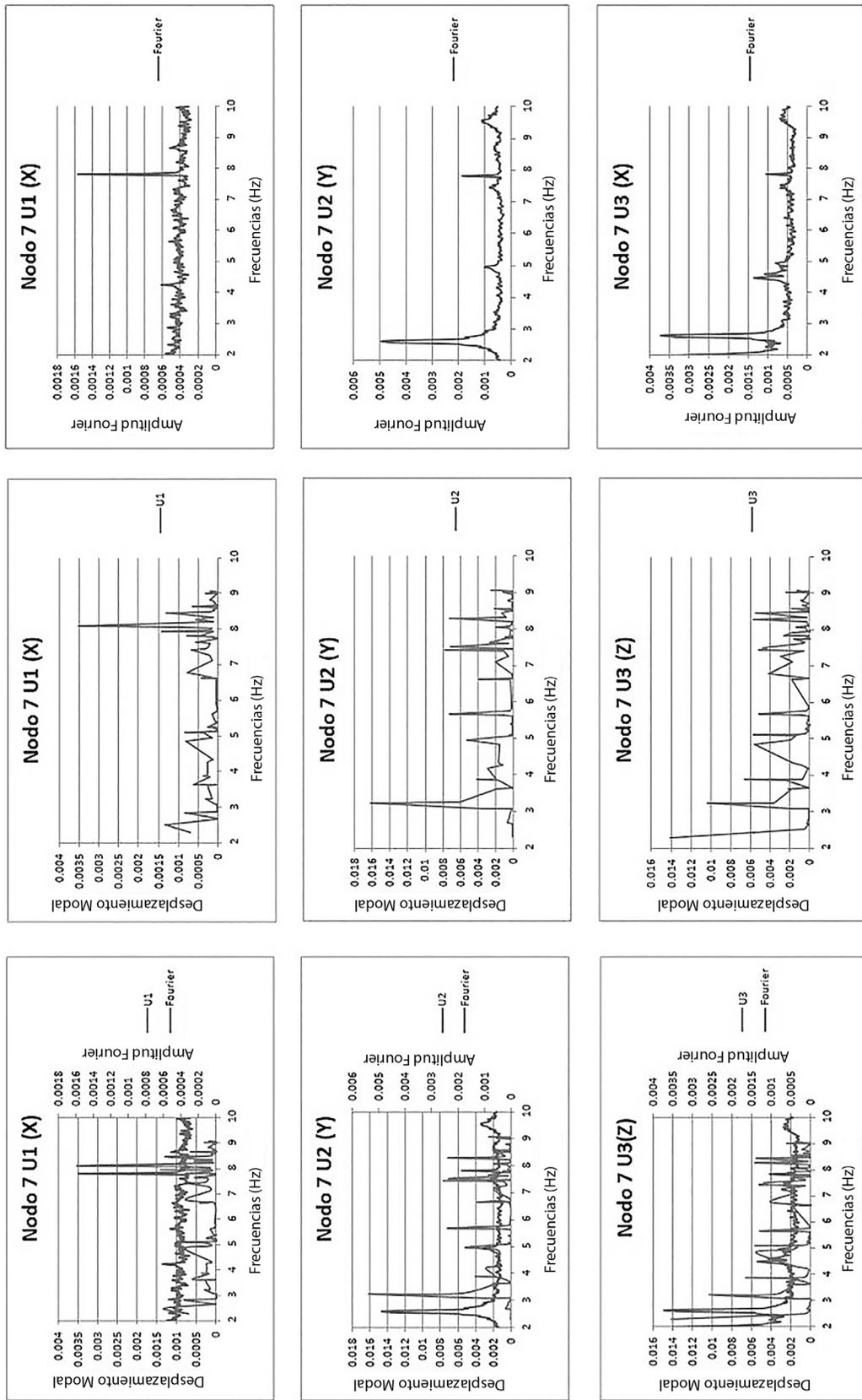


Figura 8. Comparación de frecuencias mediciones experimentales versus modelo analítico. Punto de medición A – nodo 7.

Cuadro 2. Frecuencias obtenidas para los nodos A y B

Eje/Frec.	"in situ"	Mod. Est.	% Dif
X	7.81	8.1	4%
Y, Z	2.6	3.23	20%
Z	1.96	2.23	12%

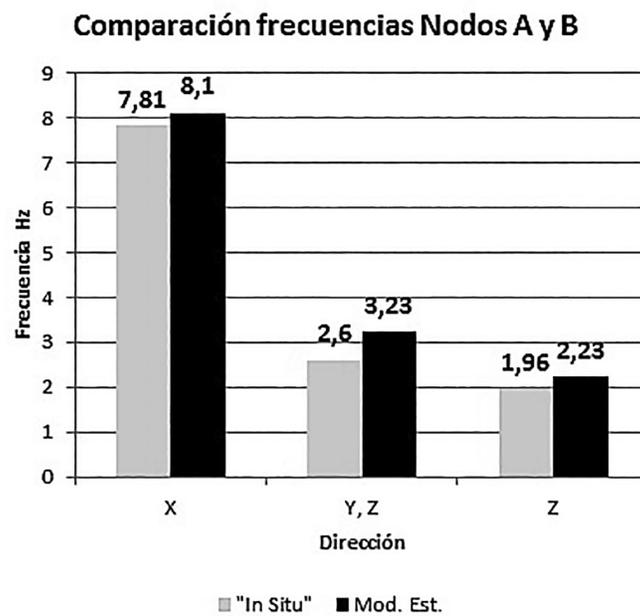


Figura 9. Comparación de frecuencias nodos A y B

Cuadro 3: Resumen de mediciones de vibración en puntos A, B y C

Pto. medición	Vibración	Mínimo	Máximo	Rango
A	eje X	-0,747	0,767	1,514
	eje Y	-2,52	2,512	5,032
	eje Z	-0,752	0,783	1,535
B	eje X	-0,847	0,769	1,616
	eje Y	-2,195	2,044	4,239
	eje Z	-0,959	0,889	1,848
C	eje X	-9,496	9,621	19,117
	eje Y	-10,002	9,996	19,998
	eje Z	-5,691	7,208	12,899

Cuadro 4: Aceleraciones máximas y mínimas en tramo cercha

Eje	Aceleración	Nodo A	Nodo B
Vertical (z)	Máxima	0.27 g	0.33 g
	Mínima	0.30 g	0.35 g
Longitudinal (x)	Máxima	0.37 g	0.39 g
	Mínima	0.38 g	0.37 g
Transversal (y)	Máxima	0.55 g	0.57 g
	Mínima	0.56 g	0.62 g

Los datos de las frecuencias de vibración medidas en sitio y la amplitud de las aceleraciones se introducen en gráficos de referencia que contienen diversos criterios de aceptación. La figura 10 muestra el caso de confort, en el cual para una aceleración máxima vertical de 0,35 g, con una frecuencia natural de vibración de 1,96 Hz (punto rojo), se ubica en la zona de intolerable a partir de 5-20 minutos (Wenzel, 2009).

La figura 11 presenta otro criterio de revisión, correspondiente al presentado por Chang (1973), en el que para la misma aceleración máxima vertical 0,35 g, con la frecuencias natural de vibración de 1,96 Hz, se tiene un nivel de entre D2 y D3, lo cual está entre ligeramente incómodo y extremadamente incómodo. Evidentemente es perceptible y la situación se corroboró en sitio.

La figura 12 es una propuesta tentativa como resumen general de criterios que proporciona un indicador crudo pero simple que, por supuesto, no se puede aplicar a ciegas a todas las estructuras. En términos generales, los criterios de aceptación de confort son mucho más estrictos que los criterios estructurales y por lo tanto se vuelven más críticos para fines de diseño estructural (Wenzel, 2009).

En el punto de medición A, con una aceleración pico vertical de 0,783 g y una frecuencia natural de 1,96 Hz (punto rojo), el valor pico de la vibración registrada en el eje z se localiza en una zona de percepción pero lejos del criterio estructural.

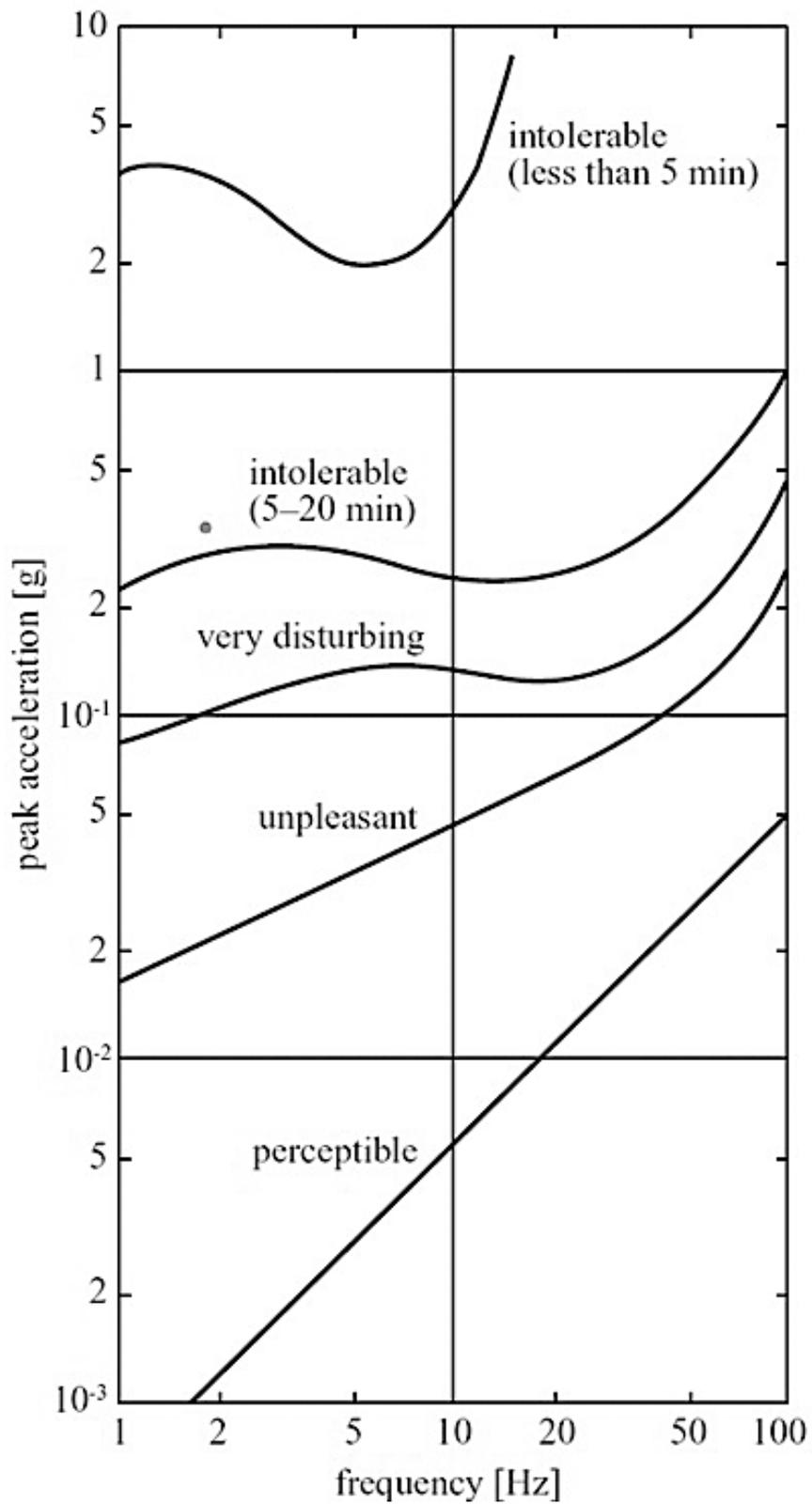
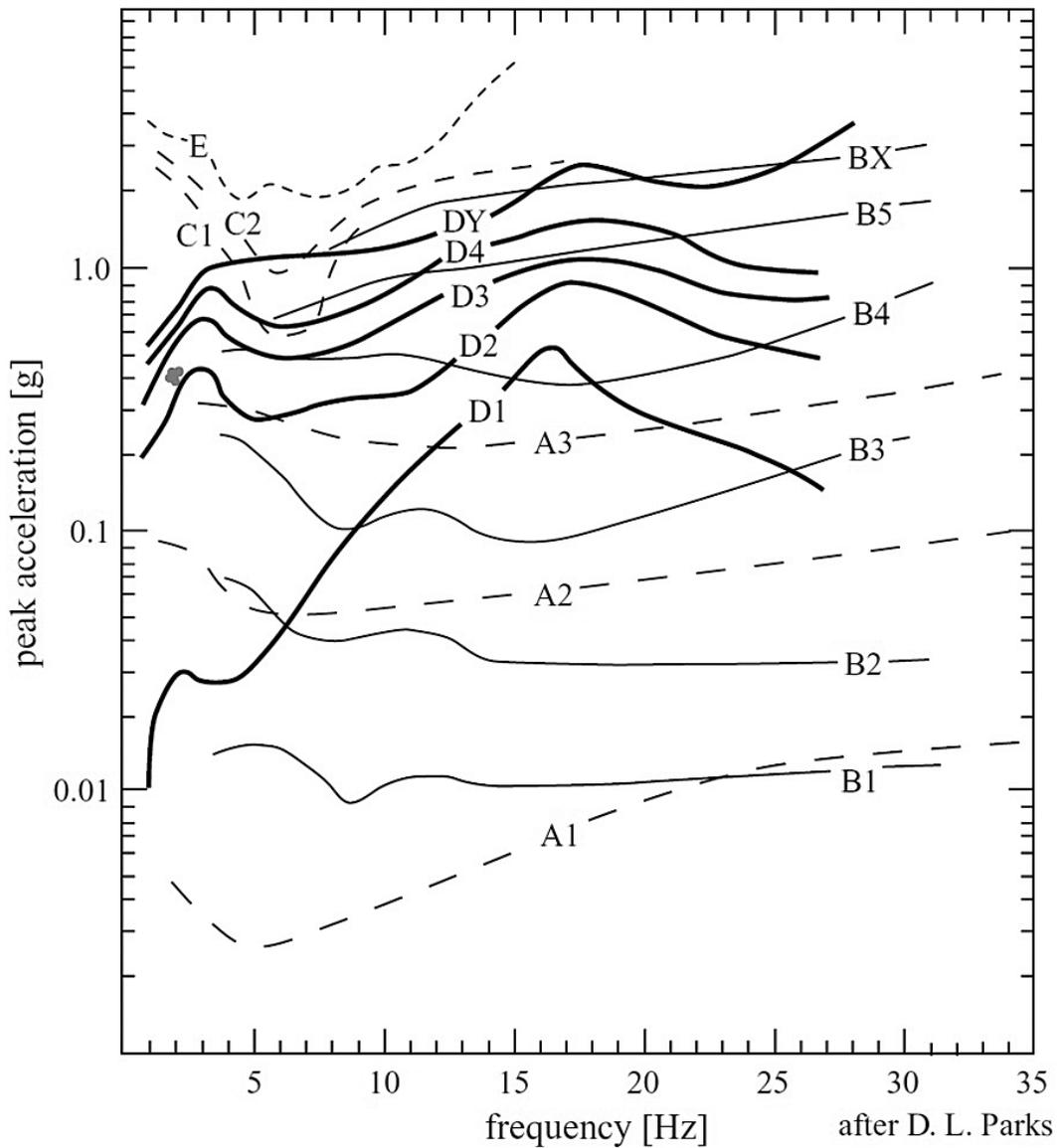


Figura 10. Tolerancias Confort para aceleraciones pico



- | | |
|--------------------------------------|--------------------------------------|
| A Goldman (1948) | C Magid & Coeman (1960) |
| A1 Perceptible | C1 3 min tolerance limit |
| A2 Unpleasant | C2 1 min tolerance limit |
| A3 Intolerable | |
| B Gorill & Snyder | D Parks (1961) |
| B1 Threshold of perception | D1 Definitely perceptible |
| B2 Definitely or easily perceptible | D2 Mildly annoying |
| B3 Irritating or annoying | D3 Extremely annoying |
| B4 Max tolerable for cont. operation | D4 Alarming |
| B5 Intolerable | DY Highest intensity called alarming |
| BX Highest intensity endured | E Zeigenruecker & Magid (1959) |
| | Short time tolerance |

Figura 11. Estudio de percepción de las aceleraciones (Chang 1973)

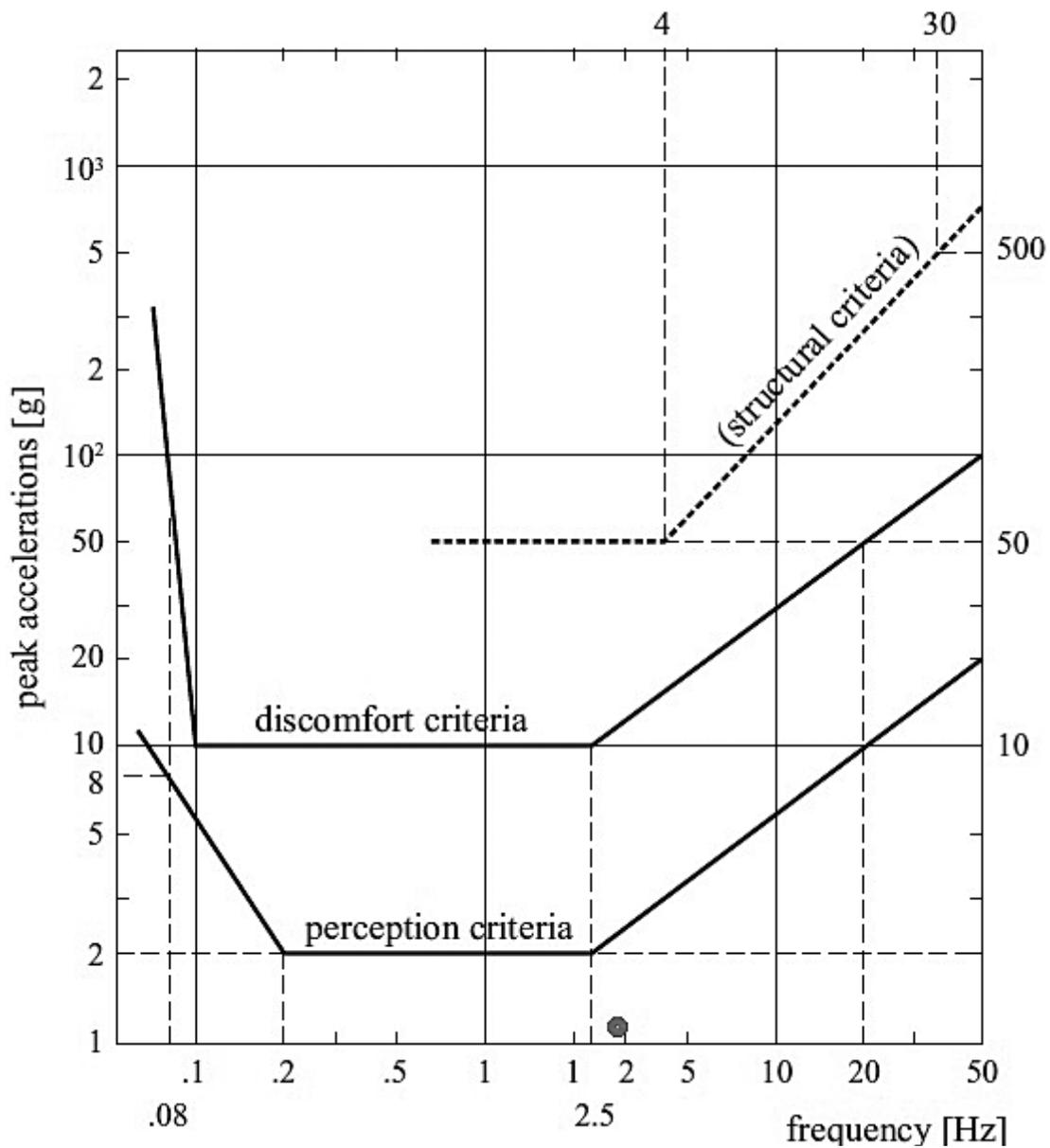


Figura 12. Criterio de aceleración pico

Medidas de esfuerzos dinámicos

La figura 13 muestra el registro de los datos de deformación dinámica en el punto de medición A. Se obtiene para este caso una deformación media de 1,27 $\mu\epsilon$ con un valor mínimo de -11,12 $\mu\epsilon$ y un valor máximo de 38,15 $\mu\epsilon$. El valor de percentil 95 para el esfuerzo de tensión dinámica es de 7,6 $\mu\epsilon$ (*microstrain*).

El cuadro 5 muestra los esfuerzos máximos calculados según las mediciones de deformación unitaria dada por los sensores, y los esfuerzos máximos en los mismos puntos provenientes del modelo teórico para fatiga.

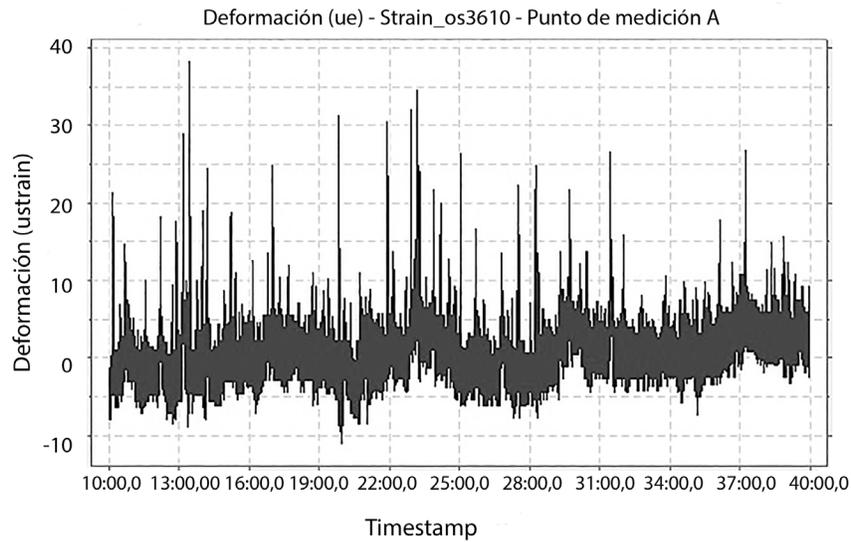


Figura 13. Deformación dinámica el punto de medición A

Cuadro 5. Esfuerzos máximos en los puntos A, B y C

PUNTO	ϵ ($\mu\epsilon$)	σ	σ_{Modelo}
	Percentil 95%	kg/cm ²	kg/cm ²
A	7,6	15,96	85,4
B	104,27	218,97	89,3
C	128,4	269,64	197,1
E=	2.10E+06	kg/cm ²	

Aunque los esfuerzos mostrados en el cuadro se obtuvieron para cargas distintas, ya que en el modelo teórico la carga es la de un vehículo de prueba de diseño y la deducida de los datos es una carga no cuantificada, se tiene que el orden de magnitud es similar y ratifica la validez del modelo teórico.

Conclusiones

- A partir de la excitación dinámica del tránsito regular de vehículos en el puente, fue posible obtener frecuencias naturales de vibración. Esto representa una ventaja al no ser necesario suspender este tráfico para realizar pruebas de impacto o de un excitador dinámico con frecuencia conocida para obtener la respuesta dinámica.
- De las mediciones de frecuencias en sitio se determinó que ante excitaciones dinámicas debido al tránsito regular de vehículos, el puente experimenta aceleraciones altas simultáneas en las tres direcciones (situación que se observó en sitio), lo cual no es normal en este tipo de estructuras.

- Para el tramo de cercha, en los nodos A y B, se determinaron las frecuencias de 7,8 Hz en la dirección longitudinal “x”, 2,6 Hz en las direcciones transversal y vertical “y” y “z”, y de 1,96 Hz en la dirección vertical “z”. Para el tramo de vigas, en el nodo C, se determinaron las frecuencias de 7,8 Hz en la dirección longitudinal “x”, 2,95 Hz en las direcciones transversal “y”, y de 2,65 Hz, 2,95 Hz y 8,36 Hz en la dirección vertical “z”.
- El comportamiento deducido del modelo de análisis teórico es similar y comparable al obtenido de los datos recopilados en sitio. Así, las frecuencias obtenidas en sitio se validan con el modelo estructural, las diferencias porcentuales son aceptables ya que en el modelo estructural no se puede reflejar en su totalidad el estado de rigidez actual del puente. Dichas diferencias se deben a factores como que el modelo tiene una rigidez mayor a la que realmente tiene la estructura, los materiales se están considerando isotrópicos y con características mecánicas iguales, además los nodos pueden tener una rigidez diferente a la que se está considerando en el modelo, también podría deberse a respuestas no lineales en los materiales.
- En el caso de los nodos A y B, se obtiene que su comportamiento evaluado en forma independiente es similar entre sí, ya que las frecuencias obtenidas en las tres direcciones son prácticamente iguales.
- Para las aceleraciones máximas determinadas para el tramo de cercha, al revisarlo con los criterios de aceptación, se obtiene que numéricamente se demuestra que es perceptible (situación que se confirmó en sitio), que está fuera de los niveles de confort, que presenta niveles que van de ligeramente a extremadamente molesto, que es intolerable a partir de 5 a 20 minutos, y que si no se le presta atención a dicha vibración podría llegar a estar en un nivel alarmante o cabe la posibilidad a futuro de que aparezcan algunos daños o fisuras debido a la intensidad de la vibración inducida por las cargas vivas, en las zonas de máximos esfuerzos en tensión de la superestructura.
- Resulta relevante darle seguimiento al comportamiento dinámico de la estructura en forma periódica anual, realizando las mediciones de vibración en los mismos puntos, con la finalidad de prevenir desviaciones importantes de las frecuencias naturales de vibración que evidencien cambios o algún tipo de daño en la estructura.

Bibliografía

- AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials). (2011). Non-destructive load testing (pp. 8.1-8.16). En *The Manual for Bridge evaluation*. 2 ed. Washington, D.C.: AASHTO Publications office.
- Chang, F. (1973). Human response to motions in tall buildings. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 98, 1259-1272.
- Davis, M., Bellemore, D., Berkoff, A., Kersey, A., Putman, M., Idriss, R., Kodinduma, M. (1996). *Fiber optic sensor system for bridge monitoring with both static load and dynamic modal sensing capabilities*. Recopilado el 2 de septiembre de 2013 de la base de datos SPIE Digital Library de la sociedad internacional de óptica y fotónica. Disponible en <http://spiedigitallibrary.org>
- Kumar, K. & Madhav, V. (2010). *Review on developments in fiber optical sensors and applications*. Recopilado el 20 de agosto de 2013 de la base de datos SPIE Digital Library de la sociedad internacional de óptica y fotónica. Disponible en: <http://spiedigitallibrary.org>
- Micron Optics, Inc. (2012). *Products Sensing Solutions Sensors*. Obtenido de http://www.micronoptics.com/products/sensing_solutions/sensors/
- Ortíz, G., Carranza, M., Navarro, F., Ureña, D., Vargas, K. (2014). *Informe inspección detallada sobre superestructura para identificar evidencia de fatiga, Puente sobre Río Virilla, ruta nacional No. 1*. Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Wenzel, H. (2009). *Health Monitoring of Bridges*. Viena: John Wiley & Sons, Ltd

Diseño e implementación de un sistema de recuperación de la temporización asíncrono totalmente digital

Design and implementation of an all-digital timing recovery system for asynchronous communication

José Jaime Valenciano-Rojas¹, Renato Rímolo-Donadio²

Fecha de recepción: 2 de setiembre del 2014
Fecha de aprobación: 14 de diciembre del 2014

Valenciano-Rojas, J; Rímolo-Donadio, R. Diseño e implementación de un sistema de recuperación de la temporización asíncrono totalmente digital. *Tecnología en Marcha*. Vol. 28, N° 2, Abril-Junio. Pág 33-43.

1 Estudiante de Ingeniería Electrónica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Teléfono: (506) 8899-3318. Correo electrónico: jjvr10@gmail.com

2 Profesor de la Escuela de Ingeniería Electrónica. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Teléfono: (506) 2550-9280. Correo electrónico: rrimolo@tec.ac.cr

Palabras clave

Modulación 4-PAM; procesamiento digital de señales; recuperación de la temporización; sistema de comunicación.

Resumen

Este trabajo describe el diseño e implementación de una unidad de recuperación de la temporización completamente digital, para un sistema de comunicación que utiliza recepción paralela de datos, con modulación 4-PAM, filtrado *Raised Cosine* y una frecuencia nominal de muestreo de 1,1 GHz. Se explica el diseño de los diferentes bloques dentro del sistema, así como los resultados pertinentes a las simulaciones y la implementación física en FPGA.

Keywords

4-PAM modulation; communication systems; digital signal processing; timing recovery.

Abstract

This work addresses the design and implementation of a timing recovery unit for a communication system with parallel reception, 4-PAM modulation, *raised cosine* filtering and a nominal sampling frequency of 1,1 GHz. The design of the building blocks within the system, as well as simulation results and the physical implementation in FPGA are discussed.

Introducción

En cualquier sistema de comunicación es necesaria la sincronización entre el transmisor y el receptor, con el fin de que los datos transmitidos se puedan interpretar correctamente. En sistemas asíncronos, uno de los problemas que lo impide y que debe ser solucionado corresponde a la diferencia o error en la frecuencia del reloj de recepción respecto a la frecuencia utilizada en la transmisión. Esto se debe a que, aunque se requiere que sean completamente iguales, se presenta una incertidumbre en la frecuencia de los osciladores utilizados y los retardos dentro del sistema, inherentes al proceso de su fabricación. Es por ello que se requiere una unidad capaz de corregir este problema, la cual se conoce como sistema de recuperación de la temporización (*timing recovery*).

Este artículo presenta parte del trabajo desarrollado como proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Electrónica (Valenciano, 2014), que consistió en el desarrollo de una unidad de recuperación de temporización totalmente digital para incorporarla a un sistema de comunicación más complejo que se está desarrollando en el marco de un proyecto de la Comunidad Europea denominado "FABULOUS". Dicho proyecto busca mejorar las técnicas de transmisión a través de fibra óptica, con el fin de incorporarlas en las redes de internet de alta velocidad en la Unión Europea. El trabajo se llevó a cabo en el *Istituto Superiore Mario Boella*, en Italia. Este artículo presenta información relacionada con el proceso de diseño, selección de la arquitectura de las etapas, verificación a nivel de simulación y, finalmente, las pruebas de implementación, realizadas en FPGA (*Field Programmable Gate Array*). En la figura 1 se muestra el diagrama de bloques de un sistema general de comunicación, el cual ilustra la necesidad de contar con una unidad de recuperación de la temporización en el lado del receptor.

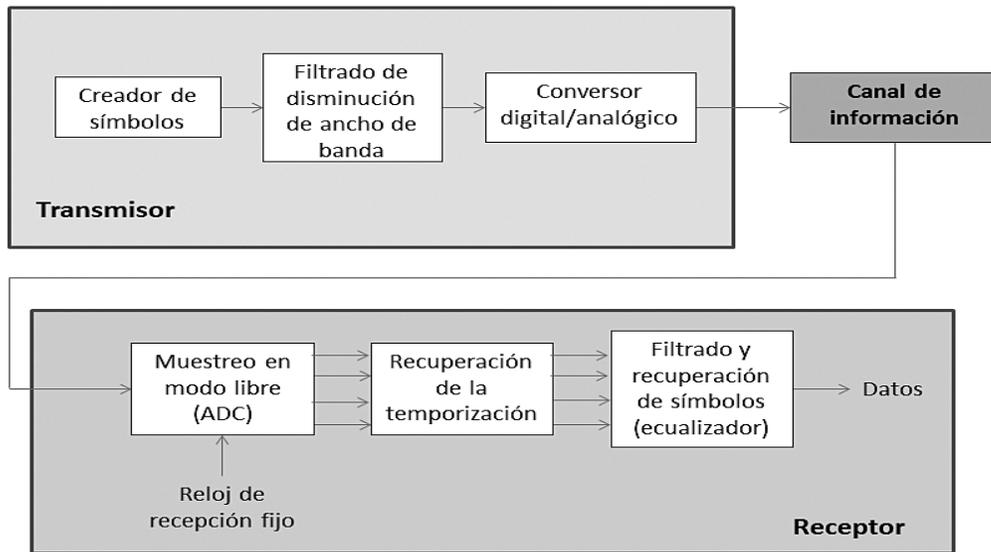


Figura 1. Diagrama de bloques de un sistema general de comunicación con unidad de recuperación de la temporización

Existen diversas implementaciones de este sistema de recuperación de la temporización, las cuales se conocen como completamente analógica, completamente digital o soluciones híbridas (Gardner, 1993).

Las unidades completamente analógicas presentan el cambio en el reloj mediante un VCO (*Voltage Controlled Oscillator*) luego de un procesamiento analógico que implica errores de fase, entre otros. Un ejemplo específico de este tipo de implementación es el PLL (*Phase Locked Loop*). En el caso de los sistemas híbridos, se busca del mismo modo un cambio en el reloj, sin embargo, el procesamiento de los errores se presenta digitalmente luego del muestreo de las señales.

Por otra parte, las implementaciones completamente digitales tienen la ventaja de minimizar los recursos. Al integrar toda la etapa en un sistema de procesamiento digital, no es necesario desarrollar ninguna etapa analógica, que usualmente conlleva mayor esfuerzo en el proceso de diseño y verificación. Además, tampoco se requieren interfaces digital-analógico como en el caso de soluciones híbridas. En ese trabajo se escogió una solución completamente digital por las razones antes mencionadas, para poder lograr una implementación directa en FPGA. En el sistema propuesto, la información se recibe de una forma paralela, con modulación 4-PAM (*Pulse Amplitude-Modulation*), un filtrado *Raised Cosine* con $\alpha=0,1$ y una frecuencia de muestreo nominal de 1,1 GHz.

En este tipo de sistema se obtienen las muestras con un reloj en modo libre (*free running*), es decir, el reloj toma los datos con una frecuencia fija, sin ser alterado a través del tiempo. Estas muestras son transmitidas a la unidad de procesamiento, en este caso, la FPGA de forma paralela, con cuatro muestras consecutivas. Posteriormente, el sistema se encarga de realizar cambios en dichas muestras, ajustando correctamente la temporización.

En la figura 2 se presenta una serie de gráficos correspondientes a las muestras recibidas, con las especificaciones mencionadas en cuanto a modulación y filtrado. En la figura, estas muestras se encuentran primeramente en serie y luego separadas en cuatro series de datos consecutivos de forma paralela, modo en que los recibe la unidad de procesamiento.

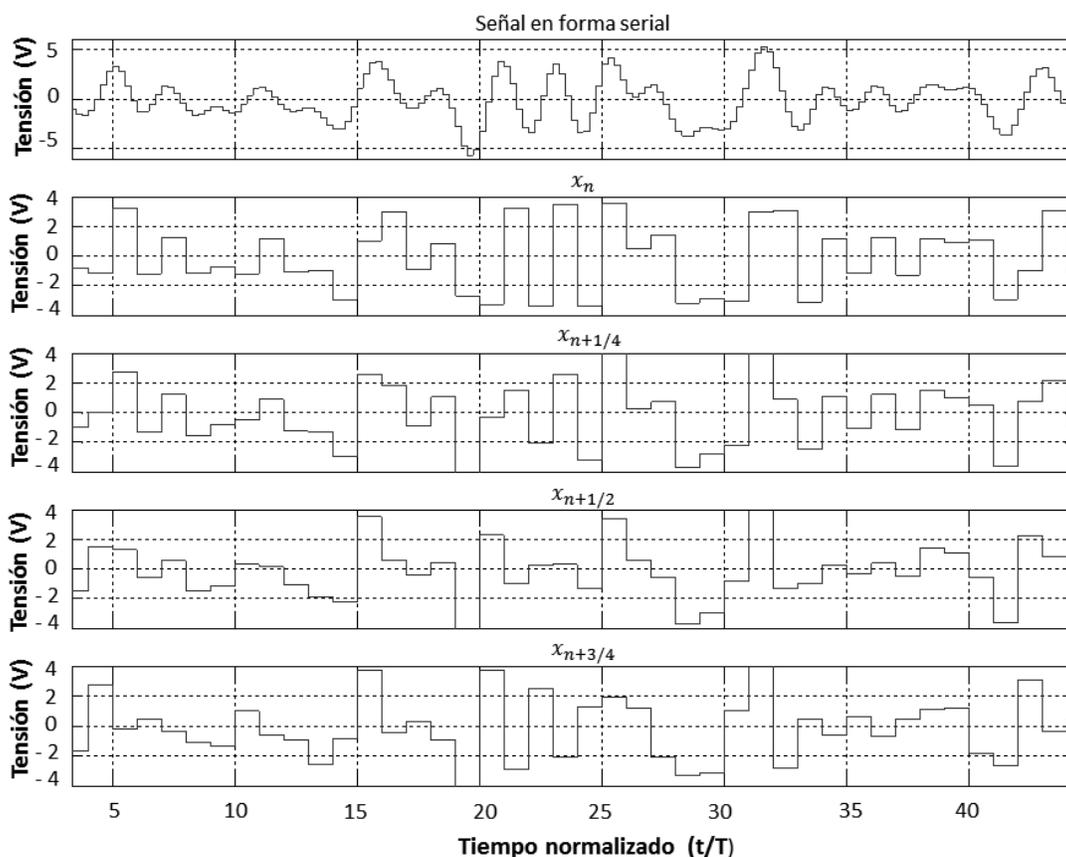


Figura 2. Muestras recibidas y transmitidas a la unidad de procesamiento, correspondiente a los datos recibidos en forma serial (gráfico superior) y las cuatro series de datos separadas. Las señales poseen cuatro niveles binarios porque se utiliza modulación 4-PAM.

Diseño de la estructura

Para el diseño de la estructura de recuperación de la temporización se recurrió a información presentada en distintas publicaciones y se adaptó a las especificaciones deseadas. Por ejemplo, en Qiang (2010) se presenta un estudio detallado de este tipo de etapas, a partir del cual se obtuvieron datos generales sobre la forma en que funcionan estas unidades digitales y sus subbloques.

Con base en este estudio se escogió la arquitectura descrita en la figura 3, que presenta el diagrama general de todo el sistema. En este diagrama se encuentra primero el interpolador, que se encarga de insertar el retraso en el sistema capaz de corregir el error en la temporización. Posteriormente, dentro del lazo de realimentación se encuentra el selector de muestras, que permite determinar con cuáles de las salidas del interpolador debe llevarse a cabo la detección del error. Luego se presenta el detector de errores de tiempo (TED) que, como su nombre lo indica, determina si el sistema presenta o no una correcta temporización. A partir de ahí se presenta el filtro de lazo, que se encarga de minimizar el ruido de la etapa anterior, además de permitir una estabilización en la ganancia de lazo, integrando los distintos errores en el tiempo. A partir de esta señal estabilizada es que la unidad de control permite realizar un ajuste a la misma para crear el nivel de retraso adecuado para la entrada del interpolador.

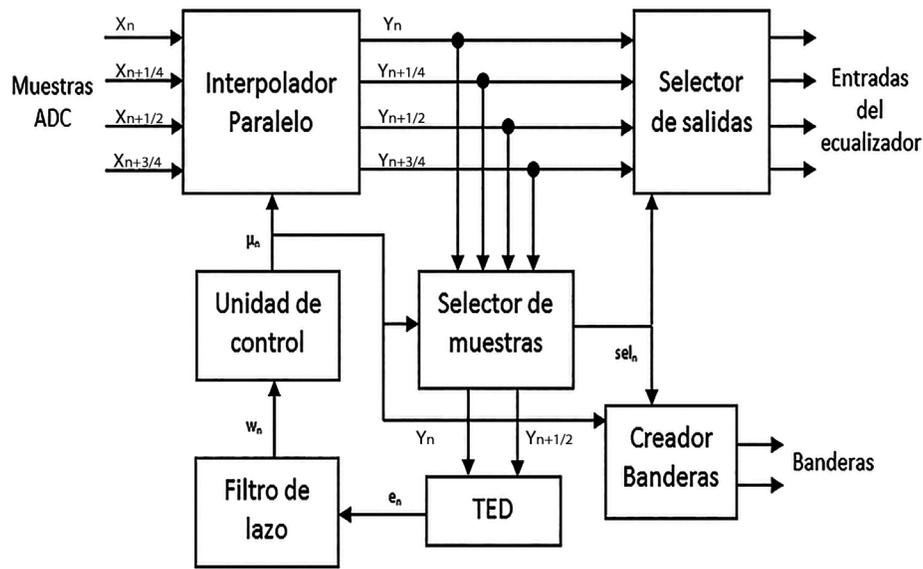


Figura 3. Diagrama general del sistema de recuperación de la temporización que se diseñó.

Se puede observar cómo el sistema continúa con la estructura paralela al final del mismo, en la cual los datos serán alineados correctamente por el selector de salidas para obtener la información con la temporización correcta, y así poder extraer adecuadamente los diferentes símbolos en el ecualizador. A continuación, se explicará con más detalle la función y el diseño de cada uno de sus bloques.

Interpolador

El interpolador corresponde al bloque que permite incorporar un retraso cuantificado en la señal, de acuerdo con una señal de control que posibilita ajustarlo.

En el diseño de esta estructura se utilizó la teoría correspondiente a la interpolación cúbica de Lagrange, que presenta poco error aún sin compensación por la respuesta en frecuencia, o sea, en presencia de una mayor cantidad de ruido (Erup, Gardner y Harris, 1993). Para este tipo de interpolación se utilizan cuatro muestras consecutivas y, aplicando una señal de μ entre 0 y 1, se realiza un retraso en el tiempo, donde con μ igual a 0 se da el retraso máximo (un tiempo de muestra) y con μ igual a 1 no hay retraso. Dentro de este rango, la señal puede tomar cualquier valor real, que estará limitado en la implementación por la resolución que se le dé dentro del sistema, la cual fue de 18 bits.

Las ecuaciones que describen este tipo de interpolación se describen a continuación (Meyr, Moeneclaey y Fechtel, 1998):

$$y_0(\mu, t_n) = \sum_{n=-3}^0 q_n(\mu)x(t_n) \quad (1)$$

$$q_{-3}(\mu) = \frac{1}{6}\mu^3 + \frac{1}{2}\mu^2 + \frac{1}{3}\mu \quad (2.a)$$

$$q_{-2}(\mu) = -\frac{1}{2}\mu^3 - \mu^2 + \frac{1}{2}\mu + 1 \quad (2.b)$$

$$q_{-1}(\mu) = \frac{1}{2}\mu^3 + \frac{1}{2}\mu^2 - \mu \quad (2.c)$$

$$q_0(\mu) = -\frac{1}{6}\mu^3 + \frac{1}{6}\mu \quad (2.d)$$

De las ecuaciones anteriores se observa que la salida interpolada y_0 responde a la señal de retraso temporal μ y las señales de entrada obtenidas en los tiempos discretos t_n , las cuales corresponden a las muestras enviadas por el convertidor analógico digital (ADC), que corresponde a un dispositivo capaz de recibir impulsos analógicos a través del tiempo y cuantificarlos en un valor digital.

La implementación de este sistema se realizó utilizando como referencia una estructura conocida como Farrow (Meyr, Moeneclaey y Fechtel, 1998), la cual permite diseñar el sistema utilizando solo operaciones de multiplicación, suma y resta, usando la señal de μ y cuatro muestras consecutivas.

A través de las ecuaciones se da la interpolación de una sola muestra, o sea, el $x_0(t_n)$ con su respectiva salida $y_0(t_n)$. Dado esto, como la estructura general de recepción de datos es paralela, se debe realizar un bloque interpolador para cada una de las muestras, alineando adecuadamente los datos consecutivos según corresponda.

Selector de muestras y detector de errores de tiempo (TED)

Esta estructura permite determinar los errores en la temporización de las muestras, con el fin de que puedan corregirse a través del lazo de realimentación.

Para realizar esta detección de errores, un algoritmo muy utilizado, debido a los pocos recursos que requiere (una multiplicación y una resta), corresponde al algoritmo de Gardner (1986).

$$e(n) = y\left(n - \frac{1}{2}\right) [y(n) - y(n-1)] \quad (3)$$

En la ecuación 3 la señal del error $e(n)$ responde solamente a las señales de y para las muestras n y $n-1$, que corresponden a las señales de salida del interpolador.

Como el algoritmo de Gardner utiliza dos muestras y cada símbolo tiene cuatro de ellas, se deben elegir solamente dos para realizar la detección del error, lo cual se lleva a cabo dentro del bloque selector de muestras. Este se encarga de cambiar los datos de entrada del TED cada vez que se da una transición de μ entre 0 y 1 o viceversa. Esto introduce una muestra más o una muestra menos, como se explicará posteriormente.

Filtro de lazo

Este bloque cumple con dos funciones. Una, eliminar el ruido proveniente del detector de errores, y dos, estabilizar la ganancia de lazo, de modo que se produzca un cambio adecuado en la señal de μ .

En la primera parte de esta estructura se encuentra el filtro *smoothing*, que permite eliminar el ruido del TED y preservar en la señal solamente el patrón necesario. En la ecuación 4 se encuentra la operación de este filtro. En el diseño utilizado se utilizó un λ de 0,99, que permite una buena respuesta en frecuencia, minimizando el ruido (Prandoni y Vetterli, 2013). Este parámetro λ permite determinar qué tan angosto es el ancho de banda del filtro, en el que mientras mayor sea su valor, la respuesta en frecuencia de corte es menor. La señal $ef(n)$ corresponde al valor del error de filtrado.

$$ef(n) = \lambda e(n - 1) + (1 - \lambda)e(n) \quad (4)$$

Para la segunda parte, la cual permite integrar los errores hasta que se produzca una ganancia de lazo casi constante, se utilizó una estructura PI digital. En ella, usando como referencia un diseño muy similar, con las mismas frecuencias de operación para un sistema híbrido (Ramírez et al., 2013), se obtuvieron las constantes $k_p=5$ y un $k_i=0,001$.

Unidad de control

Esta unidad tiene como función adecuar la señal de salida del filtro de lazo, de modo que presente la entrada adecuada para el interpolador, cumpliendo con las especificaciones de la señal de μ (rangos y valores). Para el diseño de esta estructura se recurrió a documentación que plantea las ecuaciones necesarias para su correcto funcionamiento (Cárdenas y Arévalo, 2010), las cuales se muestran a continuación:

$$n(k) = [n(k - 1) - w(k - 1)] \bmod 1 \quad (5)$$

$$\mu(k) \approx k_0 n(k) \quad (6)$$

En las ecuaciones 5 y 6, $w(k)$ corresponde a la salida del filtro de lazo y la señal de $\mu(k)$ es la que permite el control en el interpolador. Para el dimensionamiento de k_0 se recurrió a simulaciones en las que se ajustó su valor hasta que el funcionamiento fuera adecuado ante cualquier error en la frecuencia de recepción dentro de un rango establecido.

Creador de banderas y selector de salidas

Como ya se explicó, en este tipo de implementación totalmente digital, cada vez que la señal μ , como consecuencia de la estructura de módulo 1 en la unidad de control, pasa de un valor de 0 a un valor de 1 o viceversa, se crea una muestra más o una muestra menos, dependiendo de la transición.

Para corregir estos errores, primeramente, como el sistema posee una estructura paralela, se decidió utilizar una serie de multiplexores en el bloque llamado selector de salidas, que permite escoger y alinear correctamente los datos de salida, los cuales cambiarán en cada transición de 0 a 1 o de 1 a 0 de la señal de μ , según corresponda.

Cada cuatro de estas transiciones, se presentarán cuatro datos sobrantes o cuatro faltantes, ya que se fue acumulando el error. Es por ello que en dicho momento se presentará una bandera que indique si los datos son sobrantes o faltantes (una para cada caso), y se deben manejar en la siguiente etapa del sistema. Estas banderas se presentan en el creador de banderas.

Verificación e Implementación

La simulación del sistema se llevó a cabo a partir de descripciones de Código en el *System Generator de Xilinx*, y mediante la herramienta *Simulink de Matlab*. En conjunto, ambas herramientas permiten realizar verificaciones de funcionamiento de procesamiento digital de señales para sistemas con bloques predeterminados de FPGA, utilizando un entorno gráfico (Matlab-Xilinx, 2014).

De dichas simulaciones, se presenta en la figura 4 el comportamiento de la señal de μ , incluyendo el transitorio inicial que el sistema requiere para estabilizarse, denominado tiempo de enganche, para distintos porcentajes de diferencia entre la frecuencia del reloj de transmisión y recepción. La señal indica cuándo el sistema está actuando para compensar la diferencia entre

el reloj de referencia y la señal de entrada. Más detalles de los resultados de simulación se pueden encontrar en Valenciano (2014).

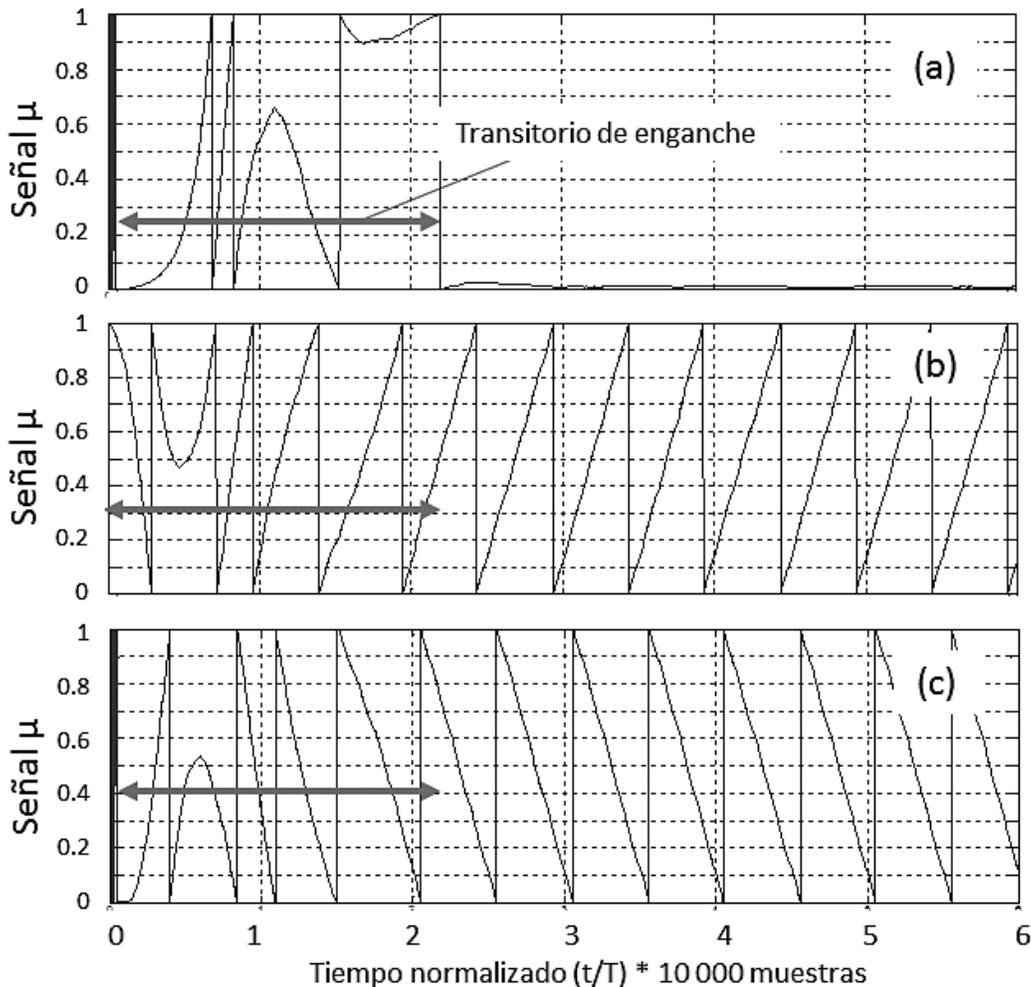


Figura 4. Transitorio de la señal de μ cuando el reloj del transmisor es: (a) igual, (b) 0,005% más lento y (c) 0,005% más rápido que el del receptor.

Posteriormente a las simulaciones, se utilizó la herramienta *System Generator de Xilinx* para generar un código VHDL que pudiera ser utilizado dentro de una FPGA. Con ello, se realizaron diferentes pruebas utilizando dos tarjetas FPGA, una transmisora y una receptora, donde la segunda poseía el código generado.

Para las pruebas, se obtuvo la señal de μ para distintas frecuencias en el reloj de transmisión, utilizando un reloj de recepción fijo. Estos relojes correspondieron a VCO con frecuencia nominal de 1,1 GHz, que fueron ajustados para realizar las distintas mediciones. Las diferentes frecuencias utilizadas se obtuvieron mediante un analizador de espectros. La figura 5 muestra el sistema físico utilizado para llevar a cabo las distintas pruebas.

La figura 6 muestra las gráficas de la señal de μ , que se obtuvo mediante un osciloscopio virtual ligado a la herramienta *Vivado de Xilinx*. La FPGA receptora utilizada corresponde a una *Virtex 7*.

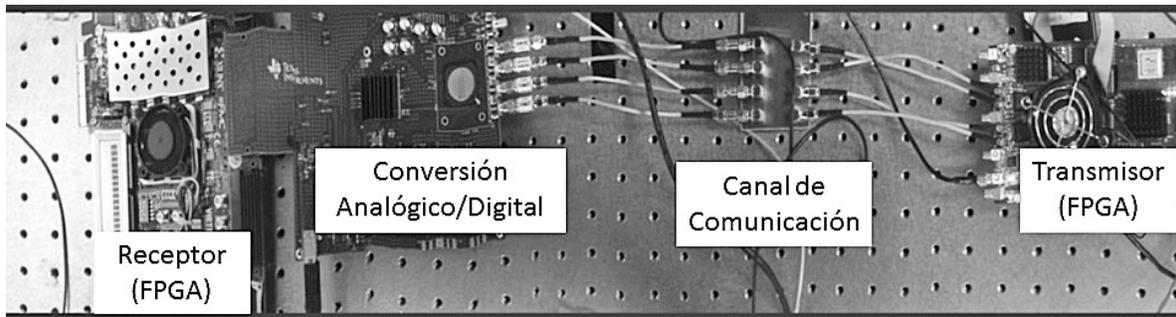


Figura 5. Sistema utilizado para las pruebas físicas de la implementación.

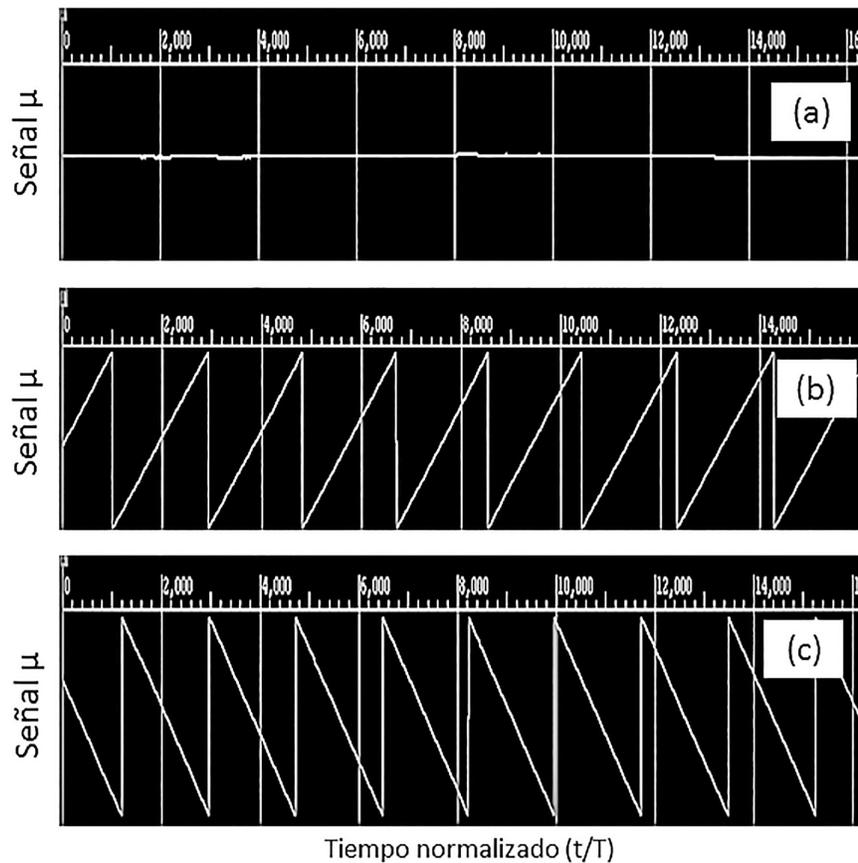


Figura 6. Resultados de implementación física para frecuencia de reloj transmisor de: (a) 1,099850 GHz (igual al receptor), (b) 1,099703 GHz y (c) 1,100005 GHz

Análisis de resultados

Se implementó una unidad de recuperación de la temporización completamente digital utilizando únicamente operaciones de suma, resta y multiplicación, que pueden ser implementadas de forma relativamente sencilla en cualquier sistema de procesamiento digital, con la velocidad adecuada de acuerdo con las especificaciones del sistema.

Ahora bien, analizando los resultados de las simulaciones, se observa primeramente que cuando el reloj de transmisión y el de recepción son iguales, la señal de μ se mantiene en un nivel casi constante luego del transitorio de enganche. Esto quiere decir que las muestras de entrada poseen una correcta temporización, y debe permanecer constante en el tiempo, tal y como se muestra en los resultados obtenidos por Erup, Gardner y Harris (1993).

Cuando existe un error en la frecuencia del reloj del receptor, se observa como esta presenta, luego del transitorio, una señal periódica en forma diente de sierra, que permite el ajuste correcto de la temporización. Se puede determinar que cuando el reloj del receptor es más rápido que el del transmisor, la señal de μ presenta una pendiente positiva, mientras que en caso contrario, la pendiente es negativa. También se puede apreciar que ante iguales porcentajes de diferencia en frecuencias, el periodo de μ es aproximadamente igual, es decir, el periodo de la señal depende de la diferencia de frecuencias que se está corrigiendo.

En cuanto a los resultados obtenidos para la implementación física, se observa que se mantuvo el mismo comportamiento en las señales de μ , en cuanto a pendiente y señales periódicas, dependiendo de la relación de las frecuencias de reloj utilizadas.

Cuando el sistema utilizó iguales relojes de transmisión y recepción, la señal de μ se mantuvo completamente constante. Por otra parte, cuando la frecuencia de transmisión fue mayor que la de recepción, se presentó el comportamiento periódico con pendiente negativa, y en caso contrario, pendiente positiva, tal y como se esperaba de las simulaciones.

Un resultado relacionado con el diseño, que es de suma importancia para los sistemas completamente digitales, corresponde a la presencia de datos faltantes y sobrantes, los cuales deben ser manejados posteriormente por otras etapas del sistema de comunicación. Estos datos aparecen debido al error acumulado de cuantificación y son intrínsecos a la implementación completamente digital. En este trabajo se propuso una solución mediante la utilización de banderas, que permiten indicar el tiempo exacto en el que se deben agregar o eliminar datos.

Conclusiones

Con este trabajo se logró el diseño e implementación de una unidad completamente digital para corregir el error presentado por la diferencia en frecuencias de los relojes de transmisión y recepción en un sistema de comunicación, el cual se basa en un retraso variable en el tiempo de las muestras obtenidas con un reloj trabajando en modo libre.

Con base en la señal de μ se corrige el problema de temporización, y de acuerdo con la diferencia de las frecuencias, esta va a ser una señal constante o una señal diente de sierra, la cual posee pendiente positiva cuando el receptor está procesando los datos más rápidamente que el transmisor y de pendiente negativa en el caso contrario.

Mediante la introducción de dos banderas se logró detectar el error introducido debido a datos sobrantes o faltantes, lo cual es un problema intrínseco de un sistema de recuperación de la temporización completamente digital, que se debe tomar en cuenta para las siguientes etapas del receptor, por ejemplo, el ecualizador.

Reconocimientos

Las simulaciones e implementaciones físicas incluidas en este trabajo se efectuaron en el *departamento Photonics del Istituto Superiore Mario Boella* en Turín, Italia, utilizando el equipo y herramientas de esta institución. Se le agradece a Paolo Savio, Silvio Abrate, Antonello Nespola y el centro en general por la oportunidad de realizar este trabajo y por la supervisión y el apoyo brindados.

Bibliografía

- Cárdenas, D. & Arévalo, G. (2010). All digital timing recovery and FPGA implementation. *Jornadas de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (FIEE)*, Disponible en línea [Mayo 2015]:
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/3705>
- Erup, L., Gardner, F. & Harris, R. (junio, 1993). Interpolation in digital modems. Part II: Implementation and performance. *IEEE Transactions and communications*, 41(6), 998-1008.
- Gardner, F. (mayo, 1986). A BPSK/QPSK timing-error detector for sampled receivers. *IEEE Transactions on communications*, 34(5), 423-429.
- Gardner, F. (marzo, 1993). Interpolation in digital modems. Part I: fundamentals. *IEEE Transactions on comunicaciones*, 41(3), 501-507.
- Matlab-Xilinx. (2014). *Xilinx System Generator and HDL Coder*. Obtenido de <http://www.mathworks.ch/fpga-design/simulink-with-xilinx-system-generator-for-dsp.html>
- Meyr, H., Moeneclaey, M. & Fechtel, S. (1998). *Digital communication receivers*. Canadá: Wiley-Interscience.
- Prandoni, P. & Vetterli, M. (2013). *Digital signal processing. Linear filters*. Suiza: École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Quang, D. X. (2010). *Digital resampling and timing recovery in QAM systems*. Tesis de maestría, University of Saskatchewan. Canadá.
- Ramírez, J., Nespola, A., Straullu, S., Savio, P., Abrate, S. & Gaudino, R. (septiembre, 2013). Hybrid clock recovery for a gigabit POF transceiver implemented on FPGA. *Journal of lightwave technology*, 31(18), 2988-2993.
- Valenciano, J. (2014). *Implementación de un sistema de recuperación de la temporización asíncrono ("timing recovery") para su incorporación en el proyecto europeo FABULOUS*. Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Herramientas de simulación libres y abiertas para el diseño de unidades de procesamiento de potencia para sistemas fotovoltaicos

Free and open source simulation tools for the design of power processing units for photovoltaic systems

Sergio Morales-Hernández¹, Carlos Meza-Benavides²

Fecha de recepción: 18 de setiembre del 2014

Fecha de aprobación: 10 de diciembre del 2014

Morales-Hernández, S; Meza-Benavides, C. Herramientas de simulación libres y abiertas para el diseño de unidades de procesamiento de potencia para sistemas fotovoltaicos. *Tecnología en Marcha*. Vol. 28, N° 2, Abril-Junio. Pág 44-60.

1 Profesor Adjunto, Escuela de Ingeniería en Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica
Correo electrónico: smorales@itcr.ac.cr

2 Profesor Adjunto, Escuela de Ingeniería en Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica
Correo electrónico: cmeza@itcr.ac.cr

Palabras clave

Sistemas fotovoltaicos; herramientas de simulación; convertidores de potencia.

Resumen

Las fuentes de energía renovable, entre ellas la solar fotovoltaica, requieren de circuitos electrónicos que sirvan de interface entre el dispositivo transductor y el dispositivo o sistema que utilizará la energía. Más aún, la eficiencia energética y el costo del sistema se pueden ver comprometidos si este circuito electrónico no ha sido diseñado de forma apropiada. Dado que, por un lado, las características eléctricas de los dispositivos fotovoltaicos son no lineales y, por otro, los circuitos electrónicos más eficientes son naturalmente discontinuos, se requiere un análisis dinámico detallado que permita optimizar el diseño. Dicho análisis debe ser apoyado por herramientas informáticas de simulación. En este artículo se hace una comparación entre dos herramientas informáticas de simulación de sistemas dinámicos para determinar su utilidad en el proceso de diseño de sistemas fotovoltaicos, principalmente en lo que corresponde a las unidades de procesamiento de potencia. Utilizando como caso de estudio un sistema fotovoltaico para la carga de una batería, se determinó que la herramienta Scicoslab facilita la simulación de sistemas dinámicos complejos, presentes en las unidades de procesamiento de potencia de los sistemas fotovoltaicos.

Keywords

Photovoltaic systems; simulation tools; power converters.

Abstract

Renewable energy sources, including solar photovoltaic, require electronic circuits that serve as interface between the transducer device and the device or system that uses energy. Moreover, the energy efficiency and the cost of the system can be compromised if such electronic circuit is not designed properly. Given that the electrical characteristics of the photovoltaic devices are nonlinear and that the most efficient electronic circuits for power processing are naturally discontinuous, a detailed dynamic analysis to optimize the design is required. This analysis should be supported by computer simulation tools. In this paper a comparison between two software tools for dynamic system simulation is performed to determinate its usefulness in the design process of photovoltaic systems, mainly in what corresponds to the power processing units. Using as a case of study a photovoltaic system for battery charging it was determined that Scicoslab tool was the most suitable.

Introducción

La energía solar es abundante y el proceso de conversión a energía eléctrica puede llegar a tener un impacto ambiental muy bajo. Los sistemas solares fotovoltaicos permiten el aprovechamiento de la radiación electromagnética producida por el sol por medios eléctricos. La tecnología fotovoltaica es hoy en día bastante madura y en muchas regiones del mundo su costo es comparable con el de las fuentes de energía tradicional.

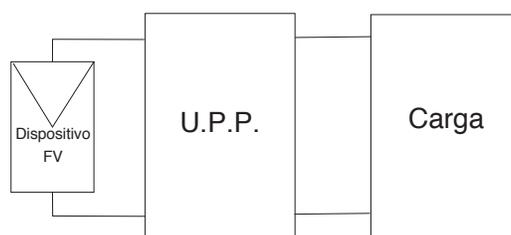


Figura 1. Diagrama de bloques representativo de un sistema fotovoltaico (U.P.P.: Unidad de Procesamiento de Potencia).

Un sistema fotovoltaico está conformado por uno o varios dispositivos fotovoltaicos (celda, panel o conjunto de paneles) y una unidad de procesamiento de potencia (ver figura 1). Las características eléctricas de un dispositivo fotovoltaico hacen necesario el uso de un circuito electrónico, denominado unidad de procesamiento de potencia (UPP), para aprovechar de forma óptima la energía que éste genera. Sin la UPP, el dispositivo fotovoltaico generaría menos energía de la que potencialmente puede producir. Esto se debe a que un dispositivo fotovoltaico presenta un punto de máxima generación de potencia definido por un par de valores de tensión y corriente determinados, tal y como se puede apreciar en la figura 2. Una de las tareas de la UPP es posicionar en todo momento el punto de operación del dispositivo fotovoltaico en su punto de máxima potencia. La otra tarea de la unidad de procesado de potencia es lograr que la carga que está siendo alimentada por el dispositivo fotovoltaico reciba un nivel de tensión y corriente adecuado (ver figura 1). Cargas típicas en sistemas fotovoltaicos son baterías, motores, luminarias o la misma red eléctrica.

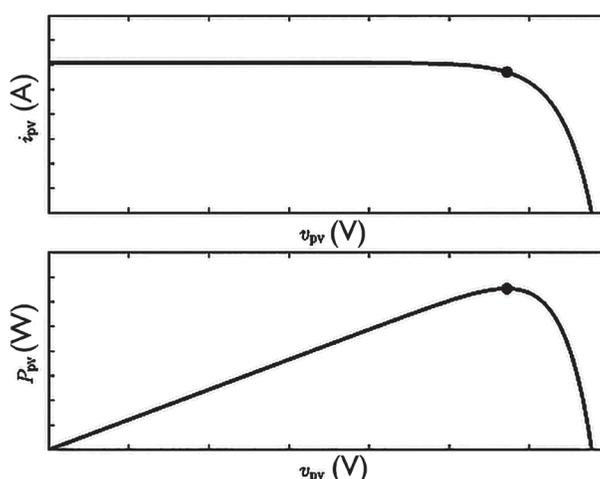


Figura 2. Curvas de voltaje vs. corriente y voltaje vs. potencia de un dispositivo fotovoltaico típico a temperatura e insolación constantes. El círculo rojo indica el punto de máxima generación de potencia.

Como se puede deducir de la figura 2, las características eléctricas de un dispositivo fotovoltaico son no lineales y en algunos casos la unidad de procesamiento de potencia también puede tener características eléctricas no solo no lineales sino también discontinuas. Esta situación requiere de un análisis detallado del sistema que, dada su complejidad, debe ser apoyado

por simulaciones numéricas. El uso de simulaciones numéricas permite realizar experimentos virtuales para probar potenciales soluciones y sistemas, reduciendo significativamente el tiempo de diseño y los errores en la implementación final.

El presente artículo tiene como objetivo identificar un conjunto de herramientas de simulación que pueden apoyar el proceso de diseño de sistemas fotovoltaicos, con un especial enfoque en el diseño de las unidades de procesamiento de potencia. Como se comentará más adelante, enfocarse en el análisis del comportamiento eléctrico de las UPP implica estudiar los transitorios del sistema que normalmente tienen una duración en el orden de los milisegundos. En consecuencia, las herramientas de simulación que se desean identificar no son aquellas que se utilizan para determinar el desempeño de un sistema fotovoltaico en períodos de meses o años, en estos casos ya hay varias herramientas maduras que logran obtener excelentes resultados (Turcotte et al., 2001). Por otro lado, este documento se concentra únicamente en herramientas que sean de acceso libre y abierto, no solo porque representan una opción más económica que las pocas alternativas comerciales existentes, sino porque, dado el carácter particular y reciente del sistema que se quiere estudiar, es necesario contar con herramientas lo suficientemente flexibles que permitan la modificación y alteración de algunas de sus rutinas y modelos.

El presente artículo está estructurado de la siguiente forma: primero se presentan las características eléctricas de los principales sistemas que se quieren simular, esto es, el generador fotovoltaico y la unidad de procesamiento de potencia. A partir de la caracterización de dichos sistemas se obtiene un conjunto de requerimientos que la herramienta de simulación de *software* debe cumplir. Luego, se presenta un conjunto de herramientas de *software* que cumplen de forma total o parcial los requerimientos identificados en la sección anterior. Finalmente, se muestran los resultados de una simulación prueba de sistemas fotovoltaicos con las herramientas seleccionadas y se discutirá cuál es la más apropiada para el enfoque planteado.

Características eléctricas de los principales componentes de un sistema fotovoltaico

Generador fotovoltaico

El efecto fotovoltaico convierte la radiación electromagnética en energía eléctrica. Un dispositivo fotovoltaico es aquel elemento que se diseña y construye con el objetivo de aprovechar al máximo el efecto fotovoltaico. Una de las características más útiles de estos dispositivos es su alta escalabilidad en potencia, esto es, que es posible generar potencias en un amplio rango desde unas decenas de miliwatts hasta gigawatts. Por ejemplo, la celda fotovoltaica más común es una oblea de silicio dopada de forma especial que puede generar entre 100 mW a 1 W. Es posible obtener potencias de entre 10 a 250 W construyendo matrices de celdas eléctricamente conectadas, normalmente en serie, conformando lo que se denomina un módulo o panel fotovoltaico. De igual forma, es posible conformar matrices de paneles fotovoltaicos para llegar a generar hasta decenas de gigawatts.

Existen distintos tipos de tecnologías de celdas fotovoltaicas, las cuales, tal y como se menciona, por ejemplo, en Zinsser, Makrides, Schmitt, Georghiou y Werner (2007), Cereghetti, Realini, Chianese y Rezzonico (2003), Friesen y colaboradores (2007a), Friesen y colaboradores (2007b), Chianese y colaboradores (2007) y Friesen y colaboradores (2010), responden eléctricamente de forma distinta a condiciones ambientales, y por lo tanto su comportamiento eléctrico responde a modelos matemáticos distintos. Por otro lado, el modelo general presentado en Meza y Ortega (2013) es lo suficientemente amplio para abarcar la mayoría de las tecnologías fotovoltaicas disponibles en la actualidad. La expresión matemática de este modelo es la siguiente:

$$i_{pv} = \Lambda(S, T, \rho_{pv}) - \Phi(S, T, v_{pv}, \rho_{pv}) \quad (1)$$

En donde

- i_{pv} es la corriente del generador fotovoltaico.
- v_{pv} es la tensión del generador fotovoltaico.
- S es la intensidad de radiación solar.
- T es la temperatura.
- ρ_{pv} es un conjunto de n parámetros que dependen de las características constructivas del dispositivo.

El modelo descrito en la ecuación (1) se puede adecuar a distintas tecnologías por medio de los siguientes parámetros:

- $\rho_{pv} = \{\rho_{pv1}, \rho_{pv2}, \dots\}$ cada tecnología tiene un valor de ρ_{pvi} y un número de parámetros determinados.
- la función Λ y la función Φ pueden ser distintas para cada tecnología.

Es importante destacar que el anterior modelo pretende representar propiedades comunes que tienen las distintas tecnologías fotovoltaicas en su comportamiento eléctrico, esto es,

- la función $\Phi(S, T, v_{pv}, \rho_{pv})$ es siempre positiva y estrictamente creciente con respecto a v_{pv} .
- $\Lambda(S, T, \rho_{pv})$ es siempre positiva y mayor que $\Phi(S, T, v_{pv}, \rho_{pv})$.

Existen tecnologías fotovoltaicas que tienen asociadas capacitancias parásitas (Friesen et al., 2007). En este caso, es necesario agregar al anterior modelo un componente dinámico de la siguiente forma, tal y como se indica en Meza, Virtuani y Chianese (2010):

$$i_{pv} = \Lambda(S, T, \rho_{pv}) - \Phi(S, T, v_{pv}, \rho_{pv}) - C(v_{pv}, \rho_{pv})\dot{v}_{pv} \quad (2)$$

La función $C(v_{pv}, \rho_{pv})$ es normalmente no lineal y dependiente de v_{pv} .

Con base en los anteriores modelos, podemos afirmar que la simulación del transiente eléctrico de un sistema que utilice un dispositivo fotovoltaico debería ser capaz de:

- Resolver funciones matemáticas no lineales.
- Preferiblemente resolver funciones implícitas. Nótese que según la ecuación (1), existe la posibilidad de que la corriente del dispositivo fotovoltaico aparezca tanto en la parte derecha como en la parte izquierda de la ecuación. Dependiendo de cómo sea la forma de Φ , será posible despejar o no la corriente con funciones matemáticas fundamentales. En algunos casos, utilizando funciones matemáticas como la función de Lambert W (Sharma, 2009) se puede despejar la corriente. En este caso, el sistema de simulación debería ser capaz de resolver esta función o permitir su programación.
- Resolver ecuaciones diferenciales no lineales, en el caso en que se utilice el modelo dinámico de la ecuación (2).

Unidad de procesamiento de potencia

Como se mencionó anteriormente, una unidad de procesamiento de potencia de un sistema fotovoltaico tiene dos objetivos principales:

1. Lograr que el dispositivo fotovoltaico esté siempre posicionado en el punto de operación de máxima potencia.
2. Lograr que la carga tenga un nivel de tensión y corriente determinados.

Dichos objetivos se obtienen por medio de dos elementos: el convertidor de potencia y el subsistema de control. El convertidor de potencia se entiende en este documento como el circuito electrónico conformado por componentes pasivos (inductores y capacitores) y activos (transistores, diodos, etc.), que permiten convertir niveles de tensión y de corriente. Algunos de los dispositivos activos del convertidor de potencia son controlados por medio del subsistema de control, el cual, con las mediciones de las variables eléctricas del convertidor de potencia, los valores de referencia y un algoritmo de control, genera las señales de control. La figura 3 muestra el diagrama de bloques de una unidad de potencia.

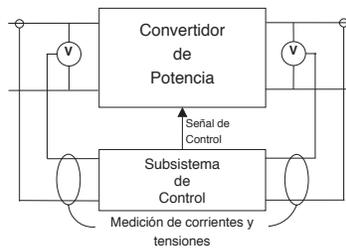


Figura 3. Diagrama de bloques de una unidad de procesamiento de potencia.

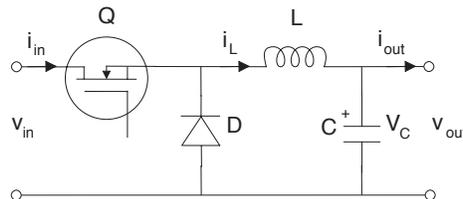


Figura 4. Circuito de un convertidor de potencia tipo reductor.

La gran mayoría de los sistemas fotovoltaicos utiliza convertidores de potencia conmutados. Estos convertidores consisten de capacitores, inductores, diodos y transistores (usualmente MOSFET). Estos últimos operan de forma conmutada con el fin de obtener menores pérdidas en el proceso de conversión. Un convertidor de potencia se puede modelar matemáticamente por medio de un conjunto de ecuaciones diferenciales que describen el proceso de carga y descarga de los elementos que almacenan energía dentro del circuito, esto es, el inductor y el capacitor. Por ejemplo, las ecuaciones que describen el comportamiento dinámico del convertidor reductor que se muestra en la figura 4 son las siguientes:

$$\frac{di_L}{dt} = u \frac{v_{in}}{L} - \frac{v_C}{L}$$

$$\frac{dv_C}{dt} = \frac{i_L}{C} - \frac{i_{out}}{C}$$

En donde

- i_L es la corriente en el inductor L.
- v_c es la tensión en el capacitor C.
- v_{in} es la tensión de entrada al convertidor.
- i_{out} es la corriente de salida del convertidor.
- u es la señal de conmutación del convertidor.

Nótese que en este caso u es discontinua, esto es, solo puede tomar los valores 0 o 1. En algunos casos es conveniente utilizar el modelo promediado del convertidor, descrito por las siguientes ecuaciones:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{i}_L \\ \bar{v}_C \end{bmatrix}$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\bar{i}_{out}}{C} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\bar{v}_{in}}{L} \\ 0 \end{bmatrix} d$$

En este caso d sustituye a u , en donde d es una señal continua comprendida entre 0 y 1. Es importante destacar que la simulación del modelo promediado no permite ver los efectos del rizado de conmutación en el sistema.

El subsistema de control es el encargado de conmutar los transistores del convertidor de potencia o equivalentemente de generar la señal u . La señal u también puede obtenerse a la salida de un generador de anchura de pulso en el caso en el cual el subsistema de control genere la señal d . Para generar esta señal, el subsistema de control puede utilizar un algoritmo empírico, ecuaciones diferenciales lineales o no lineales o ecuaciones en diferencia (sistemas discretos).

De esta forma, para la UPP, el sistema de simulación debe ser capaz de:

- Resolver numéricamente ecuaciones diferenciales lineales, no lineales, continuas y con discontinuidades.
- Resolver ecuaciones en diferencia.
- Permitir programar algoritmos empíricos (redes neuronales, lógica difusa, entre otros).

Finalmente, sería de mucha utilidad que el algoritmo o las ecuaciones dinámicas del subsistema de control pudieran exportarse de forma sencilla, para ser implementados en un microcontrolador o un sistema de prototipado rápido.

Herramientas de simulación

Scilab/Scicoslab: Scilab es un programa computacional científico para cálculos numéricos, que provee un poderoso entorno de computación abierta para aplicaciones científicas y de ingeniería. Scicos permite realizar modelados y simulaciones en forma gráfica de sistemas dinámicos, lo cual se ejecuta bajo Scilab. Scilab y Scicos han sido desarrollados por el Instituto Nacional Francés para la Investigación en Ciencias de la Computación (INRIA), desde 1990. Además del conjunto de funciones predefinidas de Scilab, un grupo de investigadores ha desarrollado nuevas e importantes funciones con propósitos educativos (por ej., Pendharkar,

2005 y Meza, Andrade-Romero, Alavarez y Coelho, 2010) y para el diseño de sistemas de control avanzados (por ej., Delebecque, 2000). Scilab ha sido utilizado en una amplia variedad de aplicaciones en investigación, tales como la identificación de fuentes de contaminación en ríos, descrita en Chancelier, Cohen, Maldinery y Pacard (1996) y en la mejora de las máquinas de prueba para fricción, mencionado en Dongping, Dongjie y Qiang (2007). Siendo un *software* científico altamente sofisticado y gratuito, ha podido ser utilizado ampliamente para propósitos educativos, tanto en países industrialmente desarrollados como en vías de desarrollo.

Python: es un lenguaje de programación de propósito general orientado a objetos diseñado para ser interpretado, esto es, está compuesto de un conjunto de instrucciones que deben ser convertidas a operaciones ejecutables por el computador. Esto hace que el lenguaje se pueda aprender de forma sencilla ya que el código creado se puede probar y depurar de forma rápida y fácil.

Python se ha extendido ampliamente en los últimos años debido sobre todo a las siguientes ventajas:

- Es libre y abierto y está incluido en la gran mayoría de las distribuciones de Linux.
- Está disponible para la mayoría de los sistemas operativos (Linux, Unix, Windows, Mac OS). Un programa escrito para un sistema se ejecuta en los otros sin necesidad de modificarlo.
- Es más fácil de aprender y produce código más fácilmente entendible que otros lenguajes de programación.
- Python y sus extensiones son fáciles de instalar.

Existen numerosas librerías y extensiones para Python. Una de las más útiles para la simulación de sistemas dinámicos es SciPy, que es una colección de algoritmos para el cálculo numérico, procesamiento de datos y operaciones matriciales, optimización y estadística, entre otros. El usuario puede utilizar estos algoritmos de una forma sencilla e intuitiva y de modo muy similar a otros lenguajes comerciales para uso científico, como Matlab.

Una de las grandes ventajas de usar Python con SciPy es, además de las ventajas de Python anteriormente mencionadas, que funciona como una forma flexible y útil de integrar librerías compiladas en otros programas como C, C++ y Fortran. Por estas razones, Python y SciPy se han usado para el modelado de sistemas dinámicos en múltiples y variadas aplicaciones, como el modelado de sistemas celulares (Olivier, Rohwer y Hofmeyr, 2005) y convertidores de potencia (Meza y Ortega, 2013).

Prueba de simulación y discusión

Con el fin de probar las herramientas de simulación identificadas, se utilizó un caso de estudio de un sistema fotovoltaico para la carga de una batería. Este sistema se muestra en la figura 5 y consiste de un panel fotovoltaico que alimenta a una batería por medio de un convertidor de potencia reductor. Las ecuaciones dinámicas que describen el comportamiento eléctrico de este sistema son las siguientes:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \frac{i_{pv}(x_1)}{C} - \frac{ux_2}{C} \\ \dot{x}_2 &= \frac{ux_1}{L} - \frac{E}{L} \\ i_{pv}(x_1) &= \Lambda - \Phi(x_1) \end{aligned} \quad (3)$$

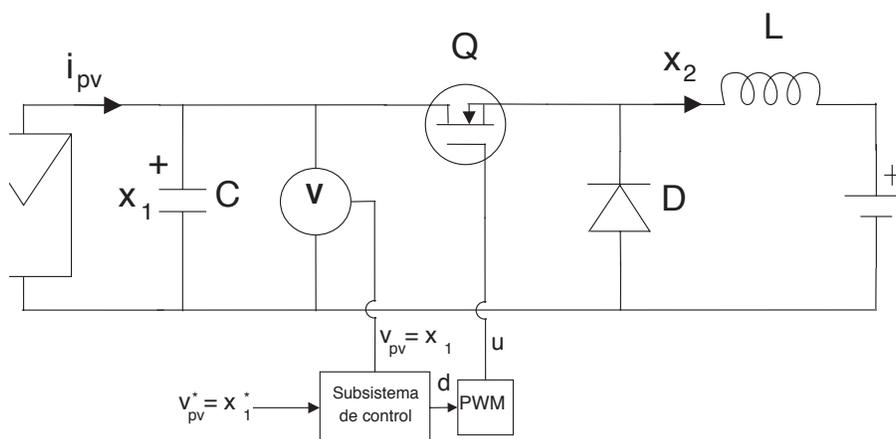


Figura 5. Circuito esquemático del caso de estudio utilizado para evaluar las herramientas de simulación.

en donde $\Phi(\cdot) = \psi e^{\alpha v_{pv}}$ y se considera que la radiación S y la temperatura T son constantes. El cuadro 1 muestra el valor de los parámetros utilizados para la simulación.

Cuadro 1. Parámetros del sistema descrito por la ecuación (3) para su simulación.

Parámetro	Valor	Unidades
ψ	0.0022	A
Λ	1.2	A
α	0.2	1/V
E	12	V
L	47	mH
C	0.1	mF

Como se puede observar en la figura 5, existe un subsistema de control que genera un ciclo de trabajo d que luego es utilizado por un modulador de anchura de pulsos para generar la señal u que controla la activación del transistor. El subsistema de control también está definido por medio de un conjunto de ecuaciones diferenciales que se muestra a continuación.

$$\begin{aligned}
 u &= K_p \tilde{x}_1 + K_I \omega \\
 \dot{\omega} &= \tilde{x}_1 \\
 \tilde{x}_1 &= x_1 - x_1^* \quad (4)
 \end{aligned}$$

en donde los parámetros K_p y K_I se utilizan para ajustar el comportamiento dinámico del sistema en lazo cerrado.

El subsistema de control debe asegurar que $d \in [0, 1]$. De esta forma, el modulador de anchura de pulsos, comparando d con una señal moduladora triangular o diente de sierra con una amplitud de 1, puede generar u . La expresión matemática que describe la operación del modulador de anchura de pulsos es la siguiente:

$$m = \frac{1}{T_s} - \left[\frac{1}{2} + \frac{t}{T_s} \right] + \frac{1}{2} \quad (5)$$

$$u = \begin{cases} 1 & \text{si } d > m \\ 0 & \text{si } d < m \end{cases}$$

en donde $\lfloor x \rfloor$ representa la función máximo entero (*floor*) que se define de la siguiente forma:

$$\lfloor x \rfloor = \max\{k \in \mathbb{Z} \vee k \leq x\}$$

esto es, la función máximo entero aplicado a una variable x devuelve el máximo número entero k no superior a x .

Llegados a este punto, es importante destacar que existen dos sistemas que se pueden analizar y estudiar. Uno que considera únicamente el comportamiento eléctrico del sistema de la ecuación 3 promediado en los periodos de conmutación del transistor y otro que sí toma en cuenta los efectos del sistema debido a la conmutación. Tal y como se mencionó anteriormente, el primer caso se obtiene de la ecuación 3 sustituyendo u por d . A continuación, se presentan los resultados de simulación para ambos casos.

Las condiciones iniciales y los parámetros para el método numérico utilizados se muestran en los cuadros 2 y 3, respectivamente. Los parámetros del subsistema de control utilizados fueron $K_p = 0.1$ y $K_f = 0.75$ con una señal de referencia $x_1^* = v_{pv}^* = 24V$.

Cuadro 2. Condiciones iniciales (cuando $t=0$) del sistema descrito por la ecuación (3) para su simulación.

Variable	Valor
$x_1 = v_{pv}$	31.51
$x_2 = i_{out}$	0
W	0

Cuadro 3. Parámetros para el método numérico utilizado para resolver las ecuaciones diferenciales del sistema simulado.

Parámetro	Valor
Máximo error absoluto permitido	1×10^{-8}
Máximo error relativo permitido	1×10^{-8}
Paso de integración máximo permitido	0.001
Tiempo de simulación	0.6
Cantidad de datos tomados en el tiempo de simulación	1×10^5

Simulación con Python

Se utilizó la versión 2.7.3 de Python con la extensión Numpy (ver 1.6.2) y las bibliotecas SciPy (ver 0.10.1) y Matplotlib (ver 1.1.1). El programa que describe el sistema a simular consistió en unas pocas líneas de código que utiliza, principalmente, el solucionador de ecuaciones diferenciales incluido en la biblioteca SciPy. Dicho solucionador está tomado de la colección de métodos numéricos descritos en la librería ODEPACK para Fortran. Este solucionador de ecuaciones diferenciales permite resolver numéricamente ecuaciones diferenciales ordinarias de tipo rígidas o *stiff*, que en varias ocasiones están presentes en sistemas dinámicos de convertidores de potencia. Los resultados de simulación del sistema promediado pueden observarse en la figura 6, los cuales se corresponden con el comportamiento esperado.

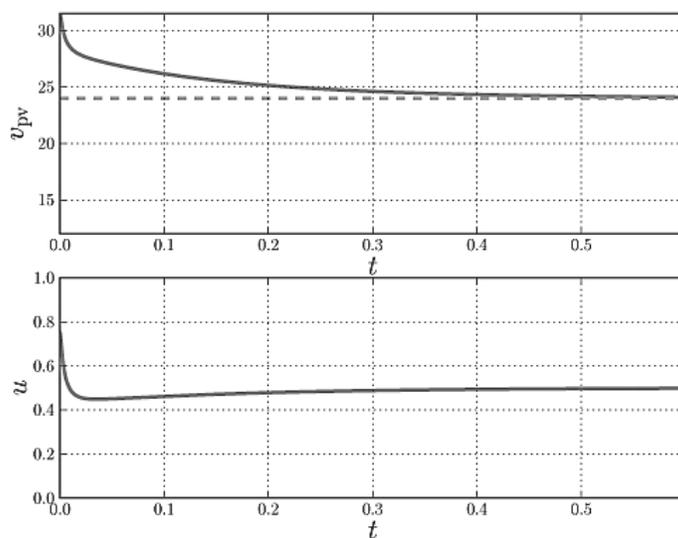


Figura 6. Resultados de simulación del sistema de la Figura 4 descrito por las ecuaciones 4 y 5.

Se pudo comprobar que Python y sus extensiones existentes no permiten de forma sencilla y directa simular sistemas dinámicos que deben realizar funciones guiadas por distintos períodos de tiempo. Este es el caso de la simulación del sistema en estudio tomando en cuenta las conmutaciones del transistor. En este sentido, es importante destacar que, en la mayoría de los casos, el subsistema de control es diseñado a partir del modelo promediado del sistema. Esto ocurre, por ejemplo, cuando se utilizan controles proporcionales e integrales tal y como el que está indicado en la Ecuación 4. Bajo estas condiciones, se parte del supuesto de que la señal generada por el control d permanecerá constante durante un ciclo de conmutación del transistor. Más aún, el subsistema de control debería recibir las señales promediadas o muestreadas de tal y como se indica en la figura 7. Si bien es cierto, los mencionados requerimientos no representan mayor problema para el análisis dinámico del sistema o para el diseño del subsistema de control, sí dificultan su implementación en Python. Como se dijo anteriormente, la dificultad radica en la necesidad de definir subsistemas que operan a distintos instantes, a saber, el sistema de ecuaciones diferenciales que es resuelto a un paso de integración dado y el sistema de promediado o muestreo de datos que debe resolver en un período de conmutación del transistor.

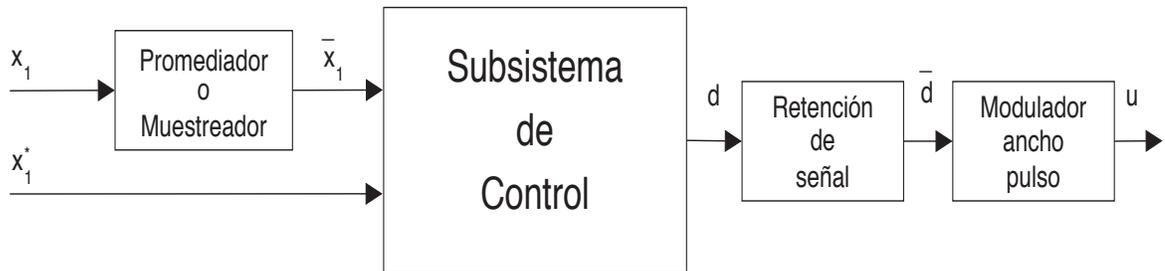


Figura 7. Subsistema de control que genera un ciclo de trabajo d para un modulador de anchura de pulsos.

Aunque es posible escribir código en Python para atender el requerimiento anteriormente mencionado, los autores consideran que resulta innecesario dado que, como se indica a continuación, existen otras herramientas que resuelven el anterior problema de forma muy sencilla.

Simulación con Scicos

Para esta simulación se utilizó la versión 4.4.1-1 de Scicoslab y la versión 4.4.1 de Scicos. Al igual que en el caso de Python + SciPy, Scicoslab y Scicos utilizan el paquete ODEPACK para la resolución numérica de ecuaciones diferenciales ordinarias.

Scicos permite definir un sistema dinámico por medio de un diagrama de bloques, con lo cual el caso de prueba se definió tal y como se muestra en las figuras 8 y 9. En la figura 8 se muestra el modelo del sistema promediado que se corresponde con el sistema simulado utilizando Python descrito en la sección precedente. Por otro lado, la figura 9 muestra el diagrama de bloques del sistema con el modulador de anchura de pulsos. Este sistema no se pudo simular en Python por las razones anteriormente expuestas, no obstante, gracias a la flexibilidad que ofrece la definición del sistema con bloques, este sí se pudo realizar en Scicos.

El resultado de la simulación en Scicoslab + Scicos con los parámetros de simulación de el cuadro 3 se muestra en las figuras 10 y 11. Nótese que para el modelo promediado se obtuvo la misma respuesta dinámica en Python y en Scicoslab (Figura 6 - Python y Figura 10 - Scicoslab). Así mismo, en la figura 11 se muestra un comportamiento promedio similar al de las figuras 6 y 10, pero en este caso es posible ver el rizado en la tensión del dispositivo fotovoltaico debido a la conmutación del interruptor (ver figura 12).

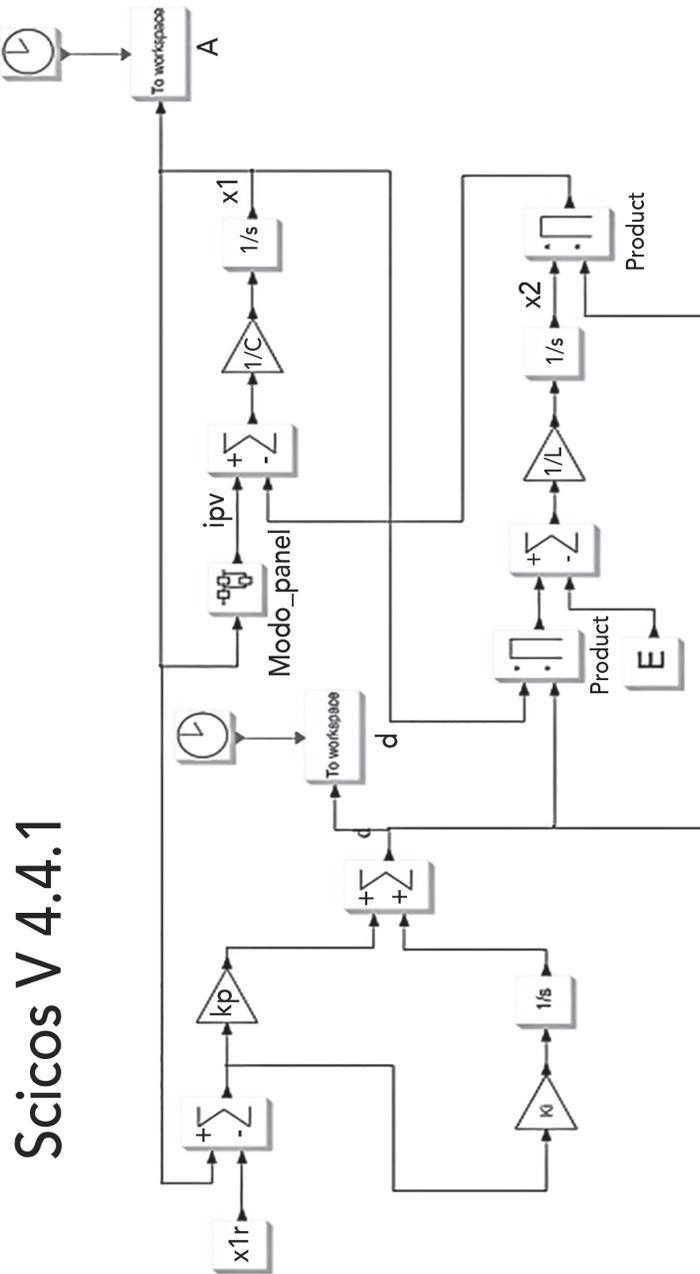


Figura 8. Diagrama de bloques del sistema promediado, equivalente a la simulación realizada con Python.

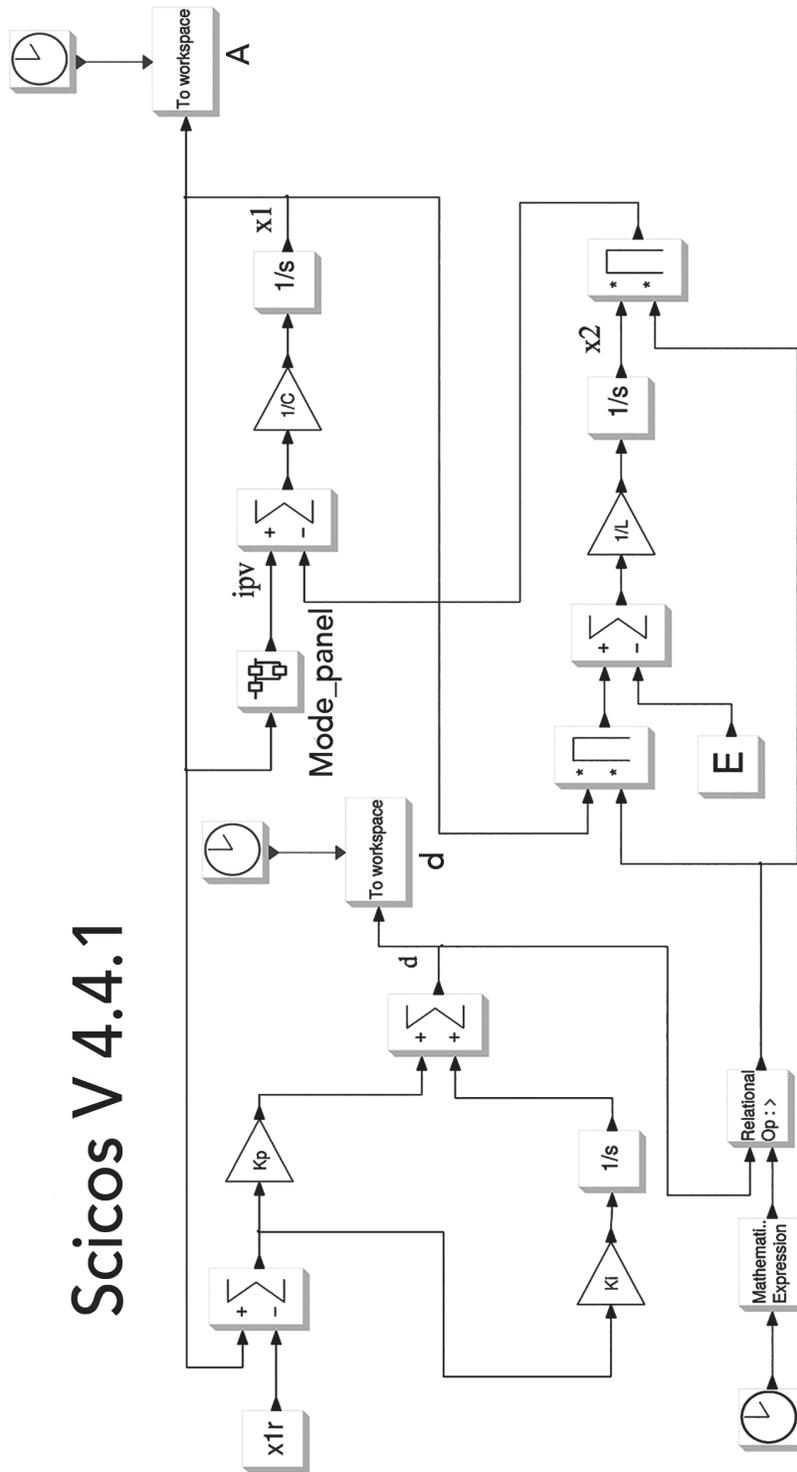


Figura 9. Diagrama de bloques del sistema con el control y el modulador de ancho de pulso.

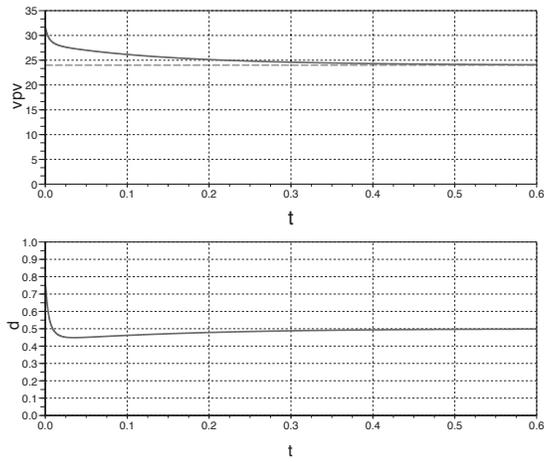


Figura 10. v_{pv} y u obtenidos de la simulación con Scicoslab + Scicos, para el sistema de la Figura 5 con el modelo de la Figura 8.

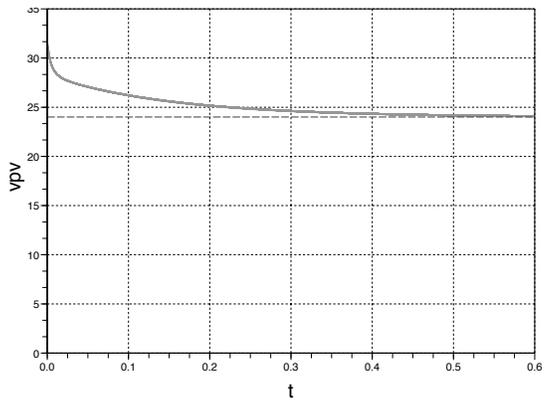


Figura 11. v_{pv} obtenido de la simulación con Scicoslab + Scicos, para el sistema de la Figura 5 con el modelo de la Figura 9.

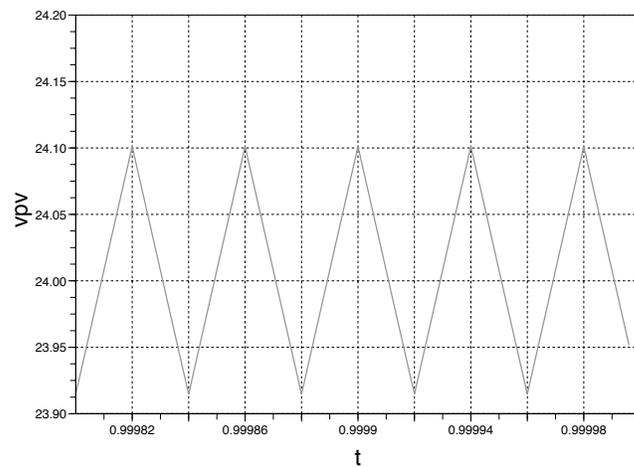


Figura 12. Rizado de la tensión v_{pv} mostrado en la Figura 11.

Conclusiones y recomendaciones

En el presente artículo se ha utilizado un sistema fotovoltaico para cargar una batería, como un caso de estudio que permita probar la versatilidad de dos herramientas de simulación de sistemas dinámicos, a saber, Python + SciPy y Scicoslab + Scicos. Dichas herramientas son abiertas y libres y pueden ser utilizadas en las plataformas informáticas más comunes.

Tanto Python como Scicoslab permitieron realizar simulaciones del sistema dinámico promediado, no así del sistema completo conformado por el control y el modulador de ancho de pulso, elementos presentes en los sistemas fotovoltaicos convencionales. En este apartado, el trabajo con Scicoslab se pudo realizar de forma sencilla, debido principalmente a que permite el desarrollo de simulaciones que requieren funciones guiadas por distintos periodos de tiempo. Esto último, si se quisiera desarrollar en Python, exigiría un esfuerzo importante en programación.

Pese a que Python es muy versátil debido a que permite integrar numerosas librerías para el cálculo numérico de manera sencilla, el desarrollo de procesos de simulación con cierto nivel de complejidad exige una inversión importante de tiempo en la etapa de programación. Por otro lado, Scicoslab brinda un ambiente gráfico que facilita el proceso de definición e implementación de sistemas dinámicos complejos, en los cuales es posible manejar diferentes tiempos de procesamiento, como, por ejemplo, para la resolución numérica de una ecuación diferencial ordinaria y el proceso de conmutación del transistor, ambas situaciones presentes en las unidades de procesamiento de potencia de los sistemas fotovoltaicos.

Bibliografía

- Boke, U. (septiembre, 2007). *A simple model of photovoltaic module electric characteristics*. European Conference on Power Electronics and Applications, 1-8.
- Cereghetti, N., Realini, A., Chianese, D. & Rezzonico, S. (2003). *Power and Energy production of PV modules*. IEEE 3rd World Conference in Photovoltaic Energy Conversion.
- Chancelier, J., Cohen, M., Maldinery, M. & Pacard, F. (1996). *Identification of pollution sources in rivers*. IEEE International Symposium on Computer-Aided Control System Design.
- Chianese, D., Friesen, G., Pasinelli, P., Pola, I., Realini, A., Cereghetti, N. & Bernasconi, A. (2007). *Direct Performance Comparison of PV Modules*. 22th European Photovoltaic Solar Energy Conference.

- Delebecque, F. (2000). *A slicot based control library for Scilab*. IEEE International Symposium on Computer-Aided Control System Design.
- Dongping, Q., Dongjie, Z. & Qiang, T. (2007). *Linux/rtai and Scicos in low cost high performance friction testing machine*. International Conference on Electronic Measurement and Instruments.
- Friesen, G., Gottschalg, R., Beyer, H. G., Williams, S., Guerin de Montgareuil, A., van der Borg, N., van Sark, W., Huld, T., Müller, B., de Keizer, A. C. & Niu, Y. (2007a). En *Intercomparison of different energy prediction methods within the European project performance – results of the 1st Round Robin*. 22th European Photovoltaic Solar Energy Conference.
- Friesen, G., Chianese, D., Pola, I., Realini, A. & Bernasconi, A. (2007b). En *Energy Rating Measurements and Predictions at ISAAC*. 22th European Photovoltaic Solar Energy Conference.
- Friesen, G., Chianese, D., Dittmann, S., Dominé, D., Burà, E., Strepparava, D., Margna, B., Denicolà, M., Meoli, R. & Pola, I. (2010). En *Performance intercomparison of 13 different PV modules based on indoor and outdoor test*. 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference.
- Gow, J. A. & Manning, C. D. (marzo, 1999). Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies. Electric Power Applications. *IEE Proceedings*, 146(2), 193-200.
- Kiusalaas, J. (2013). *Numerical Methods in Engineering with Python 3*. Cambridge University Press.
- Lasnier, F. (1990). *Photovoltaic Engineering Handbook*. Taylor & Francis.
- Liu, S. & Dougal, R. (2002). Dynamic multiphysics model for solar array. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 17, 285-294.
- Meza, C., Andrade-Romero, J. A., Alavarez, M. A. & Coelho, A. A. A. (2010). *Improving Control Engineering Education Using Foss Tools*. XVIII Congresso Brasileiro de Automatica, Bonito, Brasil.
- Meza, C., Virtuani, V. & Chianese, D. (septiembre, 2010). *Evaluation of models for the internal capacitance of a pvmodule for the design and simulation of power converters*. 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition.
- Meza, C. & Ortega, R. (2013). *Control and estimation scheme for PV central inverters*. XXIV IEEE International Conference on Information, Communication and Automation Technologies (ICAT).
- Olivier, B. G., Rohwer, J. M. & Hofmeyr, J. H. (2005). Modelling cellular systems with PySCeS. *Bioinformatics* 21.4 (2005), 560-561.
- Pendharkar, I. (2005) Rltool for Scilab: A public domain tool for SISO system design. *IEEE Control System Magazine*, 25, 23-25.
- Sharma, S. & Kapoor, A. (2009). PV Generator Driven First Order Circuit – Transient Analysis using LambertW Function. *The Open Renewable Energy Journal*, 2, 111-115.
- Turcotte, D., Ross, M. & Sheriff, F. (septiembre, 2001). Photovoltaic hybrid system sizing and simulation tools: status and needs. En *PV Horizon: Workshop on Photovoltaic hybrid systems*, Montreal, Canada.
- Zinsser, B., Makrides, G., Schmitt, W., Georghiou, G. E. & Werner, J. H. (2007). *Annual energy yield of 13 photovoltaic technologies in Germany and in Cyprus*. 22th European Photovoltaic Solar Energy Conference.

***Brucella abortus*: patogénesis y regulación génica de la virulencia**

***Brucella abortus*: pathogenicity and gene regulation of virulence**

Olga Rivas-Solano¹

Fecha de recepción: 19 de setiembre del 2014
Fecha de aprobación: 17 de diciembre del 2014

Rivas-Solano, O. *Brucella abortus*: patogénesis y regulación génica de la virulencia. *Tecnología en Marcha*. Vol. 28, N° 2, Abril-Junio. Pág 61-73.

¹ Ingeniera en Biotecnología, Máster en Microbiología, Estudiante del Programa de Doctorado en Ciencias de la Universidad de Costa Rica. Teléfono: (506) 2550-9026. Correo electrónico: orivas@itcr.ac.cr. Centro de Investigación en Biotecnología. Escuela de Biología, Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Palabras clave

Brucella abortus; Omp25; VirB; BvrR/BvrS; VjbR.

Resumen

Brucella abortus es un patógeno intracelular facultativo que pertenece a la subdivisión $\alpha 2$ de la clase Proteobacteria. Causa una brucelosis, una zoonosis ampliamente distribuida a nivel mundial. Los principales síntomas incluyen abortos y esterilidad en ganado, así como fiebre ondulante en humanos. En regiones endémicas como Centroamérica, la brucelosis tiene un alto impacto socioeconómico. En el Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) se desarrolló en fecha reciente un proyecto de investigación básica, con el objetivo de estudiar la regulación de algunos genes implicados en la virulencia, estructura e inmunogenicidad de *B. abortus*. Como parte de ese proyecto se elaboró el presente artículo de revisión de literatura. La virulencia de esta bacteria parece estar determinada por su habilidad para internalizarse, sobrevivir y replicarse dentro de fagocitos profesionales y no profesionales. *B. abortus* alcanza su nicho replicativo sin activar los mecanismos antimicrobianos de la inmunidad innata del hospedero. Esta bacteria posee sistemas de regulación génica a nivel transcripcional que le permiten una rápida adaptación al ambiente intracelular, entre ellos el sistema de transducción de señales de dos componentes BvrR/BvrS y el regulador de Quorum Sensing llamado Vjbr, así como otros factores de transcripción que, en conjunto, forman una compleja red de regulación génica.

Keywords

Brucella abortus; Omp25; VirB; BvrR/BvrS; VjbR.

Abstract

Brucella abortus is a zoonotic intracellular facultative pathogen belonging to the subdivision $\alpha 2$ of class Proteobacteria. It causes a worldwide distributed zoonotic disease called brucellosis. The main symptoms are abortion and sterility in cattle, as well as an undulant febrile condition in humans. In endemic regions like Central America, brucellosis has a high socioeconomic impact. A basic research project was recently conducted at the ITCR with the purpose of studying gene regulation of virulence, structure and immunogenicity in *B. abortus*. The present review was written as part of this project. *B. abortus* virulence seems to be determined by its ability to invade, survive and replicate inside professional and non-professional phagocytes. It reaches its intracellular replicative niche without the activation of host antimicrobial mechanisms of innate immunity. It also has gene regulation mechanisms for a rapid adaptation to an intracellular environment such as the two-component signal transduction system BvrR/BvrS and the quorum sensing regulator called Vjbr, as well as other transcription factors. All of them integrate a complex gene regulation network.

Descripción del género *Brucella*

El género *Brucella* está constituido por bacterias cocobacilares, Gram negativas, aerobias, no móviles, no esporuladas y no encapsuladas (Corbel y Brinley-Morgan, 1984). Filogenéticamente, se clasifican en la subdivisión $\alpha 2$ de las Proteobacterias (Moreno et al., 1990). Las Alfabroteobacterias agrupan patógenos de plantas y mamíferos, así como simbioses y organismos de vida libre. *Brucella* se comporta como un patógeno zoonótico intracelular facultativo (Ficht, 2010). En el cuadro 1 se describen las nueve especies reconocidas por

el Subcomité Internacional de Taxonomía de *Brucella*. Existe una especie adicional que fue propuesta en 2008 pero no ha sido aceptada (Banai y Corbel, 2010).

Cuadro 1. Especies reconocidas y propuestas del género *Brucella*.

Especies		Preferencia de hospedero	Patogenicidad para los humanos	Referencias bibliográficas
Reconocidas	<i>B. melitensis</i>	Cabras	Alta	Bruce, 1887
	<i>B. abortus</i>	Ganado vacuno	Alta	Bang, 1906
	<i>B. suis</i>	Cerdos	Alta	Huddleson et al., 1929
	<i>B. ovis</i>	Ovejas	Ninguna	Buddle, 1956
	<i>B. neotomae</i>	Rata del desierto	Ninguna	Stoenner y Lackman, 1957
	<i>B. canis</i>	Perros	Moderada	Carmichael & Bruner, 1968
	<i>B. ceti</i>	Cetáceos	Desconocida	Ewalt et al., 1994 Ross et al., 1994 Foster et al., 2007 ²
	<i>B. pinnipidialis</i>	Pinípedos	Desconocida	Ross et al., 1994 Foster et al., 2007
	<i>B. microti</i>	Zorros y roedores ¹	Desconocida	Scholz et al., 2008
Propuesta	<i>B. innopinata</i>	Desconocida ²	Alta	De et al., 2008 Tiller et al., 2010

¹ *B. microti* también se ha aislado del suelo; ² *B. innopinata* se ha aislado de implantes mamarios y biopsias de pulmón en humanos, pero aún no se ha encontrado un reservorio animal.

Fuente: Adaptado de Godfroid et al. (2011), Ficht (2010) y Banai y Corbel (2010).

El genoma de la mayoría de las brucelas posee dos cromosomas circulares, uno de de 2.1 Mb (cromosoma 1) y otro de 1.2 Mb (cromosoma 2). Entre ambos codifican aproximadamente 3500 genes (Michaux et al., 1993).

Características de la brucelosis

Las bacterias del género *Brucella* causan brucelosis, enfermedad endémica en países de Centroamérica y Suramérica, la cuenca mediterránea, el Norte y el Este de África, Medio Oriente y Asia (Corbel, 2006). La Organización Mundial de la Salud (OMS) considera la brucelosis como una de las siete zoonosis más extendidas a nivel mundial y menos priorizada por los sistemas de salud (http://www.who.int/zoonoses/neglected_zoonotic_diseases/en/index.html).

B. abortus presenta tropismo por el sistema reproductor del ganado vacuno. En los machos, la infección puede ocasionar epididimitis, orquitis o atrofia testicular; mientras que las

hembras infectadas desarrollan abortos, retención de placenta, infertilidad y disminución en la producción de leche (Songer y Post, 2005). En placentas de rumiantes, la replicación bacteriana intracelular destruye los trofoblastos y las bacterias se diseminan a los tejidos y fluidos cercanos. La transmisión de animal a animal se da generalmente por ingestión de material contaminado después del aborto, ya que las bacterias son eliminadas a través del feto, las membranas fetales y las secreciones uterinas (Corbel, 2006). De esta manera, se reanuda el ciclo de infección, replicación intracelular y muerte de la célula hospedera (Anderson et al., 1986a; Anderson et al., 1986b).

En humanos, *B. abortus* causa una infección caracterizada por síntomas inespecíficos como malestar, anorexia y postración. En ausencia de tratamiento, estos síntomas pueden persistir por semanas o meses. Algunos signos reportados son fiebre intermitente, engrosamiento del hígado, bazo o nódulos linfáticos (Corbel, 2006). La diseminación y multiplicación de la bacteria en los nódulos linfáticos, bazo, hígado, médula ósea y órganos sexuales ocurre, principal pero no exclusivamente, por medio de los macrófagos (Ko y Splitter, 2003). La infección puede tornarse crónica y presentar complicaciones osteoarticulares, gastrointestinales, hepatobiliares, pulmonares, genitourinarias, cardiovasculares y neurológicas, entre otras consecuencias potencialmente mortales (Corbel, 2006). Las vías de transmisión al ser humano incluyen la ingestión de productos lácteos no pasteurizados, el contacto directo con animales infectados y la inhalación de aerosoles bacterianos (Godfroid et al., 2005).

En América Central, las pérdidas económicas por brucelosis ascienden a US\$25 millones por año. Esta cifra resulta significativa si se considera que los países centroamericanos cuentan con bajos recursos y que la ganadería es una de las diez principales fuentes de ingresos de la región (Moreno, 2002). Además, el costo del tratamiento en humanos implica una inversión alta por parte de los sistemas de salud, ya que consiste en una terapia combinada de varios antibióticos durante periodos que van desde tres hasta ocho semanas (Akova et al., 1993; Ariza et al., 1985; FAO & WHO, 1986).

Patogénesis

En una gran parte de los patógenos bacterianos conocidos se han descrito factores de virulencia considerados clásicos, por ejemplo, cápsulas, fimbrias y exotoxinas. Sin embargo, la mayoría de estos factores no se han encontrado en *Brucella*. La virulencia de esta bacteria pareciera estar determinada por su habilidad para internalizarse, sobrevivir y replicarse dentro de fagocitos profesionales y no profesionales (Moreno y Moriyón, 2002; Moreno y Gorvel, 2004).

Brucella emplea distintas estrategias para invadir a sus células hospederas. En macrófagos, la cadena O del lipopolisacárido (LPS) liso de las bacterias no opsonizadas interactúa con moléculas receptoras ubicadas en la membrana de la célula hospedera, como ManR, entre otros. Luego es ingerida por medio de las balsas lipídicas. Generalmente ingresa a la célula hospedera mediante un mecanismo de fagocitosis tipo “zipper”, el cual se caracteriza por la inducción de rearrreglos moderados en la membrana y el citoesqueleto de la célula hospedera, aunque no se da un reclutamiento extensivo de actina (Porte et al., 2003; Moreno y Gorvel, 2004). Los macrófagos también pueden ingerir brucelas opsonizadas a través de receptores de Fc, de complemento o de fibronectina (Moreno y Gorvel, 2004). En células intestinales M y epiteliales, también se ha constatado el ingreso de *Brucella* por medio del mecanismo tipo “zipper”. En células HeLa, *Brucella* se une a receptores desconocidos en la membrana y penetra por fagocitosis con reclutamiento moderado de actina y activación de GTPasas pequeñas como Cdc42, Rac y Rho. La bacteria se une en mayor cantidad y se internaliza de manera más eficiente cuando las células HeLa se tratan con el factor citotóxico necrotizante

(CNF), el cual induce la formación de pliegues y fibras de estrés en la membrana de la célula hospedera (Guzmán-Verri et al., 2001).

En general, los fagocitos profesionales logran internalizar un alto número de bacterias debido a su naturaleza fagocítica (Celli et al., 2003). Sin embargo, la eficiencia de internalización en fagocitos no profesionales suele ser baja, lo que sugiere que no todas las células son permisivas, o bien que no todas las bacterias son capaces de unirse a fagocitos no profesionales (Sola-Landa et al., 1998). En macrófagos, la mayoría de las bacterias ingeridas son dirigidas a los fagolisosomas y muy pocas logran alcanzar el retículo endoplásmico, que es su nicho replicativo. Por el contrario, en células epiteliales, la mayoría de las bacterias ingeridas son dirigidas al retículo endoplásmico y en menor proporción a los lisosomas (Moreno y Gorvel, 2004).

Según el modelo propuesto por Celli et al. (2003), una vez que *Brucella* se internaliza en los macrófagos, escapa de la vía endocítica y se localiza en un compartimento no replicativo denominado BCV (*Brucella-containing vacuole*), el cual interactúa brevemente con los lisosomas, pero escapa de ellos y se transforma en una vacuola con pH ácido. Luego, interactúa de manera prolongada con el retículo endoplásmico e inclusive se fusiona de forma limitada con esta organela, lo que conlleva a la adquisición de algunas de sus propiedades como, por ejemplo, el pH neutro. Así, la BCV se transforma en una organela derivada del retículo endoplásmico que permite la replicación bacteriana.

Tanto en macrófagos como en células epiteliales, *Brucella* inhibe o retrasa la fusión de fagosomas y lisosomas (Ko y Splitter, 2003). Una vez que la bacteria alcanza su nicho replicativo, se encuentra protegida de antibióticos y factores bactericidas del hospedero como el complemento y los anticuerpos, lo cual facilita el establecimiento de una infección crónica (Roop et al., 2009). Luego de la replicación de la bacteria, la BCV se convierte en un compartimento con características autofágicas abreviado como aBCV. La formación de la aBCV requiere algunas proteínas que están implicadas en el inicio de la autofagia, pero es independiente de proteínas asociadas a la elongación. La aBCV es necesaria para completar el ciclo intracelular de *Brucella* y para la diseminación de la bacteria entre célula y célula, lo que demuestra que esta bacteria es capaz de apropiarse selectivamente de los complejos de iniciación de la autofagia para tomar control de la célula hospedera y promover la infección (Starr et al., 2012). *Brucella* también logra reconocer algunas señales de estrés (ácido o nutricional) a nivel intracelular para regular su propia expresión génica e incluso modificar algunas funciones de los fagocitos profesionales. Por ejemplo, puede inducir resistencia a la apoptosis en macrófagos, así como inhibir la capacidad de presentación de antígenos de las células dendríticas (Roop et al., 2009).

Determinantes bacterianos asociados a la patogenicidad

En patógenos Gram negativos, los componentes de la membrana externa pueden contribuir al establecimiento de la infección, pero también pueden convertirse en blancos para su neutralización por parte del hospedero (Cloekaert et al., 2002). En cambio, el lipopolisacárido (LPS) de *Brucella* presenta particularidades que contribuyen a su supervivencia intracelular, algunas de ellas ancestrales como, por ejemplo, su baja actividad biológica (no induce signos de sepsis, fase de respuesta aguda, reclutamiento de neutrófilos ni producción significativa de citoquinas), y otras intrínsecas, como su resistencia a péptidos catiónicos bactericidas producidos por el hospedero. El LPS de *Brucella* tampoco activa la vía alterna del complemento (Moreno y Moriyón, 2002; Ko y Splitter, 2003; Roop et al., 2009).

Brucella presenta además una reducción en los patrones moleculares asociados a patógenos (PAMPs), los cuales normalmente se ubican en la envoltura celular y son reconocidos por los

mecanismos antimicrobianos de la inmunidad innata del hospedero (Janeway et al., 2002; Lapaque et al., 2006; Moreno et al., 1981; Rasool et al., 1992; Barquero-Calvo et al., 2007).

Las bacterias del género *Brucella* presentan gran heterogeneidad en los componentes y en la topología de su membrana externa, lo cual se traduce en propiedades antigénicas y funcionales diferentes que influyen en la interacción con el hospedero. Las proteínas de membrana externa (OMP) de *Brucella* se clasifican en tres grupos de acuerdo con su peso molecular. El grupo 1 está constituido por OMP menos abundantes con pesos moleculares de 88-94 kDa. El grupo 2 consiste de porinas de 36-38 kDa, mientras que en el grupo 3 se incluyeron inicialmente proteínas de 25-27 kDa y posteriormente se incluyeron otras proteínas de 31-34 kDa. En *B. abortus* se encontró que las OMP de 25-27 kDa y las de 31-34 kDa están codificadas por los genes *omp25* y *omp31*, respectivamente, por lo que estas OMP se designaron Omp25 y Omp31. La secuenciación de genomas de las diferentes especies de *Brucella* ha revelado que existe una familia de siete OMP constituida por Omp31b, Omp25b, Omp25c, Omp25d, Omp22, Omp25 y Omp31. En conjunto, esta familia se conoce como Omp25/Omp31 y se ha visto que sus miembros se encuentran fuertemente unidos al LPS en la membrana externa. La familia Omp25/Omp31 posee proteínas ortólogas en otras alfaproteobacterias como *Rhizobium*, *Bartonella* y *Agrobacterium*. Algunas de estas OMP ortólogas están implicadas en la interacción hospedero-patógeno (Cloeckert et al., 2002).

Algunos patógenos Gram negativos presentan en su envoltura celular complejos multiproteicos conocidos como sistemas de secreción tipo IV (T4SS), que están implicados en la traslocación de efectores de virulencia a la célula hospedera (Backert y Meyer, 2006). En *Brucella* se ha descrito el T4SS VirB (Delrue et al., 2001) que está codificado por un operón de 12 genes. Los mutantes para el T4SS VirB no pueden controlar las interacciones de la BCV con el retículo endoplásmico y permanecen en compartimentos inmaduros que eventualmente se fusionan con los lisosomas. Por lo tanto, el T4SS VirB es esencial para el establecimiento de un nicho intracelular seguro que posibilite la supervivencia a largo plazo de la bacteria (Celli et al., 2003). Según Sieira y colaboradores (2004), la expresión del operón *virB* depende de la acidificación de la BCV y alcanza su máximo nivel a las 5 h post-infección pero luego es rápidamente apagada. de Jong y colaboradores (2008) describieron dos efectores traslocados por el T4SS VirB, denominados VceA y VceC, pero se desconoce su función. Marchesini y colaboradores (2011), por su parte, confirmaron por inmunofluorescencia el transporte de la proteína BPE123 a través del T4SS VirB. Esta es una proteína de 17 kDa altamente conservada en las especies de *Brucella* con genoma secuenciado. Además, presenta homología con proteínas descritas en otras alfaproteobacterias filogenéticamente relacionadas como *Ochrobactrum* y *Bartonella*. Sin embargo, BPE123 no es esencial para la virulencia de *B. abortus*. Los autores especulan que podría haber una redundancia en la función de los diferentes efectores secretados a través del T4SS VirB. Finalmente, de Barys y colaboradores (2011) identificaron otro efector designado como RicA que es traslocado a través del T4SS VirB y que recluta la GTPasa Rab2 del hospedero hacia la vacuola que contiene a la bacteria durante el tráfico intracelular de *Brucella*. Recientemente, Döhmer y colaboradores (2014) identificaron otro efector codificado en el locus Bab1_1492 y denominado SepA (*Secreted Effector Protein A*), el cual participa en etapas tempranas de la infección. Sin embargo, tampoco es esencial para la virulencia en ratones.

Regulación de la expresión de genes implicados en la virulencia

Generalmente, las bacterias están expuestas a condiciones ambientales cambiantes y para poder adaptarse deben alterar sus patrones de expresión génica. Los genes bacterianos están organizados como operones. Estos son un conjunto de genes que se encuentran bajo

el control de un mismo promotor, por lo que su transcripción puede ser apagada o encendida de manera simultánea para dar una respuesta rápida a los cambios ambientales (Ralston, 2008). Los procariotas emplean distintos mecanismos para regular la expresión de sus genes. A nivel transcripcional destacan, por ejemplo, los sistemas de transducción de señales de dos componentes (TCS) y el *quorum sensing* (QS), entre otros.

En general, los TCS comprenden una proteína integral de membrana con actividad histidina quinasa, que constituye el componente sensor, y una proteína citoplasmática separada conocida como componente regulador. La proteína sensora tiene dos dominios, uno extracelular que reconoce señales externas, y otro citoplasmático, que transduce la señal al interior celular. Cuando una señal es reconocida por el dominio extracelular del componente sensor, se produce un cambio conformacional en el mismo, lo que cual desencadena una autofosforilación del dominio citoplasmático en un residuo conservado de histidina. El sensor fosforilado interactúa con su proteína contraparte reguladora, estimulando la fosforilación de residuos de aspartato en su dominio receptor. Este, una vez fosforilado, puede unirse al ADN mediante su dominio efector regulando la transcripción de genes blanco (Dale y Park, 2004; López-Goñi et al., 2004). Se estima que en *Brucella* podrían existir alrededor de 15 TCS (Lavín et al., 2010).

El TCS BvrRS está constituido por BvrS y BvrR. La primera es una proteína sensora de 601 aminoácidos que está asociada a la membrana interna. Su extremo amino-terminal tiene dos dominios transmembrana y una región periplásmica, que son importantes para el reconocimiento de señales ambientales. Su extremo carboxilo terminal tiene un dominio citoplasmático de dimerización y autofosforilación, así como un dominio con actividad ATPasa. BvrS tiene secuencias altamente conservadas que son típicas de las proteínas sensoras de los TCS. La proteína BvrR, por su parte, contiene 237 aminoácidos y pertenece a la familia de reguladores génicos OmpR. Tiene un dominio regulador conservado en el extremo amino terminal y un dominio efector en el extremo carboxilo. En el dominio regulador hay presencia de residuos de aspartato y lisina altamente conservados que interactúan con grupos fosfato. El dominio efector tiene un motivo de unión a ADN (Sola-Landa et al., 1998; López-Goñi et al., 2002).

Sola-Landa y colaboradores (1998) realizaron una mutagénesis por transposición insertando el Tn5 en el genoma de *B. abortus* y posteriormente seleccionando mutantes sensibles a péptidos catiónicos que afectan la envoltura celular, como la polimixina B. Solo obtuvieron dos mutantes con estas características, uno para *bvrR* (*bvrR::Tn5*) y otro para *bvrS* (*bvrS::Tn5*). En ambos mutantes, el Tn5 interrumpió el marco de lectura de cada gen. Los dos mutantes han sido utilizados en estudios previos sobre el papel del TCS BvrR/BvrS en la virulencia de *B. abortus*, determinándose que ambos, en comparación con la cepa silvestre, aparte de ser sensibles a péptidos bactericidas, tienen mayor permeabilidad a surfactantes, invasión celular reducida, tráfico intracelular deficiente y ausencia de virulencia en ratones (Guzmán-Verri et al., 2002; Sola-Landa et al., 1998). Los mutantes *bvrR::Tn5* y *bvrS::Tn5* no presentan la proteína Omp25 (Guzmán-Verri et al., 2002) y expresan bajos niveles de las proteínas VirB1, VirB5, VirB8 y VirB9 (Martínez-Núñez et al., 2010). Un estudio de proteómica por espectrometría de masas con fragmentos de membrana externa liberados espontáneamente y recuperados a partir de sobrenadantes de cultivos bacterianos en fase de crecimiento exponencial, señaló que los mutantes por transposición expresan 167 proteínas de forma diferencial en comparación con la cepa silvestre y con la cepa *bvrR::Tn5* complementada con un plásmido que expresa BvrR. 25 de las proteínas diferencialmente expresadas corresponden a OMP. La expresión de aproximadamente la mitad de las OMP disminuyó, mientras que la otra mitad aumentó. Entre las OMP disminuidas se encuentran cinco proteínas de la familia Omp3 (que incluye Omp25), mientras que la expresión de cinco lipoproteínas se incrementó. También hubo una expresión diferencial de 60 proteínas periplásmicas, de las cuales el 80% aumentó su expresión en al menos uno de los dos mutantes por transposición. Las proteínas periplásmicas son importantes

para la captura y transporte de nutrientes, por lo que se cree que el incremento en las mismas está relacionado con una respuesta de los mutantes ante un posible estrés nutricional debido a la falta de algunas OMP (Lamontagne et al., 2007). Por otra parte, un análisis de transcriptómica reveló que el mutante *bvrR::Tn5* presenta, en comparación con la cepa silvestre, una expresión diferencial en 127 genes, entre ellos genes para OMP, lipoproteínas, biosíntesis de LPS y ácidos grasos, respuesta a estrés, flagelos, sistemas de transporte, metabolismo del carbono y desnitrificación, así como otros reguladores transcripcionales (Viadas et al., 2010). Estos datos, junto con los de proteómica, sugieren que el TCS BvrR/BvrS es un regulador global muy importante para la transición entre la vida extra e intracelular.

Cabe mencionar que el TCS BvrR/BvrS está altamente conservado en el género *Brucella* y en otras alfaproteobacterias filogenéticamente relacionadas. BvrR tiene 76-86% de similitud con BatR de *Bartonella bacilliformis* y con ChvI presente en *Mesorhizobium loti*, *Sinorhizobium meliloti* y *Agrobacterium tumefaciens*. BvrS, por su parte, tiene 59-68% de similitud con BatS de *B. bacilliformis*, ChvG de *A. tumefaciens* y ExoS de *M. loti* y *S. meliloti* (Cheng & Walker, 1998). En la bacteria fitopatógena *A. tumefaciens*, el TCS ChvI/ChvG es esencial para la virulencia. Los mutantes en este sistema no inducen la formación de tumores en el tejido vegetal, son sensibles a detergentes, antibióticos y pH ácido y presentan alteraciones en la permeabilidad de su envoltura externa (Charles y Nester, 1993; Mantis y Winans, 1993). En el endosimbionte de plantas *S. meliloti*, el TCS ChvI/ExoS está implicado en el control de la interacción entre la bacteria y la célula hospedera, la producción de succinoglicano, la movilidad flagelar, la formación de biofilms, la utilización de nutrientes y la simbiosis (Chen et al., 2008).

El TCS *bvrR/bvRS* afecta positivamente la transcripción de un regulador génico de tipo QS similar a LuxR denominado VjbR (*Vacuolar Jacking Brucella Regulator*) (Martínez-Núñez et al., 2010). El QS es un mecanismo de comunicación celular para sincronizar la expresión génica en una población bacteriana. Consiste en la liberación al medio externo de pequeñas moléculas autoinductoras. Conforme aumenta la densidad poblacional, se incrementa la concentración extracelular del autoinductor hasta alcanzar un umbral determinado. En este punto la molécula señal es reconocida por receptores y, como consecuencia, se activan o reprimen factores de transcripción citoplasmáticos que regulan la expresión génica de forma coordinada en la población bacteriana (Bassler, 1999).

Los mutantes en *vjbR* presentan un fenotipo atenuado en cultivos celulares (macrófagos y células HeLa) y en ratones infectados experimentalmente (Delrue et al., 2005). Además, presentan cambios en la superficie celular (Uzureau et al., 2007). En *B. melitensis*, Vjbr regula la expresión de algunas OMP implicadas en la virulencia (Uzureau et al., 2010; de Jong et al., 2008). En *B. abortus*, VjbR activa directamente la transcripción del T4SS VirB mediante unión al promotor del operón *virB* y a la región intergénica entre *virB1* y *virB2*. También activa la transcripción de *vceA* y *vceB* que codifican para dos efectores del T4SS VirB (de Jong et al., 2008). Por último, está implicado en la regulación de genes flagelares (Léonard et al., 2007).

Además de VjbR, en *Brucella* se ha reportado otro regulador de QS, denominado BlxR (*Brucella LuxR-like Regulator*) (BlxR también es conocido como BabR) (Rambow-Larsen et al., 2008). VjbR activa la transcripción de *blxR* y, por el contrario, BlxR reprime la expresión de *vjbR*. Además existen 27 genes blanco regulados por ambos mecanismos de QS. Para el 55% de ellos, los dos reguladores actúan de forma opuesta. Según la etapa de la infección, pareciera existir una interregulación entre VjbR y BlxR (Rambow-Larsen et al., 2008; Uzureau et al., 2010). Se cree que VjbR actúa al inicio de la infección, posibilitando la adaptación temprana a las condiciones de estrés que predominan en la BCV, disminuyendo el metabolismo básico (para evitar la replicación bacteriana mientras la vacuola madura) y promoviendo el ensamblaje del T4SS, que es importante para alcanzar el nicho replicativo. BlxR, por su parte, actúa en etapas posteriores de la infección para reactivar el metabolismo y permitir la replicación (Uzureau et

al., 2010). Lo anterior sugiere que, aunque la función de ambos reguladores no es redundante, los dos participan en una vía en común que regula la expresión de procesos importantes para la vida intracelular de la bacteria (Rambow-Larsen et al., 2008).

En la regulación del operón *virB* también participan otros factores de transcripción como IHF (*Integration Host Factor*), HutC (*Histidine UTILization pathway*) y MdrA (*MarR-like sodium deoxicholate-responsive activator*). Los dos primeros se unen al promotor del operón *virB*, aumentando la expresión del mismo (Arocena et al., 2010; Sieira et al., 2010). Sieira y colaboradores (2012) mencionan que IHF es una proteína asociada al nucleóide y HutC es un regulador de la familia GntR que relaciona la expresión del operón *virB* con el catabolismo de histidina. Por otro lado, MdrA es un regulador de la familia de factores de transcripción MarR, que regula genes de virulencia, genes implicados en el catabolismo de compuestos aromáticos y genes de respuesta a estrés (Wilkinson y Grove, 2006). MdrA se une a dos sitios diferentes en el promotor del operón *virB* y regula su expresión de acuerdo con la fase de crecimiento. La función de MdrA es redundante con respecto a la de HutC. Además, compite con IHF y HutC por la unión al promotor del operón *virB*. Como es común en la familia de reguladores MarR, la presencia de un ligando disocia al regulador de su sitio de unión. En el caso de MdrA, el ligando identificado es el deoxicolato de sodio, lo que indica que *in vivo* MdrA podría responder a señales ambientales (Sieira et al., 2012).

Conclusión

Más que de factores discretos, la virulencia de *B. abortus* depende de complejas redes de regulación génica que afectan principalmente la envoltura celular, así como el metabolismo. Algunos mecanismos de regulación génica de la virulencia son redundantes, mientras que otros son complementarios ya que actúan en diferentes etapas de la infección. El TCS BvrR/BvrS actúa como un regulador global que afecta la expresión de una gran variedad de genes y factores de transcripción importantes para la transición entre la vida extra e intracelular. Lo mismo pareciera ocurrir en otras alfaproteobacterias que poseen sistemas ortólogos al TCS BvrR/BvrS como *A. tumefaciens* y *S. meliloti*. Por este motivo, el estudio detallado del TCS BvrR/BvrS podría considerarse como un modelo para comprender mejor los fenómenos de parasitismo y endosimbiosis de las alfaproteobacterias. En el ITCR se continúa investigando sobre este tema, en conjunto con el Programa de Investigación en Enfermedades Tropicales (PIET) la Escuela de Medicina de la Universidad Nacional y el Centro de Investigación en Enfermedades Tropicales (CIET) de la Facultad de Microbiología de la Universidad de Costa Rica. Se espera que en un futuro el conocimiento generado pueda contribuir a contar con mejores herramientas terapéuticas y preventivas.

Bibliografía

- Anderson, T. D., Meador, V. P. & Cheville, N. F. (1986a). Pathogenesis of placentitis in the goat inoculated with *Brucella abortus*: I. Gross and histologic lesions. *Vet Pathol*, 23, 219-226.
- Anderson, T. D., Cheville, N. F. & Meador, V. P. (1986b). Pathogenesis of placentitis in the goat inoculated with *Brucella abortus*: II. Ultrastructural studies. *Vet Pathol*, 23, 227-239.
- Akova, M., Uzun, O., Akalin, H. E., Hayran, M., Unal, S. & Gur, D. (1993). Quinolones in the treatment of human brucellosis; comparative trial of ofloxacin-rifampin versus doxycyclinerifampin. *J Antimicrob Chemother*, 37, 1831-1834.
- Ariza, J., Gudíol, F., Pallarés, R., Rufi, G. & Fernández-Viladrich, P. (1985). Comparative trial of rifampicin-doxycycline versus tetracycline-streptomycin in the therapy of human brucellosis. *Antimicrob Agents Chemother*, 28, 548-551.

- Arocena, G. M., Sieira, R., Comerci, D. J. & Ugalde, R. A. (2010). Identification of the quorum-sensing target DNA sequence and N-acyl homoserine lactone responsiveness of the *Brucella abortus virB promoter*. *J Bacteriol*, 192(13), 3434-3440.
- Backert, S. & Meyer, T. F. (2006). Type IV secretion systems and their effectors in bacterial pathogenesis. *Curr Opin Microbiol*, 9, 207-217.
- Banai, M. & Corbel, M. (2010). Taxonomy of *Brucella*. *The Open Vet Sci J*, 2010, 4, 85-101.
- Bang, B. (1906). Infectious abortion in cattle. *J Comp Pathol*, 19, 191-202.
- Barquero-Calvo, E., Chaves-Olarte, E., Weiss, D. S., Guzmán-Verri, C., Chacón-Díaz, C., Rucavado, A., Moriyón, I. & Moreno, E. (2007). *Brucella abortus* uses a stealthy strategy to avoid activation of the innate immune system during the onset of infection. *PLOS ONE*, 2(7), 631-644.
- Bassler, B. L. (1999). How bacteria talk to each other: regulation of gene expression by quorum sensing. *Curr Opin Microbiol*, 2(6), 582-587.
- Bruce, D. (1887). Note on the discovery of a micro-organism in Malta fever. *Practitioner*, 39, 161.
- Buddle, M. B. (1956). Studies on *Brucella ovis* (n.sp.), a cause of genital disease of sheep in New Zealand and Australia. *J. Hyg. (Lond)*, 54(3), 351-364.
- Carmichael, L. E. & Bruner, D. W. (1968). Characteristics of a newly-recognized species of *Brucella* responsible for infectious canine abortions. *Cornell Vet*, 58, 579-592.
- Celli, J., de Chastellier, C., Franchini, D. M., Pizarro-Cerda, J., Moreno, E. & Gorvel, J. P. (2003). *Brucella* evades macrophage killing via VirB-dependent sustained interactions with the endoplasmic reticulum. *J Exp Med*, 198, 545-556.
- Charles, T. C. & Nester, E. W. (1993). A chromosomally encoded two-component sensory transduction system is required for virulence of *Agrobacterium tumefaciens*. *J Bacteriol*, 175(20), 6614-6625.
- Chen, E. J., Sabio, E. A. & Long S. R. (2008). The periplasmic regulator ExoR inhibits ExoS/ChvI two-component signaling in *Sinorhizobium meliloti*. *Mol Microbiol*, 69(5), 1290-303.
- Cheng, H. P. & Walker, G. C. (1998). Succinoglycan production by *Rhizobium meliloti* is regulated through the ExoS-ChvI two-component regulatory system. *J Bacteriol*, 180(1), 20-26.
- Cloekaert, A., Vizcaino, N., Paquet, J., Bowden, R. A. & Elzer, P. H. (2002). Major outer membrane proteins of *Brucella* spp.: past present and future. *Vet Microbiol*, 90, 229-247.
- Corbel, M. J. & Brinley-Morgan, W. J. (1984). Genus *Brucella* Meyer and Shaw 1920, 173 AL. (pp. 377-388). En J. G. Holt (Ed.), *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*, Vol. 1. Baltimore: MD Williams and Wilkins.
- Corbel, M. J. (2006). *Brucellosis in humans and animals*. Genève: WHO Press.
- Dale, J. W. & Park, S. F. (2004). *Molecular genetics of bacteria*. (p. 92). West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd.
- De, B. K., Stauffer L., Koylass M. S., Sharp, S. E., Gee, J. E., Helsel, L. O., Steigerwalt, A. G., Vega, R., Clark, T. A., Daneshvar, M. I., Wilkins, P. P. & Whatmore, A. M. (2008). Novel *Brucella* strain (BO1) associated with a prosthetic breast implant infection. *J Clin Microbiol*, 46(1), 43-49.
- de Barsy, M., Jamet, A., Filipon, D., Nicolas, C., Laloux, G., Rual, J. F, Muller, A., Twizere, J. C., Nkengfac, B., Vandenhoute, J., Hill, D. E., Salcedo, S. P., Gorvel, J. P., Letesson, J. J. & De Bolle, X. (2011). Identification of a *Brucella* spp. secreted effector specifically interacting with human small GTPase Rab2. *Cell Microbiol* 13, 1044-58.
- de Jong, M. F., Sun, Y. H., den Hartingh, A. B., Maarten van Dijn, J. & Tsolis, R. N. (2008). Identification of VceA and VceC, two members of the VjbR regulon that are translocated into macrophages by the *Brucella* Type IV secretion system. *Mol Microbiol*, 70(6), 1378-1396.
- Delrue, R. M., Martinez-Lorenzo, M., Lestrade, P., Danese, I., Bielarz, V., Mertens, P., De Bolle, X., Tibor, A., Gorvel, J.-P. & Letesson, J.-J. (2001). Identification of *Brucella* spp. genes involved in intracellular trafficking. *Cell Microbiol*, 3(7), 487-497.
- Delrue, R. M., Deschamps, C., Léonard, S., Nijskens, C., Danese I., Shaus, J. M, Bonnot, S., Ferooz, J., Tibor A., De Bolle, X. & Letesson, J. J. (2005). A quorum-sensing regulator controls expression of both the type IV secretion system and the flagellar apparatus of *Brucella melitensis*. *Cell Microbiol*, 7(8), 1151-1161.
- Ewalt, D. R., Payeur, J. B., Martin, B. M., Cummins, D. R. & Miller, G. M. (1994). Characteristics of a *Brucella* species from a bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*). *J Vet Diagn Invest*, 6, 448-452.

- FAO & WHO. (1986). *Expert Committee on Brucellosis*. (6th Report, Series No. 740). Genève: World Health Organization.
- Ficht, T. (2010). *Brucella* taxonomy and evolution. *Future Microbiol*, 5(6), 859-866.
- Foster, G., Osterman, B., Godfroid, J., Jacques, I. & Cloeckeaert, A. (2007). *Brucella ceti* sp. nov. and *Brucella pinnipedialis* sp. nov. for *Brucella* strains with cetaceans and seals as their preferred hosts. *Int J Syst Evol Microbiol*, 57, 2688-2693.
- Godfroid, J., Cloeckeaert, A., Liautard, J. P., Kohler, S., Fretin, D., Walravens, K., Garin-Bastuji, B. & Letesson, J. J. (2005). From the discovery of the Malta fever's agent to the discovery of a marine mammal reservoir, brucellosis has continuously been a re-emerging zoonosis. *Vet Res*, 36(3), 313-326.
- Godfroid, J., Scholz, H. C., Barbier, T., Nicolas, C., Wattiau, P., Fretin, D., Whatmore, A. M., Cloeckeaert, A., Blasco, J. M., Moriyon, I., Saegerman, C., Muma, J. B., Al Dahouk, S., Neubauer, H. & Letesson, J. J. (2011). Brucellosis at the animal/ecosystem/human interface at the beginning of the 21st century. *Prev Vet Med*, 102(2), 118-31.
- Guzmán-Verri, C., Chaves-Olarte, E., Thelestam, M., Arvidson, S., Gorvel, J. P. & Moreno, E. (2001). GTPases of the Rho subfamily are required for *Brucella abortus* internalization in non-professional phagocytes: direct activation of CDC42. *J Biol Chem*, 276, 44435-44443.
- Guzmán-Verri, C., Manterola, L., Sola-Landa, L., Parra, A., Cloeckeaert, A., Garin, J., Gorvel, J-P, Moriyón, I. & López-Goñi, I. (2002). The two-component system BvrR_BvrS essential for *Brucella abortus* virulence regulates the expression of outer membrane proteins with counterparts in members of the Rhizobiaceae. *Proc Natl Acad Sci*, 99(19), 12375-12380.
- Huddleson, F. & Hallman, E. T. (1929). The pathogenicity of the species of the genus *Brucella* for monkeys. *J Infect Dis*, 45, 293-303.
- Janeway, C. A. Jr. & Medzhitov, R. (2002). Innate immune recognition. *Annu Rev Immunol*, 20, 197-216.
- Ko, J. & Splitter, G. A. (2003). Molecular Host-Pathogen Interaction in Brucellosis: Current Understanding and Future Approaches to Vaccine Development for Mice and Humans. *Clin Microbiol Rev*, 16(1), 65-78.
- Lamontagne, J., Butler, H., Chaves-Olarte, E., Hunter, J., Schirm, M., Paquet, C., Tian, M., Kearney, P., Hamaidi, L., Chelsky, D., Moriyón, I., Moreno, E. & Paramithiotis, E. (2007). Extensive cell envelope modulation is associated with virulence in *Brucella abortus*. *J Proteome Res*, 6, 1519-1529.
- Lapaque N., Takeuchi O., Corrales F., Akira S., Moriyón I., Howard, J. C. & Gorvel, J-P. (2006). Differential inductions of TNF-alpha and IGTP, IIGP by structurally diverse classic and non-classic lipopolysaccharides. *Cell Microbiol*, 8, 401-413.
- Léonard, S., Ferooz, J., Haine, V., Danese, I., Fretin, D., Tibor, A., de Walque, S., De Bolle, X. & Letesson, J. J. (2007). FtcR is a new master regulator of the flagellar system of *Brucella melitensis* 16M with homologs in Rhizobiaceae. *J Bacteriol*, 189, 131-141.
- Lavín, J. L., Binnewies, T. T., Pisabarro, A. G., Ussery, D. W., García-Lobo, J. M. & Oguiza, J. A. (2010). Differences in two-component signal transduction proteins among the genus *Brucella*: implications for host preference and pathogenesis. *Vet Microbiol*, 144, 478-483.
- López-Goñi, I., Guzmán-Verri, C., Manterola, L., Sola-Landa, A., Moriyón, I. & Moreno, E. (2002). Regulation of *Brucella* virulence by the two-component system BvrR/BvrS. *Vet Microbiol*, 90, 329-339.
- López-Goñi, I., Manterola, L. & Pan, S.Q. (2004). The *Brucella* BvrR/BvrS and related two component regulatory systems of the α -2 Proteobacteria: common regulatory strategies of animal and plant pathogens and endosymbionts. (pp. 287-312). En I. López-Goñi & I. Moriyón (Eds.), *Brucella Molecular and Cellular Biology*. Wyomondham: Horizon Bioscience.
- López-Goñi, I. (2012). The two-component system BvrR/BvS: a master regulator of *Brucella* virulence. (pp. 201-209). En I. López-Goñi & O'Callaghan, D. (Eds.), *Brucella molecular microbiology and genomics*. Norfolk: Caister Academic Press.
- Mantis, N. J. & Winans, S. C. (1993). The chromosomal response regulatory gene *chvI* of *Agrobacterium tumefaciens* complements an *Escherichia coli* *phoB* mutation and is required for virulence. *J Bacteriology*, 175(20), 6626-6636.
- Marchesini, M. I., Herrmann, C. K., Salcedo, S. P., Gorvel, J. P. & Comerci, D. J. (2011). In search of *Brucella abortus* Type IV secretion substrates: screening and identification of four proteins translocated into host cells through VirB system. *Cell Microbiol*, 13(8), 1261-1274.

- Martínez-Núñez, C., Altamirano-Silva, P., Alvarado-Guillén, F., Moreno, E., Guzmán-Verri, C. & Chaves-Olarte, E. (2010). The Two-Component system BvrR/BvrS regulates the expression of the type IV secretion system VirB in *Brucella abortus*. *J Bacteriol*, 192(21), 5603-5608.
- Michaux- S., Paillisson J., Carles-Nurit M. J., Bourg, G., Allardet-Servent, A. & Ramuz, M. (1993). Presence of two independent chromosomes in the *Brucella melitensis* 16M genome. *J Bacteriol*, 175(3), 701-705.
- Moreno E., Berman D. T. & Boettcher L. A. (1981). Biological activities of *Brucella abortus* lipopolysaccharides. *Infect Immun*, 31,362-370.
- Moreno, E., Stackebrandt, E., Dorsch, M., Wolters, J., Busch, M. & Mayer, H. (1990). *Brucella abortus* 16S rRNA and lipid A reveal a phylogenetic relationship with members of the alpha-2 subdivision of the class Proteobacteria. *J Bacteriol*, 172(7), 3569-3576.
- Moreno, E. (2002). Brucellosis in Central America. *Vet Microbiol*, 90, 31-38.
- Moreno, E. & Moriyón, I. (2002). *Brucella melitensis*: A nasty bug with hidden credentials for virulence. *Proc Natl Acad Sci*, 99, 1-3.
- Moreno, E. & Gorvel, J. P. (2004). Invasion, intracellular trafficking and replication of *Brucella* organisms in professional and non-professional phagocytes. (pp. 287-312). En I. López-Goñi & I. Moriyón (Eds.), *Brucella Molecular and Cellular Biology*. Norfolk: Horizon Bioscience.
- Porte, F., Naroeni, A., Ouahrani-Bettache, S. & Liautard, J. P. (2003). Role of the *Brucella suis* lipopolysaccharide O antigen in phagosomal genesis and in inhibition of phagosome-lysosome fusion in murine macrophages. *Infect Immun*, 71(3), 1481-1490.
- Ralston, A. (2008). Operons and prokaryotic gene regulation. *Nature Education*, 1(1), 216.
- Rambow-Larsen, A. A., Rajashekara, G., Petersen, E. & Petersen, G. (2008). Putative Quorum-Sensing regulator BlxR of *Brucella melitensis* regulates virulence factors including the type IV secretion system and flagella. *J Bacteriol*, 190(9), 3274-3282.
- Rasool, O., Freer, E., Moreno, E. & Jarstrand, C. (1992). Effect of *Brucella abortus* lipopolysaccharides on the oxidative metabolism and enzyme release of neutrophils. *Infect Immun*, 60, 4-7.
- Roop, R. M. II, Gaines, J. M., Anderson, E. S., Caswell, C. C. & Martin, D. W. (2009). Survival of the fittest: how *Brucella* strains adapt to their intracellular niche in the host. *Med Microbiol Immunol*, 198, 221-238.
- Ross, H. M., Foster, G., Reid, R. J., Jahans, K. L. & MacMillan, A. P. (1994). *Brucella* species infection in sea-mammals. *Vet Rec*, 134, 359.
- Scholz, H. C., Hubalek, Z., Sedlacek, I., Vergnaud, G., Tomaso, H. Dahouk, S. A., Melzer, F., Kampfer, P., Neubauer, H., Cloeckaert, A., Maquart, M., Zygmunt, S., Whatmore, A. M., Falsen, E., Bahn, P., Gollner, C., Pfeffer, M., Huber, B., Bussel, H. J. & Nockler, K. (2008). *Brucella microti* sp nov., isolated from the common vole *Microtus arvalis*. *Int J Syst Evol Microbiol*, 58, 375-382.
- Sieira, R., Comerci, D. J., Pietrasanta, L. I. & Ugalde, R. A. (2004). Integration host factor is involved in transcriptional regulation of the *Brucella abortus* virB operon. *Mol Microbiol*, 54(3), 808-822.
- Sieira, R., Arocena, G. M., Bukata, L., Comerci, D. J. & Ugalde, R. A. (2010). Metabolic control of virulence genes in *Brucella abortus*: HutC coordinates virB expression and the histidine utilization pathway by direct binding to both promoters. *J Bacteriol*, 192(1), 217-224.
- Sieira, R., Arocena, G. M., Zorreguieta, A., Comerci, D. J. & Ugalde, R. A. (2012). A MarR-type regulator directly activates transcription 2 from the *Brucella abortus* virB promoter by sharing a redundant role with HutC. *J Bacteriol*, 194, 6431-6440.
- Sola-Landa, A., Pizarro-Cerdá, J., Grilló, M.-J., Moreno, E., Moriyón, I., Blasco, J.-M., Gorvel, J.-P. & López-Goñi, I. (1998). A two-component regulatory system playing a critical role in plant pathogens and endosymbionts is present in *Brucella abortus* and controls cell invasion and virulence. *Mol Microbiol*, 29(1), 125-138.
- Songer, J. G. & Post, K. W. (2005). *Veterinary microbiology: bacterial and fungal agents of animal disease*. St. Louis, Missouri: Elsevier Saunders.
- Starr, T., Child, R., Wehrly, T. D., Hansen, B., Hwang, S., López-Otin, C. Virgin, H.W. & Celli, J. (2012). Selective subversion of autophagy complexes facilitates completion of the *Brucella* intracellular cycle. *Cell Host Microbe*, 11(1), 33-45.
- Stoenner, H. G. & Lackman, D. B. (1957). A new species of *Brucella* isolated from the desert wood rat, *Neotoma lepida* Thomas. *Am J Vet Res*, 18, 947-951.

- Tiller, R. V., Gee, J. E., Lonsway, D. R., Gribble, S., Bell, S. C., Jennison, A. V., Bates, J., Coulter, C. Hoffmaster, A. R. & De, B. K. (2010). Identification of an unusual *Brucella* strain (BO2) from a lung biopsy in a 52 year-old patient with chronic destructive pneumonia. *BMC Microbiol*, 10, 23.
- Uzureau, S., Godefroid, M., Deschamps, C., Lemaire, J., De Bolle, X. & Letesson, J. J. (2007). Mutations of the quorum sensing-dependent regulator VjbR lead to drastic surface modifications in *Brucella melitensis*. *J Bacteriol*, 189(16), 6035-6047.
- Uzureau, S., Lemaire, J., Delaive, E., Dieu, M., Gaigneaux, A., Raes, M., De Bolle, X. & Letesson, J. J. (2010). Global analysis of quorum sensing targets in the intracellular pathogen *Brucella melitensis* 16 M. *J Proteome Res*, 9, 3200-3217.
- Viadas, C., Rodríguez, C., Sangari, F., Gorvel, J. P., García, J. & López, I. (2010). Transcriptome analysis of the *Brucella abortus* BvrR/BvrS two-component regulatory system. *PLOS ONE*, 5(4), 1-8.
- Wilkinson, S. P. & Grove, A. (2006). Ligand-responsive transcriptional 772 regulation by members of the MarR family of winged helix proteins. *Curr Issues Mol Biol*, 8, 51-62.

Un modelo de finca integrada orientada a contribuir a la seguridad alimentaria de comunidades indígenas de Talamanca (Artículo informativo)

Integrated Organic Farm; a model aimed at contributing to food security for indigenous communities in Talamanca

Ricardo Salazar-Díaz¹

Fecha de recepción: 2 de octubre del 2014

Fecha de aprobación: 18 de enero del 2015

Salazar-Díaz, R. Un modelo de finca integrada orientada a contribuir a la seguridad alimentaria de comunidades indígenas de Talamanca (Artículo informativo). *Tecnología en Marcha*. Vol. 28, Nº 2, Abril-Junio. Pág 74-83.

¹ Máster en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de Producción, profesor investigador, Escuela de Agronegocios del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Teléfonos: (506) 2550-2779 y (506) 8865-7558. Correo electrónico: risalazar@itcr.ac.cr

Palabras clave

Finca integrada orgánica; Talamanca.

Resumen

Este proyecto se lleva a cabo en el marco del Programa de Regionalización Interuniversitaria dentro de la iniciativa denominada Fortalecimiento de los sistemas de producción y comercialización de las unidades productivas y de servicios indígenas respetando la cultura Bribri y Cabécar con un enfoque ambientalmente sostenible. El proyecto consiste en un modelo de finca integrada orgánica, orientada a contribuir a la seguridad alimentaria y al fortalecimiento agroecológico y cultural de comunidades indígenas de Talamanca.

El proyecto es liderado por tres jóvenes hermanos de la comunidad de Shuabb, distrito Telire, cantón de Talamanca, Costa Rica. En un área de cuatro hectáreas se estableció un modelo de producción agropecuaria, que consiste básicamente en la diversificación productiva de cultivos agrícolas, forestales y pecuarios de especies menores.

Más de 20 diferentes especies cultivadas, entre raíces, tubérculos, granos básicos, vegetales, hortalizas, frutales y forestales; módulos de gallinas y cerdos en pastoreo y dos estanques de peces hacen de esta finca familiar un modelo alternativo de desarrollo socioeconómico, que contribuye al autoconsumo y fomenta el mercado local.

A pesar de que los sistemas agrícolas tradicionales talamanqueños provienen de la relación continua y equilibrada con su medio natural, existe una evidencia del deterioro de esta relación. Como un resultado de esta iniciativa, se pretende que esta propuesta de sistema productivo sea un modelo a replicar en comunidades vecinas y de esta manera contribuir al desarrollo humano sostenible de la región de Talamanca.

Keywords

Integrated organic farm; Talamanca.

Abstract

This project takes place under the context of the Inter-Universitarian Regional Development Initiative - Strengthening of the indigenous productive systems and marketing of the outsourcing and productive indigenous services, as well as respecting the Bribri and Cabécar cultures, within an environmentally sustainable approach. This project focuses on a model of an integrated organic farm, aimed to contribute to food security, agroecological practices and culture strengthening of indigenous communities in Talamanca. The project is led by three young brothers from the community of Shuabb, Telire, Talamanca. In an area of four acres, a model of agricultural production was established, which basically consists in agriculture and livestock of minor species diversification.

Over twenty different kinds of species of crops were planted, among roots, tubers, vegetables, cereals, fruits, and grains. Free range chickens and pigs as well as fish ponds have turned this family farm into an alternative model of economic development, contributing to self-sufficient consumption and promoting local market.

Traditional farming in Talamanca comes from the continuous and balanced relationship between humans and their natural environment; however, there is evidence of deterioration in this relationship. As a result of this initiative, this proposal intends to be a model to be replicated in neighboring communities and so contribute to sustainable human development in the region of Talamanca.

Introducción

El cantón de Talamanca engloba los territorios indígenas más extensos y más poblados del país, los cuales cuentan con un régimen administrativo autónomo, sustentado por leyes y convenios internacionales. Por diversas circunstancias históricas, Talamanca ha tenido poca participación en el proceso de desarrollo del país, lo cual ha determinado que, en la actualidad, exista un evidente retraso en su desarrollo con respecto a otras áreas rurales o urbanas (Borge y Castillo, 1997).

En la comunidad de Shuabb se identificaron los alimentos que actualmente producen y consumen las familias de la comunidad, con la finalidad de proponer una base para un modelo de finca integral capaz de satisfacer las necesidades básicas de las familias, con una alimentación balanceada de bajo costo, en busca de una mejor calidad de vida para los pobladores y la conservación de los recursos culturales y ambientales de la zona.

Las comunidades indígenas de Talamanca viven bajo la amenaza de un modelo agrícola convencional, donde el cultivo de plátano se ha convertido en la principal actividad económica. Según Borge (2012). Esto pone en riesgo la salud de las personas y del medio ambiente, debido al uso intensivo de agrotóxicos y al establecimiento del monocultivo.

La importancia de este proyecto radica en la posibilidad de establecer una alternativa de desarrollo socioeconómico en los pueblos indígenas, colaborando para que produzcan sus propios alimentos, haya intercambio de productos con otras comunidades y la posible venta en el largo plazo, siempre respetando el conocimiento agroecológico indígena.

Materiales y métodos

Es necesario indicar que este proyecto corresponde a dos años de trabajo con el Programa de Regionalización Universitaria contribuyendo a la responsabilidad social, en este caso del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), durante los cuales se ha logrado estudiar la realidad de la comunidad de Shuabb, para darle seguimiento a la implementación del modelo de finca integral.

Descripción del área de estudio

El estudio se realizó en el poblado indígena Bribri, Shuabb, distrito Telire del cantón de Talamanca, que se ubica en el extremo sureste de la provincia de Limón, Costa Rica. Esta comunidad se encuentra dentro del Parque Internacional La Amistad, reconocido por la UNESCO como Sitio de Patrimonio Mundial de la Humanidad debido a la importancia y diversidad de los ecosistemas que protege. Su ubicación geográfica está entre los 8°37' y 9°38' de latitud norte y entre los 82°24' y 83°25' de longitud oeste. La zona de vida corresponde al Bosque Húmedo Tropical (bh-T), (Holdridge et al., 1971.) la precipitación promedio anual es de 2000-2400 mm y tiene una temperatura media anual de 24-26 °C (IMN, 2010).

Caracterización socioeconómica

Se identificaron las características más sobresalientes de la economía y los aspectos sociales de los beneficiarios del proyecto, las cuales servirán para conocer y proponer soluciones para el cambio y desarrollo de los sistemas de producción.

Selección de la finca

En el año 2011, en coordinación con el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), se trabajó con un grupo de 20 jóvenes de diferentes comunidades indígenas de Talamanca en la elaboración de planes de negocios de ideas productivas. En el marco del Programa de Regionalización, en 2012 se decidió apoyar uno de estos planes de negocios desarrollado por tres jóvenes hermanos de la comunidad de Shuabb. La propuesta consiste en el desarrollo de una finca integral familiar, con miras al autoconsumo y la comercialización local.

Ballarino, Yanori y Franklin Oniel Morales son tres hermanos que lideran esta iniciativa. Ellos y ella disponen de una finca de 4 ha para el desarrollo del proyecto. Aparte del área de la finca, la familia Oniel Morales aporta como contrapartida la mano de obra para realizar las labores de campo de la producción agropecuaria.

Elaboración del diseño de la finca

Para el desarrollo del modelo de finca integral orgánica se dispone aproximadamente de 4 ha para la producción, donde se debe producir una alta diversificación de productos agrícolas, pecuarios y forestales para satisfacer las necesidades básicas de la familia y lograr utilidades, optimizando el uso de los recursos naturales mediante el manejo de tecnologías de bajo costo, promoviendo la seguridad alimentaria.

La finca está dividida en dos áreas, la de producción pecuaria y la de producción agrícola. Esto se debe a que los cultivos agrícolas se encuentran en una finca un poco alejada de la vivienda familiar, a unos 400 metros, mientras que los módulos de producción pecuaria de especies menores se ubican al lado de la casa por motivos de cuidado y protección de los animales.

Resultados y discusión

Caracterización socioeconómica de la familia beneficiaria

Los Oniel Morales, al igual que la mayoría de las 24 familias de la comunidad de Suabb, cuentan con escasos recursos económicos. Tienen casa propia y en el año 2012 lograron acceso a la electricidad. Los principales problemas que comparten son el desempleo y que sus únicos ingresos provienen de la agricultura, en su mayor parte de subsistencia, ya que la comercialización de los productos agropecuarios en la zona es difícil.

Por otra parte, la situación escolar de las y los jóvenes de la comunidad se basa en que, en el mejor de los casos, terminan la secundaria pero las limitaciones son muchas para continuar estudios técnicos o profesionales. Algunos aspectos socioeconómicos se muestran en el cuadro 1.

Implementación del modelo productivo

El fomento de sistemas diversificados e integrados debe adaptarse al potencial y las condiciones de la localidad donde se implementen. La agricultura tradicional indígena cumple múltiples funciones ecológicas, además de los bienes de uso, de trueque y simbólicos que produce. Los ámbitos biológico, social y cultural se benefician directa e indirectamente de este sistema de agricultura.

Cuadro 1. Aspectos socioeconómicos de los beneficiarios

Beneficiario	Edad	Educación	Ocupación	Tenencia de tierra
Ballarino Oniel Morales	30	Secundaria incompleta	Agricultura de subsistencia y peón agrícola	4 ha, propia
Yanori Oniel Morales	24	Secundaria incompleta	Agricultura de subsistencia y estudiante	2 ha, propia
Franklin Oniel Morales	22	Secundaria completa	Agricultura de subsistencia y estudiante	2 ha, propia

Fuente: elaboración propia.

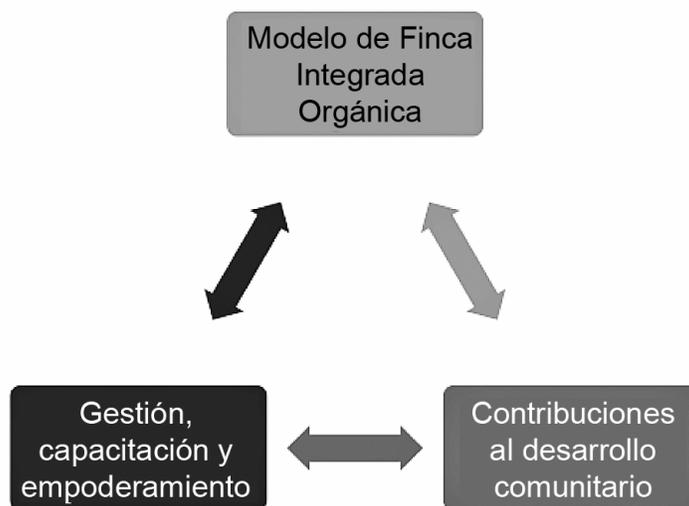


Figura 1. Modelo para el fortalecimiento de las unidades productivas agropecuarias.

De acuerdo con las bases agroecológicas de las acciones del modelo (ver figura 1), se incorporan tecnologías compatibles que consisten básicamente en la diversificación productiva y la integración de la producción agrícola y animal, además del conocimiento y control de procesos productivos de bajo costo con el uso de insumos locales.

Diversificación agrícola

Los pueblos bribis y cabécar poseen sistemas de policultivos o *Skonwak*, palabra que significa “de nosotros”. Son sistemas en los que las plantas domesticadas y silvestres están mezcladas en el mismo suelo (ver figura 2), con lo cual se obtienen cosechas durante el ciclo agrícola completo.

Este modelo de finca integrada consiste en diversificar la producción, intercalando varios cultivos en una unidad de terreno, con metodologías como la rotación y asociación de cultivos. Los cultivos sembrados en la finca integrada Shuabb se muestran en el cuadro 2.



Figura 2. Finca integrada en Shuabb.

A diferencia de un monocultivo, en una finca integrada hay un mayor rendimiento en la eficiencia biológica, además de un mejor uso del suelo, aprovechando los espacios para sembrar una gran diversidad de cultivos.

Más allá del enfoque agroecológico y las ventajas biológicas de los policultivos, la diversificación agrícola pretende abastecer a las familias de los alimentos necesarios que requieren para su buena nutrición.

La compensación productiva de la diversificación agrícola consiste en que si alguno de los cultivos falla debido a plagas, enfermedades, condiciones climáticas u otro factor, se puede compensar con el aumento de la productividad de otro componente del sistema.

Módulo de gallinas al pastoreo

El módulo de gallinas en pastoreo (ver figura 3) consiste en fortalecer la producción de huevos sanos, con los sabores tradicionales para el consumo familiar y la venta local. Este sistema no requiere de grandes inversiones.

El gallinero se construyó con paredes de madera y techo de palma, además se respetó la arquitectura autóctona. Esta estructura ofrece frescura y comodidad a las aves. Es una construcción permanente; dentro del gallinero se cuenta con el equipo necesario, bebederos, comederos, perchas y nidales.

Las gallinas pastorean en potreros alrededor del gallinero; se puede hacer más de uno para hacer una rotación de potreros. Por la tarde y las noches las gallinas entran al gallinero a dormir y estar a salvo de los depredadores; por la mañana se les abren las puertas para que pastoreen. Normalmente ponen huevos en horas de la mañana.

Cuadro 2. Cultivos asociados sembrados en la finca integrada en Shuabb.

Cultivo	Tipo de cultivo	Cultivo	Tipo de cultivo
Pejibaye	Frutal	Arroz	Grano
Naranja	Frutal	Maíz	Grano
Limón	Frutal	Frijol	Grano
Cas	Frutal	Gandul	Grano
Mandarina	Frutal	Ajonjolí	Cereal
Castaña	Frutal	Trigo	Cereal
Aguacate	Frutal	Yuca	Raíz
Cacao	Frutal	Maní	Raíz
Guanábana	Frutal	Ñame	Tubérculo
Manzana de agua	Frutal	Tiquisque	Tubérculo
Rambután	Frutal	Ayote	Vegetal
Caimito	Frutal	Okra	Vegetal
Palmito	Frutal	Culantro coyote	Vegetal
Piña	Frutal	Caña de azúcar	Forraje
Banano	Frutal	Nacadero	Forraje
Plátano	Frutal	Morera	Forraje
Café	Frutal	Ramio	Forraje
Zapote	Frutal	Chaya	Forraje



Figura 3. Módulo de gallinas en pastoreo.

Al contar con un espacio suficiente de potrero, se hace más fácil alimentar a las gallinas, puesto que con el pastoreo ellas van a buscar la mayor parte de su alimento entre las hierbas, pastos e insectos que colectan durante el día. No obstante, es necesario complementar su dieta con maíz, trigo, puntilla de arroz, yuca, coco y demás alimentos que se producen en la finca.

Módulo de cerdos semiestabulados



Figura 4. Módulo de producción de cerdos semiestabulados.

Al igual que el módulo de gallinas al pastoreo, el sistema productivo de cerdos al pastoreo o semiestabulados (figura 4) no solo se caracteriza por su baja inversión en infraestructura, sino por los valores intrínsecos de la crianza al aire libre. Estos proveen un espacio donde el cerdo puede satisfacer sus necesidades en un medio más sano, manifestando un comportamiento más natural, minimizando los estados de estrés y expresando su verdadero potencial productivo.

En Talamancas es tradicional que los cerdos anden libremente en los patios y duerman debajo de las casas para protegerse, ya que estas se encuentran sobre pilones, sin embargo, se han dado casos en que los animales hacen daños en las plantaciones de los vecinos, ocasionando serios problemas. En este modelo productivo se delimita el área donde el animal puede andar, limitándole el espacio, pero de esta manera no se mantienen amarrados, como se acostumbra actualmente.

El rubro de mayor peso en los costos de producción de carne de cerdo es la alimentación. Esto se convierte en el mayor reto del modelo del sistema de producción integrada, pues se debe producir suficientes alimentos tanto para la familia como para los animales.

Se debe tener una nutrición balanceada para lograr una producción estable y rentable. Los cerdos deben alimentarse con productos de la finca, como caña de azúcar, morera, nacedero, yuca, pejibaye, maíz y trigo. Al inicio del proyecto se tuvo que suplementar la alimentación con concentrado (alimento comercial), ya que los cultivos de la finca estaban en su producción inicial y no se había llegado al rendimiento óptimo.

Módulo de producción de peces

A pesar de que la tilapia es una especie introducida, se seleccionó este cultivo de peces como una alternativa de producción por sus características favorables de adaptación (ver estanque en figura 5), ya que es muy apropiada para la piscicultura. Tiene un rápido crecimiento, se reproduce fácilmente y es resistente a las enfermedades. Otras bondades de la tilapia son su bajo costo de producción, la tolerancia a desarrollarse en condiciones de alta densidad o su capacidad de sobrevivir con bajas concentraciones de oxígeno. Técnicamente, la tilapia tiene una enorme capacidad para nutrirse a partir de una gran gama de alimentos naturales.

La carne de tilapia es sabrosa, puesto que su textura es firme, de color blanco y no tiene espinas intermusculares, lo cual hace que constituya un pescado altamente apetecible.

El cultivo de tilapia tiene potencial para convertirse en una de las principales fuentes de proteína animal para consumo humano, particularmente en los países en vías de desarrollo.



Figura 5. Estanques de peces

Actividad cultural

Entre las formas de organización social del trabajo agrícola en los sistemas tradicionales, la junta de trabajo o “mano vuelta” (ver figura 6) es una de las más importantes. Esta consiste en trabajar la finca de manera comunitaria. Para este proyecto se sembraron más de 100 árboles frutales de 22 especies, tales como café, guanábana, aguacate, limón, naranja, pejibaye, castaña, manzana de agua y rambután, entre otros. Se contó con la participación de los niños y niñas de la Escuela de Shuabb, cuyo maestro, Víctor Iglesias, destacó la importancia de que estos formen parte tanto de la actividad cultural como agrícola, creyendo firmemente que la educación debe darse tanto dentro como afuera de las aulas.

Este proyecto, que se llevó a cabo durante dos años, buscó fortalecer las prácticas ancestrales entre los jóvenes, niños y niñas de las comunidades indígenas de Talamanca.



Figura 6. Actividad cultural “Junta de trabajo”

Conclusiones

Se estableció un modelo de finca integrada familiar en la comunidad de Shuabb, como una alternativa de desarrollo socioeconómico de las comunidades indígenas de Talamanca. El modelo se basó en principios agroecológicos para fortalecer la producción agropecuaria, en la que las tecnologías aplicadas son compatibles con las prácticas agrícolas ancestrales.

Bajo un enfoque de seguridad alimentaria y con miras a la comercialización local, con el establecimiento de la finca integrada se busca contribuir al desarrollo sostenible de las familias de la zona. Asimismo, se pretende que este tipo de sistema productivo pueda ser replicado en otras comunidades, en donde los y las jóvenes sean protagonistas en la defensa de un modelo que respeta el medio ambiente, la biodiversidad y la cultura ancestral indígena.

El modelo presenta varios retos, ya que para alcanzar una producción sostenible se requiere que la finca, como unidad productiva, alcance buenos rendimientos. Para ello, en los primeros años de producción se requerirá de mucha mano de obra en el manejo y mantenimiento tanto de los cultivos como de los animales.

La producción agroecológica es dinámica, por lo tanto, el modelo debe ir ajustándose a esta condición y la familia debe atender constantemente las demandas de la unidad productiva. Es necesario que los ejecutores del proyecto den acompañamiento técnico y asesoría profesional al menos por un par de años más, a fin de asegurar que el modelo quede bien establecido y lograr el éxito de la gestión del conocimiento, empoderando a los y las jóvenes de la familia en el manejo del sistema de producción.

Bibliografía

- Borge, C. & Castillo, R. (1997). *Cultura y conservación en la Talamanca indígena*. (pp. 130-150). San José: EUNED.
- Borge, C. (2012). *El policultivo indígena de Talamanca y la conservación de la naturaleza*. (pp. 7-8). Heredia: Editorial INBio.
- Holdridge, L.R., Grenke, W.G., Hatheway, W.H., Liang, T., Tosi, J.J.A., 1971. *Forest Environments in Tropical Life Zones: A Pilot Study*. Pergamon Press, New York.
- Instituto Meteorológico Nacional (IMN), 2010. <http://www.imn.ac.cr>.

Evaluación de la fertilización inorgánica en el cultivo de yuca en la región norte de Costa Rica

Evaluation of inorganic fertilization in cassava crop in the northern region of Costa Rica

Parménides Furcal-Beriguete¹, Sergio Torres-Portuguez², Wagner Andrade-Carballo³

Fecha de recepción: 20 de octubre del 2014

Fecha de aprobación: 28 de enero del 2015

Furcal-Beriguete, P; Torres-Portuguez, S; Andrade-Carballo, W. Evaluación de la fertilización inorgánica en el cultivo de yuca en la región norte de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 28, N° 2, Abril-Junio. Pág 84-101.

1 Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Agronomía, Sede San Carlos. Apdo. 223-21001, Alajuela, Ciudad Quesada. Costa Rica. Correo electrónico: pafurcal@itcr.ac.cr

2 Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Agronomía, Sede San Carlos. Apdo. 223-21001, Alajuela, Ciudad Quesada. Costa Rica. Correo electrónico: storres@itcr.ac.cr

3 TransUnión S.A. Costa Rica. Correo electrónico: wandrade@transunioncr.com

Palabras clave

Manihot esculenta; materia seca en yuca; fertilización foliar en yuca; fertilización al suelo en yuca.

Resumen

El estudio se realizó en tres fincas, dos de ellas en el cantón de San Carlos, distrito La Fortuna, en suelos de origen volcánico de fertilidad media (finca Pepín) y alta (finca de Sonafluca) y la tercera en el cantón de Los Chiles en suelos del orden ultisol de fertilidad baja (finca Laberinto). El objetivo fue evaluar el efecto de los métodos de fertilización en el cultivo de yuca, variedad Valencia, para obtener la mejor alternativa en rendimiento y la rentabilidad. Se aplicaron cuatro tratamientos: fertilización completa al suelo, fertilización únicamente foliar, combinación de los dos tratamientos anteriores y fertilización común de cada finca, utilizando un diseño irrestricto al azar con cuatro repeticiones. Las fertilizaciones se hicieron antes de los cinco meses de edad para cubrir las fases de mayor absorción de nutrimentos. Los resultados obtenidos en finca Pepín mostraron un p-valor $< 0,05$ en materia seca de raíz a la cosecha, en el rendimiento de yuca de primera calidad y en la concentración de algunos elementos en las hojas a favor del tratamiento testigo, con un rendimiento de 16,1 t/ha. En la finca de Sonafluca, el testigo presentó el mayor rendimiento, con 20,85 t/ha; tanto en ésta como en la finca Laberinto hubo diferencias en materia seca a los seis meses de edad. Se concluye que el tratamiento solo foliar (usado comúnmente por pequeños productores) es el más económico, mientras que el testigo (aplicación de fertilizantes al suelo y a las hojas acorde con cada productor) fue el que obtuvo mejores rendimientos.

Keywords

Manihot esculenta; cassava dry matter; foliar fertilization in cassava; soil fertilization in cassava.

Abstract

The study was done in three farms, two of which are located in the canton of San Carlos, district La Fortuna, in volcanic origin soils with moderate fertility (farm Pepin) and high fertility (farm Sonafluca) and the other in the canton of Los Chiles in ultisols soils of low fertility (farm Laberinto). The objective of this study was to evaluate the effect of methods fertilization on cassava crop, Valencia variety, to obtain for the best alternative in yield and profitability. Four treatments were applied: complete soil fertilization, foliar fertilization only, combination of these two treatments and common fertilization on each farm, using an unrestricted random design with four replications. Fertilizations were made before the five months of age to cover the phases of increased absorption of nutrients. The results obtained in farm Pepin showed p-valor $< 0,05$ in root dry matter at harvest, in first quality cassava and the concentration of some elements in the leaves for the control treatment, this produced the best yield with 16.1 t / ha. In the farm of Sonafluca, the control showed the highest yield with 20.85 t / ha; there were differences in this farm as in Laberinto in dry matter at six months of age. We conclude that the only foliar treatment (commonly used by small producers) is the most economical, while the control (application of fertilizers to soil and leaves according to each producer) was the best yield.

Introducción

La yuca se cultiva y consume a escala mundial en los países tropicales y subtropicales. Dentro del gran mercado mundial de este cultivo, Costa Rica, con 11800 ha sembradas, aparece en el sexto lugar en la exportación del producto, con una participación del 2% entre 2008 y 2011 (MAG, 2012), colocando más de 80000 toneladas por año. En 2011 ocupó el segundo lugar en variación porcentual en el área sembrada de cultivos agrícolas en el país, con una producción de 195100 t, por ello se posicionó en un cuarto lugar en la producción agrícola de Costa Rica. Estas cifras hacen que la yuca sea una alternativa, entre los cultivos no tradicionales, para los agricultores de la región Huetar Norte y Atlántica, principales zonas productoras de esta raíz.

Se considera que la yuca es una planta de aprovechamiento integral, ya que sus raíces y hojas son fuentes de carbohidratos y proteínas. Las raíces se utilizan de diferentes formas en la alimentación humana y como complemento de concentrados en la dieta de animales; además se emplea como materia prima en la industria con gran variedad de productos (almidón industrial, alcohol carburante, gomas y adhesivos, entre otros) (Cadavid, 2008). La raíz de esta planta está entre las más eficientes productoras de carbohidratos; respecto a los demás cultivos ocupa el cuarto lugar como fuente energética, después del maíz, el arroz y la caña de azúcar. Según Mejía de Tafur (2002), esto hace a la yuca una especie de mucho valor socioeconómico para los agricultores y consumidores de bajo alcance económico en países tropicales y subtropicales.

El principal problema de la actividad productiva de yuca en el país es que se ha industrializado muy poco y los rendimientos se han reducido a través de los años. En 2008 solo había dos industrias registradas en la producción de almidón y hojuelas (INFOAGRO, 2009), de manera que la expansión podría darse con mejor tecnificación a nivel de campo y la industrialización del producto.

La fertilización en este cultivo ha sido objeto de varios trabajos en distintas partes del mundo, en diferentes tipos de suelos y condiciones climáticas, encontrándose resultados tan disímiles que no concluyen en una técnica exclusiva. Se observa, además, que no existen suficientes investigaciones de publicación reciente que reporten trabajos en que las fertilizaciones se ajusten al crecimiento y absorción de nutrimentos del cultivo (Cenoz et al., 2000). El manejo de la fertilización no siempre cubre las necesidades del cultivo y en otras ocasiones se aplican fertilizantes en forma muy desbalanceada y fuera de las épocas de mayor necesidad. López (2002), Mejía de Tafur (2002), De Diego y Quirós (2006) y Cadavid (2008) concuerdan en que el cultivo de la yuca empieza su absorción a partir de los 30 días después de la siembra (DDS). Del mismo modo, Cadavid (2002), De Diego y Quirós (2006) y Cadavid (2008) mencionan que la planta logra un incremento en acumulación de nutrimentos después de los dos meses, con una extracción máxima entre los 120 y 150 DDS, que coincide con la más alta tasa de acumulación de materia seca. A partir de los cinco meses, la tasa de absorción desciende en la mayoría de los nutrimentos. Este comportamiento, que marca diferentes etapas fisiológicas del cultivo, es importante para establecer programas de fertilización (entre los 30 y 150 DDS) (Furcal et al., 2009).

En Costa Rica, la fertilización de la yuca es muy diversa, posiblemente esta variabilidad en el manejo de la fertilización entre otras técnicas importantes en el manejo del cultivo, como control de plagas y selección de semilla es la que incide para que se presenten rendimientos desde muy bajos (≤ 10 t/ha) hasta muy buenos (≥ 40 t/ha) entre los productores. Los programas de fertilización manejados en el país van desde la fertilización exclusivamente foliar -practicada mayormente por pequeños productores- y la combinación vía foliar y al suelo, hasta diversas formas de fertilización al suelo. Dichas técnicas no siempre cubren las necesidades del cultivo cuando se siembra en suelos de fertilidad baja y en otras ocasiones se aplican en forma muy desbalanceadas, lo que atenta contra el rendimiento sostenible y la rentabilidad del cultivo.

Las inquietudes anteriores, además de las estadísticas sobre la importancia socioeconómica del cultivo en el sector agrícola de la región norte del país, guiaron la necesidad de plantear este experimento, sustentado en las investigaciones sobre las fases vegetativas de mayor necesidad nutricional de la yuca, pero sin certeza de en cuál órgano de la planta deben aplicarse los fertilizantes para que se ajusten mejor al nivel de fertilidad de los suelos y a las condiciones climáticas de la zona. De esa forma, se establecieron varios tratamientos, aplicaciones de fertilizantes tanto al suelo como a las hojas del cultivo y la combinación de estos, enmarcados en las diferentes fases fenológicas de mayor absorción de nutrimentos del cultivo, con el objetivo de evaluar el efecto de la fertilización inorgánica en yuca, variedad Valencia, en diferentes fincas, para obtener la mejor alternativa en rendimiento y rentabilidad.

Materiales y métodos

Generalidades y localización

El estudio consistió en la fertilización del cultivo de yuca en tres lugares distintos de la región Huetar Norte de Costa Rica: dos en la Fortuna de San Carlos, uno de ellos en un suelo inceptisol originado por arrastre de materiales volcánicos por los ríos, con fertilidad media, relación catiónica (calcio (Ca), magnesio (Mg) y potasio (K)) balanceada según los niveles propuesto por Bertsch (1995) y Bertsch y Méndez (2012); y el otro en un suelo andisol con saturación de aluminio de 3,1% y suma de bases de 12,5 cmol(+)/L, lo que le confiere una fertilidad alta (Cubero, 2001 y Núñez, 2001). El tercer lugar se ubica en el cantón de Los Chiles, en un suelo del orden ultisol con fertilidad baja (cuadro 1).

Cuadro 1. Resultados de análisis de suelos correspondientes a las tres localidades donde se instalaron los experimentos. Santa Clara, San Carlos. Enero de 2014.

Lote	pH	cmol(+)/L					mg/L				%		
		Acidez	Ca	Mg	K	SB	P	Cu	Fe	Zn	Co	Mo	Acidez
Fertilidad media													
Inceptisol	5,38	0,32	5,4	1,2	0,34	6,88	5	2	98	1,4	2,35	4,4	4,44
Fertilidad baja													
Ultisol	4,94	0,89	3,6	0,6	0,26	4,48	7	7	280	2,1	2,77	4,78	16,57
	4,99	0,79	3,2	0,9	0,3	4,46	8	6	258	2,6	2,64	4,54	15,05
Fertilidad alta													
Andisol	6,35	0,4	9,1	1,9	1,49	12,5	11	21	125	4,2	2,57	4,43	3,10

Nota: Las unidades están expresadas en base seca. El pH se obtuvo en agua. La determinación de K, P y elementos menores se extrajeron con Olsen Modificado, en tanto el Ca, Mg y acidez extractable con KCl 1M.

El suelo inceptisol de una de las parcelas en estudio se ubica en Los Ángeles de La Fortuna, a una altura de 50 msnm, latitud N 10° 27' 39,919", longitud 84° 33' 45,072". La cantidad de lluvia durante el ciclo del cultivo de 10 meses se estimó en 1755 mm, la temperatura anual promedio fue de 25 °C y la humedad relativa de un 89% en la estación más cercana a 24 km.

El otro lugar en La Fortuna donde se trabajó se ubica en la latitud N 10° 27' 14", longitud 84° 35' 59", a una altura de 136 msnm. La precipitación durante el ciclo del cultivo de 10 meses fue de 2670,3 mm.

En Los Chiles, el ensayo se llevó a cabo en la comunidad de El Parque. La lluvia presente durante el ciclo del cultivo de 12 meses fue estimada en 1335,72 mm, comportándose de manera creciente los tres primeros meses después de la siembra y con buena distribución del cuarto mes en adelante. El promedio anual de precipitación de la zona es de 3000 mm.

Manejo del cultivo

En las tres localidades se utilizó la variedad Valencia, muy usada en el país debido a su aceptación en el mercado internacional. El manejo del cultivo fue el mismo que usó cada finca a nivel comercial, excepto en la aplicación de la nutrición, donde los tratamientos fueron métodos de fertilización distintos. En general, los insumos utilizados en las fincas, excepto la fertilización, fueron los siguientes: para el control de malezas: Fluazifop-p-butyl 12,5 EC, Diuron 80 WP y el herbicida fosfónico: glifosato 35,6 SL, en dosis de 1,2 l/ha, 1,0 kg/ha y 2,0 l/ha, respectivamente. Para el control de ácaros, mosca blanca, trips y áfidos se hizo uso de los insecticidas Lactona, Macroclíclica-Abamectina 1,8 EC; Imidacloprid,-Deltametrina 19 OD; Deltametrina-Triazophos 21,2 EC y Dimethoato-Cipermetrina 25 EC, en dosis de 0,15 l/ha, 0,3 l/ha, 1,0 l/ha y 0,5 l/ha, respectivamente. Mientras que para enfermedades se aplicó Oxicloruro de cobre al 85% a 2,5 kg/ha y Carbendazina 50 SC a 0,5 l/ha. El manejo agronómico específico fue el siguiente:

Finca Pepín, suelo inceptisol. La preparación del suelo consistió en dos pases de rastra y un alomillado. La siembra se hizo el 14 de julio de 2012, con postura horizontal (acostada), a 1,5 m entre alomillado y 0,71 m entre plantas (9284 plantas por hectárea) sembradas en hilera simple. Se hizo aplicación de herbicida pre y pos emergente del cultivo y las malezas y control mecánico (tres chapias). El control fitosanitario de plagas o enfermedades se realizó con una aplicación de fungicida a base de cobre (Cu). La fertilización para el tratamiento testigo (testigo comercial) fue la utilizada por la finca a nivel comercial. La fertilización foliar para los tratamientos foliar y completo más foliar fue dirigida con bomba manual de motor a una descarga de 200 l/ha. A nivel comercial, las aplicaciones se hicieron con "Sprayboom". La cosecha se realizó 10 meses después de la siembra.

Finca Laberinto, suelo ultisol. Se utilizaron las mismas camas de la siembra anterior, que no fueron labradas para la siembra hecha el 27 de julio de 2012, en doble hilera separadas 1,8 m sobre las camas y 0,8 m entre plantas, para una densidad de 13888 plantas por hectárea. Se hizo la aplicación del herbicida Glifosato, preemergente respecto al cultivo, además de control mecánico (tres chapias). El control fitosanitario de las plagas presentes se realizó con aplicaciones de insecticidas e insecticidas-acaricidas por presencia de mosca blanca, trips y signos de ácaro, principalmente en el mes de noviembre, donde hubo menos lluvias. La fertilización en el tratamiento testigo fue la misma que realizó la finca a nivel comercial y que se describe en el punto de tratamientos. Las aplicaciones foliares, tanto de plaguicidas como de fertilizantes foliares, se llevaron a cabo con bomba de espalda de motor. Sin embargo, a nivel comercial la finca usa "Sprayboom". La cosecha se realizó 12 meses después de la siembra, pero no fue posible evaluarla por razones operativas y administrativas.

Finca en Sonafluca, suelo andisol. La preparación del suelo consistió en dos pases de rastra y un alomillado. A pesar de la selección de la semilla, en esta finca al momento de la cosecha hubo pérdida por presencia de daños por "cuero de sapo". La siembra se hizo el 24 de enero de 2013, en hilera simple a una distancia entre lomillos de 1,4 m y entre matas de 0,49 a 0,51 m, para una densidad de 14580 plantas por hectárea. Se aplicó herbicida Glifosato preemergente respecto al cultivo y tres chapias como control mecánico de malezas. Para el control fitosanitario de las plagas presentes, se hicieron aplicaciones de insecticidas e insecticidas-acaricidas por presencia de ácaro, mosca blanca y trips, principalmente en el mes de abril, cuando las lluvias fueron muy pocas y las temperaturas altas. La fertilización para el tratamiento testigo fue la

misma que realiza la finca a nivel comercial y que se describe en el punto de tratamientos. La cosecha se realizó en noviembre de 2013, 10 meses después de la siembra.

Tratamientos

En los tres lugares se aplicaron cuatro tratamientos con fertilizantes: tratamiento completo al suelo (TC); tratamiento foliar (TF), en el que solamente se aplicaron abonos vía foliar, tres a cinco aplicaciones con productos iguales o similares a los usados por el productor de la finca; tratamiento completo al suelo más foliares (TCF), el cual consistió en el uso del TC más el TF y el tratamiento testigo (TT), el cual varió según la forma de fertilizar el cultivo por parte de los tres productores de las respectivas fincas, este tratamiento siempre constó de fertilización al suelo más complemento foliar.

El TC fue igual en las tres fincas. Este tratamiento constó de tres aplicaciones de fertilizantes al suelo, basado en 130, 50 y 200 kg/ha de N, P_2O_5 y K_2O , respectivamente: a los 30 días DDS, a los 75 DDS y a los cuatro y medio meses (135 DDS), es decir, a la mitad de la fase de crecimiento y desarrollo que comprende el período desde los 90 a los 180 DDS (Furcal et al., 2009). Las fuentes de estos tres elementos fueron urea y nitrato de amonio como fuentes de N, fosfato monoamónico (MAP) como fuente de P y para suplir el K se usó cloruro de potasio (KCl).

Los tratamientos TF y TT son los que normalmente utilizan los distintos productores en la zona, con variaciones en dosis, productos y frecuencia según criterios personales y la capacidad económica de cada productor. Algunos agricultores utilizan solo foliar con variaciones de la época de aplicación y tipo de producto; esta modalidad la usan principalmente los pequeños y medianos agricultores, otros usan una fertilización al suelo más complemento de tres a seis fertilizaciones foliares, también existen productores que fertilizan dos veces al suelo y aplican complemento con fertilizaciones foliares.

El tratamiento TCF se aplica debido a que se ha observado que el cultivo de yuca extrae una alta cantidad de nutrimentos (Navarro 1983) y su respuesta a un buen manejo y clima apropiado arroja dividendos, tanto en producto comercial como económico, cuando se utilizan semillas seleccionadas y el destino de la producción es la exportación.

Las aplicaciones de los tratamientos TC y TCF se basaron en las etapas fenológicas del cultivo de mayor absorción, según información de estudios realizados por De Diego y Quirós (2006); establecimiento/tuberización, que comprende el período de los 30 a los 90 DDS y en la fase de crecimiento y desarrollo (de 90 a 180 DDS). Los productores aplicaron el TT bajo esos mismos criterios.

A continuación, se detallan los tratamientos TF y TT para cada una de las fincas.

Finca con suelo inceptisol de fertilidad media

Tratamiento foliar (TF). Aplicación de la fertilización solo vía foliar. Las aplicaciones se realizaron con bomba de motor y un volumen de agua de 200 l/ha. Se hicieron tres aplicaciones, a los 74, 95 y 146 DDS, siempre con coadyuvante a la dosis 0,5 l/ha. En la primera aplicación se usaron los productos Protifer K, Pescagro y Metalosato de Ca, Zn y Mg en dosis de 0,5 l/ha, 1,5 l/ha y 1 l/ha para cada uno de los metalosatos. A los 95 DDS se aplicaron Bioplant B 10%, Pescagro y Humimax en dosis de 0,5 l/ha, 1,5 l/ha y 1 l/ha, respectivamente. En la última aplicación se usaron Bioplant B 10%, Pescagro y Protifer K en las mismas dosis que las aplicaciones anteriores de estos productos.

Tratamiento completo al suelo más foliar (TCF). Este comprende el tratamiento TC, común para las tres localidades, más el TF de la finca correspondiente, en este caso la finca con suelo inceptisol.

Tratamiento testigo (TT). Este consistió en la aplicación de fertilizantes al suelo a los 30, 75 y 112 DDS, con fosfato diamónico (DAP) (131 kg/ha), Magnesamón en la dosis de 153, 86 kg/ha y fórmula completa 19-4-19-3-0.1(B)-0.1(Zn)-1.8(S) en la dosis de 126,38 kg/ha. Además, se hicieron cuatro aplicaciones foliares a los 30, 57, 101 y 126 DDS. En la primera aplicación se usaron los productos Folitech, triple 20 (20-20-20), miel de purga, Oxicob (fungicida a base de cobre) y Tecamin max, en dosis de: 1 l/ha, 2,4 kg/ha, 12 l/ha, 2,2 kg y 0,6 l/ha, respectivamente. En la segunda aplicación se usaron los mismos productos en las mismas dosis, excepto Oxicob y Tecamin max, y la dosis de Folitech fue de 1,4 l/ha. A los 101 DDS se aplicó Folitech (1,4 l/ha) y miel de purga (12 l/ha). Finalmente, a los 226 DDS se aplicaron miel de purga y nitrato de potasio en dosis de 12 l/ha y 3,5 kg/ha, respectivamente.

Finca con suelo ultisol de fertilidad baja

En esta finca (Laberinto) se incluyó cal dolomita en una dosis de 500 kg/ha en todos los tratamientos, debido a que el suelo presentó pH bajo y bajas cantidades de Ca y Mg.

Tratamiento foliar (TF). Se hicieron cinco aplicaciones foliares, distribuidas a los 40, 63, 70, 91 y 105 DDS. Las aplicaciones foliares incluyeron macroelementos N-P-K y microelementos quelatados, asperjados con bomba de motor. En la primera y tercera aplicación los productos y dosis fueron Pescagro, triple 20 (20-20-20) y miel de purga, en dosis de 2 l/ha, 2 kg/ha y 4 l/ha, respectivamente. A los 63 DDS, además de los productos anteriores en la misma dosis, se aplicó Biokel Zn en una dosis de 165 g/l. A los 91 y 105 DDS se aplicó Pescagro en una dosis de 2 l/ha, combinado en la primera aplicación con Protifert K y en la segunda con miel de purga en dosis de 0,5 l/ha y 4 l/ha, respectivamente.

Tratamiento completo al suelo más foliar (TCF). Comprende el tratamiento completo (TC), común para las tres localidades, más el TF de la finca correspondiente.

Tratamiento testigo (TT). El Tratamiento testigo de la finca con suelo ultisol consistió de dos fertilizaciones al suelo con DAP a los 30 DDS y KCl a los 120 DDS en dosis de 138 y 92 kg/ha, respectivamente, y cinco aplicaciones foliares a los 40, 63, 70, 95 y 105 DDS; estas aplicaciones fueron las mismas que se aplicaron en el tratamiento foliar (TF) de esta finca.

Finca con suelo andisol de fertilidad alta.

Tratamiento foliar (TF). Se hicieron cuatro aplicaciones foliares, distribuidas a los 26, 60, 75 y 120 DDS. Las aplicaciones foliares se hicieron con bomba de motor, incluyendo macroelementos N-P-K y microelementos más un coadyuvante (1 l/ha); los productos usados fueron triple 20 (20-20-20) con elementos menores y Raíz planta 500 (p/v) a los 26 DDS, con la dosis de 2 kg/ha y 1 l/ha, respectivamente. A los 60 DDS se aplicaron de la misma forma los dos productos anteriores. A los 75 DDS se aplicaron vía foliar los productos Tecnokel Zn, Bioplant B 10% y Tecnokel Mg 6% en dosis de 1 l/ha, 0,5 l/ha y 2 l/ha, respectivamente. Finalmente, a los 120 DDS se aplicaron los fertilizantes foliares triple 20 (20-20-20) con elementos menores, Bioplant B10%, Pescagro y Protifert K, los dos primeros en la misma dosis que la aplicación anterior y los dos últimos en una dosis de 1,5 l/ha cada uno.

Tratamiento completo al suelo más foliar (TCF). Comprende el tratamiento completo (TC), común para las tres localidades, más el TF de la finca correspondiente.

Tratamiento testigo (TT). El tratamiento testigo de la finca con suelo andisol consistió de dos fertilizaciones al suelo con las fórmulas 10-30-10 y 15-3-31 a los 66 y 135 DDS en dosis de 122,7 y 107 kg/ha, respectivamente, y tres aplicaciones foliares a los 26, 60 y 73 DDS con los productos triple 20 (20-20-20) con elementos menores y Raíz planta 500 (p/v) en las dos primeras fechas, en dosis de 2 kg/ha y 1 l/ha, respectivamente; en la última aplicación (73 DDS)

únicamente se usó Pescagro en la dosis de 2 l/ha. Las aplicaciones foliares siempre fueron mezcladas con un coadyuvante en dosis de 1 l/ha.

Diseño experimental

Descripción del área experimental

La ubicación del área experimental en cada localidad estuvo sujeta a criterio técnico; se escogieron sectores que presentaron homogeneidad en la textura del suelo y pendiente uniforme. Además de estas condiciones, los lotes seleccionados fueron aquellos donde el cultivo recién cosechado fuera yuca, para que los suelos estuvieran sujetos a las mismas extracciones nutricionales y residuos orgánicos del cultivo.

El experimento tuvo un área total de 5070,75 m², 6063 m² y 1120 m² en las fincas con suelo inceptisol, ultisol y andisol, respectivamente. En total se trabajó con 16 unidades experimentales por localidad, es decir, cuatro tratamientos con cuatro repeticiones cada uno.

Para el análisis de los datos de cada variable se utilizó el modelo matemático de un diseño completo al azar. Primeramente, se realizaron pruebas a priori o de supuestos como la Shapiro-Wilks, para verificar la existencia de normalidad entre los datos. Luego se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) con un nivel de confianza de 95%; cuando existieron diferencias significativas entre tratamientos, se sometieron a la prueba de medias de rango único de Tukey. Además, se realizó una prueba contrastando los tratamientos entre sí, tomando en cuenta la relación entre ellos y los grados de libertad de estos. Estas pruebas y el ANDEVA se realizaron con el paquete estadístico InfoStat versión 2008 (Balzarini et al., 2008).

Variables de medición de la información

Análisis foliar

El muestreo para este análisis se realizó a los siete meses de edad del cultivo. Se tomó la tercera hoja, desde el ápice hacia abajo, sin el pedúnculo. Se analizaron N-total, P, K, Mg, S y Ca y elementos menores Fe, Mn, Cu y Zn. Todos los análisis químicos, tanto foliares como de suelos se hicieron en el mismo laboratorio, el N por el método de Dumas, K, Mg, Ca, los menores por combustión seca y luego determinación con absorción atómica y el P por espectrofotometría visible.

Materia seca (follaje, tallos y raíces)

Se tomaron muestras de materia seca en tres épocas durante el crecimiento y desarrollo del cultivo, cada 60 días a partir de los primeros dos meses y medio inclusive.

Para la obtención de esta variable se dejó un borde en ambos lados de las hileras de yuca en cada unidad experimental, dejando una sección central cosechable del área útil. Dentro de este borde y el área útil se tomó una planta por repetición; luego de ser separada en las partes hojas, tallo y raíz, las muestras fueron transportadas al laboratorio, donde se pesaron antes y después de ser secadas durante 72 horas a 60 °C en un horno con ventilación.

Rendimiento

La sección central del área útil de cada unidad experimental se utilizó para medir el rendimiento del cultivo (raíz) al momento de la cosecha. Se tomaron todas las plantas presentes en una hilera en 5 m lineales en la finca con suelo inceptisol, mientras que en la finca con suelo andisol se tomaron 3 m lineales en tres hileras en cada unidad experimental. En la finca con suelo ultisol el experimento no fue evaluado al momento de la cosecha, por razones administrativas y operativas que no permitieron datos confiables.

En las dos fincas en que se hizo la cosecha se realizó una categorización de la producción obtenida por calidad, en producto exportable como categoría 1 o de “primera” y categoría 2 o de “segunda” clasificado como producto para el mercado nacional o local; ambas categorías se pesaron en el campo con balanza tipo reloj con capacidad para 20 kilogramos. También se pesó el rechazo presente en cada repetición. En el caso de la localidad con suelo andisol, además de estas dos clasificaciones, se separaron las yucas con presencia del daño conocido como “cuero de sapo”, que invalida la producción comercialmente.

Análisis económico

Finalmente, se hizo un análisis económico con los costos variables de los fertilizantes de cada uno de los tratamientos contrastándolos con la producción de yuca obtenida.

Resultados y discusión

Crecimiento en peso seco

La acumulación de materia seca (MS) se registró a partir de los 2,5 meses de edad. La MS antes de esa fecha es baja (De Diego y Quirós, 2006), a partir de ese momento la acumulación sigue una curva creciente. El incremento fue más acelerado desde los 6,5 meses en la finca Pepín respecto a las otras dos localidades, donde el crecimiento importante se inició antes de esa fecha (4,5 meses), producto de la MS de las raíces y el tallo, principalmente (figuras 1, 2 y 3).

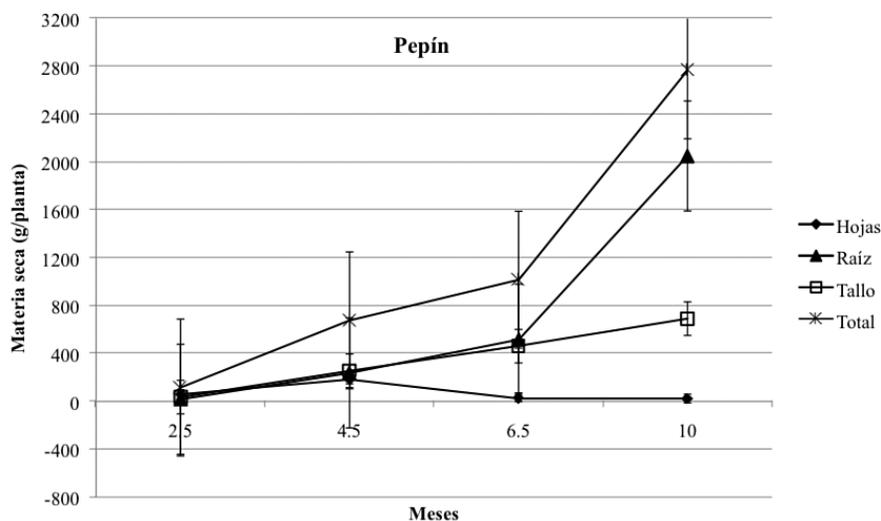


Figura 1. Acumulación de materia seca en la planta de yuca. Finca Pepín. Los Ángeles, La Fortuna, San Carlos, Costa Rica. Enero de 2014.

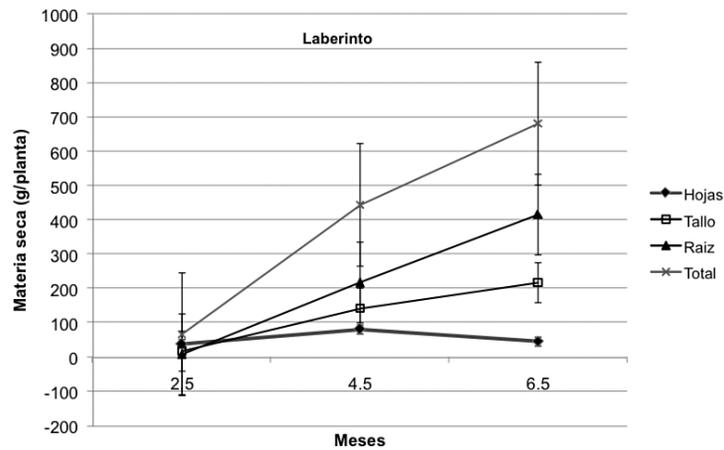


Figura 2. Acumulación de materia seca en la planta de yuca. Finca Laberinto, El Parque, Los Chiles. Costa Rica. Enero de 2014.

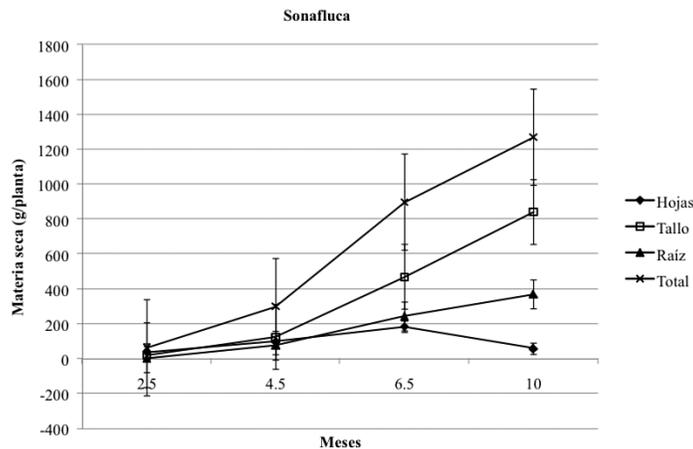


Figura 3. Acumulación de materia seca en la planta de yuca. Finca de Sonafluca. La Fortuna, San Carlos, Costa Rica. Enero de 2014.

La acumulación de MS fue menor en la finca Laberinto, en el cantón de Los Chiles, en relación con las otras dos fincas ubicadas en La Fortuna del cantón de San Carlos, producto en gran medida del nivel de fertilidad de los suelos (cuadro 1). Sin embargo, la distribución de la MS por estructura en la planta de este cultivo es similar, sin importar las condiciones de fertilidad de suelos y ligeras diferencias en precipitación y temperatura entre localidades, comportándose las hojas como la parte de la planta con menor cantidad de MS en las tres fincas, y las raíces como el órgano de mayor acumulación de MS, salvo en el caso particular de Sonafluca.

Este crecimiento concuerda con lo expuesto por Howeler (1981) y Cadavid (2002), quienes coinciden en que la acumulación de materia seca disminuye en las hojas después de los cinco meses, no así la del tallo y la de las raíces tuberosas. La mayor actividad fisiológica de la planta ocurre entre el segundo y quinto mes después de haberse sembrado; este resultado concuerda con lo expuesto por De Diego y Quirós (2006), quienes indican que durante los primeros cuatro meses la prioridad de la planta es la producción de biomasa aérea (tallo y hojas), con la cual

en los meses siguientes podrá almacenar reservas en las raíces productivas y en el resto de la planta. Lo expuesto en este párrafo manifiesta que el manejo nutricional debe iniciarse después del primer mes e intensificarlo a partir del segundo y hasta el quinto mes.

La MS de las raíces sobrepasa la de las estructuras aéreas (hojas y tallos) a partir del tercer mes en las fincas Laberinto y Pepín. Este resultado es similar a lo que expresan Furcal et al. (2009), quienes indican que el impulso mayor de la MS es producto del crecimiento de las raíces después de los 90 DDS, previamente tuberizadas; este resultado reafirma la prioridad de la planta de acumular nutrimentos en sus sitios de reserva (yuca). De manera similar, Cadavid (2002), Mejía de Tafur (2002) y Cadavid (2008) manifiestan que a partir del segundo o tercer mes después de la siembra, las raíces comienzan a acumular almidón y a engrosar hasta la cosecha, dando forma a las raíces tuberosas. En la localidad de Sonafluca sucedió lo contrario a lo anterior, donde el tallo fue la estructura con mayor aporte de MS, posiblemente debido a la afectación por plagas (ácaros, trips y mosca blanca) entre el tercer y cuarto mes después de la siembra, las cuales afectan mayormente a este cultivo en la época seca y con altas temperaturas. El daño por estas plagas hizo que el cultivo detuviera su crecimiento, luego con la presencia de lluvias y el cese del ataque de las plagas, se produjo una ramificación del tallo; este comportamiento coincide con lo expuesto por Bellotti et al. (2002), quienes resaltan que algunos insectos y ácaros, especialmente trips, causan daños a las yemas terminales de la planta de yuca rompiendo la dominancia apical, de manera que inducen el crecimiento de yemas laterales.

Desde el momento en que las hojas alcanzan su madurez, por este proceso fisiológico decrece la MS en ellas, información que es confirmada por Cadavid (2002), al indicar que después de los cinco meses la acumulación de MS en las hojas y pecíolos disminuye, mientras que aumenta en el tallo y la raíz. En la localidad de Sonafluca empezó a decrecer a los 6,5 meses, quizás producto de la producción de hojas después del cese del ataque de plagas entre el tercer y cuarto mes. La disminución de MS en las hojas es el resultado de la producción de menos hojas por la planta y al tamaño de éstas (Navarro, 1983), además, se debe a que los asimilados o compuestos orgánicos elaborados en las láminas foliares son redistribuidos vía floema hacia los órganos de almacenamiento, como las raíces tuberosas, donde se acumulan para formar su producto final, que es el almidón.

En la MS de la hoja acumulada a los 6,5 meses de edad, tanto en la localidad de Laberinto como en la de Sonafluca, hubo diferencias, p -valor < 0.05 . En el caso de Laberinto, el TC superó al TF, pero los tratamientos TCF, TT y TC fueron iguales; al ser los suelos de esta finca de fertilidad química baja (cuadro 1), eso podría acarrear que el tratamiento únicamente con fertilizantes aplicados vía foliar (TF) no alcanzara a cubrir las demandas nutricionales del cultivo. En la localidad de Sonafluca, los tratamientos TC y TCF difieren del tratamiento TT, este último fue similar al TF; esta diferencia estadística en MS en hojas a los 6,5 en Sonafluca no fue visible como en Laberinto y no se tradujo en el rendimiento de yuca. En la finca Laberinto se observaron hojas con un color verde menos intenso y de menor tamaño en el TF, respecto a los demás tratamientos, lo cual podría expresar la actividad fotosintética en los tratamientos.

Entre localidades, la MS por tallo fue menor en la finca Laberinto, posiblemente producto de la menor fertilidad del suelo que en las otras dos fincas, dado que la densidad de siembra fue similar a la de Sonafluca. En la finca Pepín hubo una ligera superioridad de MS por planta en tallo sobre la finca de Sonafluca, ambas ubicadas en La Fortuna; la posibilidad de que se produjera este resultado pudo deberse a que la densidad de planta fue mucho menor (menor competencia entre plantas) en la finca Pepín (9284 ptas/ha) que en la finca de Sonafluca (14580 ptas/ha).

Efecto de los tratamientos en la materia seca de las raíces y en la concentración de nutrimentos en las hojas

En la finca Pepín, las raíces iniciaron una diferencia marcada entre tratamientos a partir de los 6,5 meses, presentándose diferencias, p -valor $< 0,05$, al momento de la cosecha del cultivo, donde el TT alcanzó mayor peso seco que los demás. Se justifica este mayor peso en el manejo de la fertilización muy diferente respecto a los demás tratamientos; esta fertilización estuvo compuesta por tres aplicaciones al suelo con diferentes fórmulas, concentrando la mayoría del fósforo a los 30 DDS en un suelo deficiente en este elemento y posteriormente dos fórmulas completas que aportaron diferentes nutrimentos, aunado a cuatro aplicaciones foliares con varios productos; este plan de fertilización permitió un balance nutricional que, en gran medida, favorece un buen comportamiento del cultivo.

Los resultados del análisis foliar realizado en la finca Pepín a los siete meses muestran una mayor concentración de nitrógeno total (NT), fósforo (P), potasio (K) y calcio (Ca) en el TT respecto de los demás, no así en las otras fincas en estudio. La alta concentración de P en las hojas posiblemente es producto de la aplicación concentrada realizada al inicio (30 DDS) y luego con una fuente hecha a base de polifosfato, esta fuente ayuda a incrementar la absorción de P por las plantas (IPNI, 2013). También se aplicó Magnesamón, que además de suplir Ca, es una fuente de N y Mg solubles. En el capítulo siguiente se detallan estas fórmulas.

En las fincas Laberinto de la localidad de Los Chiles y la de Sonafluca en La Fortuna de San Carlos, las raíces presentaron un crecimiento acelerado, pero sin encontrarse diferencias ($p \geq 0,05$) entre las medias de los tratamientos a los 2,5; 4,5 y 6,5 meses en la finca Laberinto y hasta la cosecha a los 10 meses en la de Sonafluca. Posiblemente no hubo diferencias entre tratamientos en estas dos fincas, debido a que no hubo un tratamiento con aplicaciones al suelo tan variada como en el TT en la finca Pepín; además, los suelos de la finca de Sonafluca presentan alta fertilidad. Molina (2002) explica que cuando los suelos tienen buena fertilidad, la respuesta del cultivo a la aplicación de los elementos que presentan niveles adecuados en el suelo, es baja.

Desde el punto de vista de concentración de nutrientes en las hojas en la finca de la localidad de Sonafluca, no hubo efecto de los tratamientos; probablemente al tener el suelo una fertilidad alta aporta suficientes nutrimentos solubles a los que el cultivo puede acceder, sin necesidad de aportes de fertilizantes al suelo ni a las hojas.

Respecto a la finca Laberinto, una localidad con suelo de fertilidad baja, se encontró diferencia del TCF sobre el TC en magnesio. Del mismo modo, hubo diferencias significativas del TF sobre el TC en calcio; estos elementos (Mg y Ca) se suministraron vía foliar en los tratamientos TCF y TF a través de algunos fertilizantes foliares aplicados en las cinco fertilizaciones hechas, mientras que en el TC no hubo aporte de estos elementos.

Efecto de los tratamientos en el rendimiento del cultivo

Finca Pepín

El TT en estos suelos de fertilidad media fue el que obtuvo un mayor tonelaje total de yuca por hectárea (16,1 t/ha) y a su vez fue el tratamiento que alcanzó más cantidad de yuca de primera calidad que de segunda y menor cantidad de rechazo (figura 4), presentándose p -valor $< 0,05$ en yuca de primera calidad.

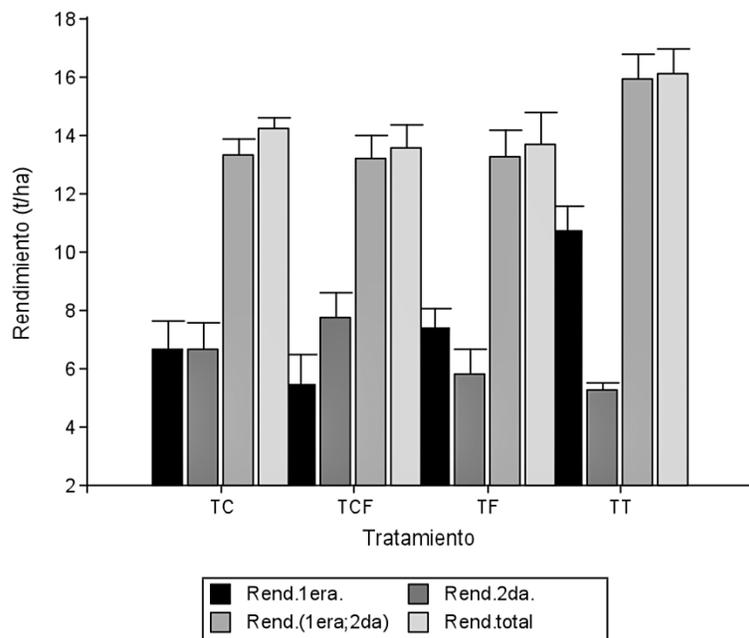


Figura 4. Rendimiento de yuca según los tratamientos en finca Pepín. Los Ángeles, La Fortuna, San Carlos, Costa Rica. Enero de 2014.

Los rendimientos obtenidos no fueron altos pero sí más elevados que el promedio nacional, que es de alrededor de 12 t/ha. El rendimiento relativamente bajo pudo deberse al efecto del clima en una etapa fundamental en la fisiología del cultivo, edad entre seis y siete meses, donde hubo pérdida de las hojas por escasez de lluvias en los meses de enero y febrero, edad que corresponde a la fase de engrosamiento (Furcal et al. 2009). Este aspecto justifica las raíces delgadas encontradas, argumento que es reforzado por Mejía de Tafur (2002), quien indica que la producción de yuca se determina por la tasa de producción de MS y por su acumulación de fotosintatos en las raíces tuberosas, por lo tanto, la capacidad fotosintética es fundamental y esta depende, entre otros procesos, de factores ambientales como la intensidad de la luz, la temperatura y la lluvia, produciéndose disminución del área foliar en períodos secos como un mecanismo de defensa, afectándose la MS, caso que no se produce cuando la defensa es por cierre estomático. Esta pérdida de índice de área foliar se recupera al terminar el período de falta de agua, pero con el consumo de almidón de las raíces y el tallo.

El mayor rendimiento del TT pudo deberse al aporte de N y de P a temprana edad y a la variabilidad de los productos usados tanto a nivel de suelo como foliar. A pesar de que la cantidad de N aplicado al TT fue menor con respecto al TC o el TCF, el aporte de este elemento con la fuente DAP a los 30 DDS fue de 23,58 kg/ha, mientras que con los demás tratamientos fertilizados al suelo se aplicaron 10,57 kg/ha. Esta cantidad de fertilizante nitrogenado pudo haber influido de manera más eficiente en la edad temprana del cultivo. La dosis de P utilizada en el TT a los 30 DDS, a través 131 kg de DAP/ha, fue de 60,26 kg de P_2O_5 , todo aplicado al inicio de la siembra, mientras que en el TC y TCF se utilizó a los 30 DDS 7,49 kg P_2O_5 a partir de MAP, que es el 15% de la dosis total de 50 kg de P_2O_5 /ha aplicado y en el TF no se utilizó P al suelo. Al adicionar una mayor cantidad de P al inicio junto con N, es posible que en el suelo haya habido mayor disponibilidad de estos macronutrientes para la planta.

Además de utilizar el DAP, en el TT el P también fue aportado con una fuente de fertilizante a base de polifosfatos a los 3,7 meses, época durante la cual las curvas de absorción de P presentadas por Gadea et al. (2012) muestran una ascendencia importante. Además, el

TT recibió fertilizaciones foliares a los 30 DDS, que contaron con elementos mayores N-P-K, microelementos y una fuente energética, miel de purga. Posteriormente tuvo otras aplicaciones foliares y dos granulares al suelo, una aportando N, Ca y Mg (75 DDS) y la otra, a los 3,7 meses de edad, aportando elementos tanto mayores como menores.

El nivel crítico de P establecido en suelo para el cultivo de yuca se encuentra en 10 mg/kg (Howeler, 1981; Cadavid, 1988; Howeler y Cadavid, 1990; y Cadavid, 2002). Opinión similar manifiestan Bertsch y Méndez (2012). Cadavid (2002) encontró que en suelos con 3 ppm de fósforo hubo respuesta hasta la aplicación de 400 kg/ha de este elemento, triplicándose el rendimiento con el aporte de 50 kg de este elemento/ha. El análisis químico realizado en la finca Pepín mostró que el P disponible en el suelo se encontraba en 5 mg/L, reflejando que se mostraba en menor cantidad de lo que se necesita para que el cultivo pueda expresar buenos rendimientos y el porcentaje de materia orgánica fue de 4,4. Esto explica en parte, por qué la respuesta del cultivo se manifiesta con el aporte de los elementos N y P.

En ese mismo orden el TT fue fertilizado a los 3,7 meses con la fórmula 19-4-19-3-0,1(B)-0,1(Zn)-1,8(S) y aportó una cantidad de 24 kg K₂O. Esta cantidad aplicada es baja en comparación con lo aplicado en el TC y TCF, que en total recibieron 200 kg de K₂O/ha. Este comportamiento puede tener como respuesta que el K no es el elemento que marcó la diferencia en rendimiento entre los tratamientos, lo que quiere decir que el contenido medio de 0,34 cmol(+)/L presente en el suelo al parecer fue suficiente para obtener buenos rendimientos, comprobando así lo expuesto por Molina (2002), quien establece que cuando el contenido en el suelo es medio o alto, se asume que la respuesta a la aplicación del fertilizante que contenga el elemento no es significativa, debido a que no influye en un incremento de la producción, variando según las condiciones existentes.

Al aplicar elementos en conjunto, sus efectos pueden ser antagónicos entre sí en el suelo, pero también pueden ser interactivos o sinérgicos, generando rendimientos superiores a la aplicación individual de cada uno de ellos (Villalobos y Killorn, 2001).

De Diego y Quirós (2006), Asher et al. (1980) y Howeler (1981) reportan la absorción en yuca en el orden K>N>Ca>P; mientras que ese mismo orden, pero con la diferencia de mayor absorción de N que de K, es reportado por Cadavid (2002), Bardona (2003) y Rodríguez et al. (2009). A pesar de que los resultados del análisis de suelo del lote en estudio presentan 5,4 cmol(+)/L de calcio, es posible que este elemento aplicado en el TT a través del fertilizante Magnesamón (16,92 kg/ha de CaO) a los 2,5 meses de edad tenga influencia en el rendimiento, puesto que el valor del análisis de suelo no está muy distante del nivel crítico de 4 cmol(+)/L mencionado por Bertsch y Méndez (2012).

Finca Laberinto

En la finca Laberinto, el comportamiento del cultivo presentaba expectativas interesantes y podría esperarse que en un suelo ultisol de baja fertilidad, la fertilización únicamente foliar sería insuficiente para la obtención de buenos rendimientos. En los tratamientos TC, TCF y TT (con fertilización al suelo) se observaron raíces más grandes que las percibidas en el TF; además, en este tratamiento las hojas presentaron color verde claro, respecto a los demás tratamientos con hojas de color verde oscuro. Estas observaciones se hicieron en el campo, pero no se pudieron evaluar por problemas operativos al momento de la cosecha.

El análisis químico de suelo en esta finca, al igual que en la finca Pepín, reflejó que el P estuvo por debajo de 10 mg/L. Esta baja disponibilidad puede deberse a lo indicado por Bertsch y Méndez (2012), de que en suelos ultisoles de Costa Rica donde el pH es menor a 5,5 se favorece la formación de fosfatos de Fe y Al insolubles; en ambas fincas el pH estuvo por debajo de este valor.

El manejo de la fertilización al inicio en las fincas Pepín y Laberinto fue el mismo; en los dos lugares decidieron colocar todo el P al inicio (alrededor de los 30 DDS) con la fuente DAP. Puede extraerse como conclusión general que una alta fertilización con P al inicio de la siembra es clave en suelos que presenten deficiencia del elemento por debajo del nivel crítico, con la posibilidad de generar buena respuesta por el cultivo; según Grant et al. (2001), si se limita la disponibilidad temprana de P en el inicio del cultivo, pueden producirse restricciones de las que la planta no se recupera. Si la fertilización con P se hace fraccionada, posiblemente el cultivo no responda de la misma manera debido a la mayor fijación de este elemento.

Finca Sonafluca

Respecto a la finca de Sonafluca, no hubo diferencias (p -valor $\geq 0,05$) entre tratamientos, sin embargo, el de mayor rendimiento fue el TT, como se observa en la figura 5. Este tratamiento recibió tres aplicaciones de fertilizaciones foliares y dos aplicaciones al suelo a los 66 y a los 135 DDS con las fórmulas 10-30-10 y 15-3-31, respectivamente, con aportes de 28,32; 40 y 45,44 kg/ha de N, P_2O_5 y K_2O , respectivamente, muy por debajo del aporte al suelo por fertilización en los TC y TCF. La razón de que no hubiera respuesta a la fertilización posiblemente se explica por lo expuesto por Molina (2002), quien establece que cuando el contenido en el suelo es medio o alto, se asume que la respuesta a la aplicación del fertilizante que contenga el elemento no es significativa.

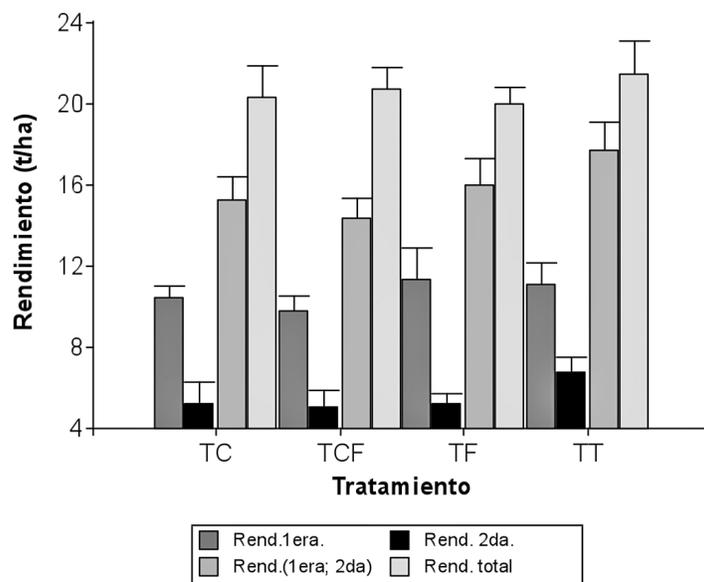


Figura 5. Rendimiento de yuca según los tratamientos en finca de Sonafluca. La Fortuna, Costa Rica. Enero de 2014.

Es importante resaltar que el rendimiento alcanzado en esta finca (20,85 t/ha sin rechazo) fue muy superior al de la finca Pepín (16,1 t/ha con rechazo), quizá debido a la más alta fertilidad de los suelos en la de Sonafluca (Cuadro 1) y por haberse sembrado a una densidad mayor (14580 ptas/ha vs 9284 ptas/ha), puesto que las dos se cosecharon a los 10 meses de edad. Esta alta densidad se puede traducir en altos rendimientos cuando los suelos son de fertilidad alta como los de Sonafluca o cuando se fertilizan adecuadamente de acuerdo con los resultados de análisis de suelos y foliares.

Rentabilidad de los tratamientos

El tratamiento más económico fue el TF; el costo/ha de los fertilizantes aplicados durante el ciclo de producción fue mucho menor que en los demás tratamientos, $\$51075,00$ y $\$82750,00$ en las fincas Pepín y Sonafluca, respectivamente. Esta sería la primera opción para recomendar, debido a que presenta un rendimiento aceptable a un costo mucho menor que los demás tratamientos (cuadro 2); pero tiene su limitante, ya que desde el punto de vista técnico, este tratamiento a través del tiempo posiblemente no sea rentable por el agotamiento nutricional que pueda generar al suelo en el futuro. En este sentido, Cadavid (2002) hace referencia al potasio en suelos cultivados continuamente de yuca, sin aporte nutricional. Además de demostrar que después de 15 años aplicando 75 kg de P/ha, este elemento se incrementó en un suelo ultisol a 35 ppm, en contraste con 2,85 ppm de P en el lote sin aplicación.

Al considerar que el rendimiento fue similar entre los tratamientos TC, TCF y TF, y el costo por hectárea de cada uno fue diferente, técnica y económicamente se podría concluir que la mejor alternativa es el TT, ya que con un costo intermedio entre los tratamientos se obtiene un buen rendimiento; además, se podría asegurar un mejor uso de los nutrientes aportados por el suelo al cultivo sin agotar nutricionalmente este recurso (suelo) de los nutrientes que se aportan. Otra consideración que se debe tener en cuenta es que el TT es diferente en cada localidad, siendo el más común entre los pequeños productores el usado en la finca de Sonafluca; no obstante, si se selecciona el TT usado en la finca Pepín como el mejor, este cubriría en mayor grado los requerimientos de nutrientes del cultivo, cuando la finca se encuentra en suelos de baja fertilidad; en cambio, en suelos con fertilidad alta la posibilidad de respuesta a esta fertilización es baja y se podría afectar la rentabilidad del cultivo.

Cuadro 2. Costo de los fertilizantes y rendimiento de cada tratamiento. Fincas Pepín y de Sonafluca. La Fortuna, San Carlos, Costa Rica. Enero de 2014.

Tratamiento	Rendimiento total /ha		Costo Colones/ha	
	Finca Pepín	Finca de Sonafluca	Finca Pepín	Finca de Sonafluca
Tratamiento completo al suelo (TC)	14,27	19,57	$\$295\,752,17$	$\$285\,211,37$
Tratamiento completo al suelo + foliar (TCF)	13,57	20,03	$\$360\,922,17$	$\$367\,961,37$
Tratamiento foliar (TF)	13,67	19,59	$\$51\,075,00$	$\$82\,750,00$
Tratamiento testigo (TT)	16,10	20,85	$\$222\,340,08$	$\$128\,976,67$

Equivalencia: $\$560$ = un dólar estadounidense, enero de 2014.

Conclusiones

Bajo las condiciones de este experimento, se concluye que:

El incremento acelerado de materia seca (MS) se produjo a partir del 4,5 meses, debido principalmente, a las raíces tuberosas. Sin embargo, la MS de hojas decae después de los 5 meses. Esta, estadísticamente fue inferior en el tratamiento foliar respecto al tratamiento completo en la finca con suelo ultisol a los 6,5 meses, lo que pudo deberse a la baja fertilidad del suelo.

El tratamiento testigo, en la finca de suelo inceptisol presentó diferencia en rendimiento de yuca de primera calidad, debido en gran medida, a la fertilización balanceada aplicada con este tratamiento.

En los dos órdenes de suelos donde el cultivo se fertilizó con fosfato diamónico (18-46-0), fuente alta en fósforo (P) y que tiene nitrógeno, al inicio del crecimiento (30 DDS), la respuesta fue alta. En cambio, la fertilización fraccionada con P en los tres órdenes de suelos, estos tienen niveles bajos de este elemento, no produjo buenos resultados.

La fertilización con alta dosis de potasio en los tres órdenes de suelos, los cuales tienen niveles medios de este elemento, no produjo efectos importantes respecto a dosis bajas de este elemento aplicadas a los suelos, combinadas con aplicaciones foliares.

La concentración de nutrimentos en las hojas, a los siete meses de edad del cultivo, y el rendimiento de yuca, reflejaron el nivel alto de fertilidad del suelo andisol y la fertilización balanceada aplicada en el suelo inceptisol.

El tratamiento fertilización foliar fue el más económico en los suelos de fertilidad media y alta. Sin embargo, si esta no es combinada con la fertilización al suelo puede ser negativa a través del tiempo, por la disminución de la capacidad productiva de los suelos.

Bibliografía

- Asher, C. J., Edwards, D. G. & Howeler, R. H. (1980). *Desórdenes nutricionales de la yuca*. Cali: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). 48 p.
- Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M., Casanoves, F., Di Rienzo, J. A. & Robledo, C. W. (2008). *InfoStat. Manual del Usuario, Versión 2008*. Córdoba, Argentina: Editorial Brujas. p 33.
- Bellotti, A. C., Arias, V. B., Vargas, H. O., Reyes Q., J. A. & Guerrero J. M. (2002). Insectos y ácaros dañinos a la yuca y su control. (pp. 160-203). CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). En Bernardo, O.P. y Hernán, C. (Comp.), *La Yuca en el Tercer Milenio: Sistemas modernos de producción, procesamiento, utilización y comercialización*. Cali: CIAT.
- Barbona, S. A. (2003). *Fertilización del cultivo de mandioca*. Instituto de Tecnología Agropecuaria-INTA-Estación Experimental Colonia Benítez Dr. Augusto G. Schulz. Programa Regional Hortícola. Centro Regional Chaco-Formosa. Proyecto Tecnología para la producción de Mandioca. Chaco, Argentina. Obtenido de:
http://www.inta.gov.ar/benitez/info/documentos/horti/Pdf/PDF_23_Fertilizacion_del_Cultivo_de_Mandioca.pdf
- Bertsch, F. (1995). *La fertilidad de los suelos y su manejo*. San José: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACCS). ISBN9968978000. 157 p.
- Bertsch, F. & Méndez, J. C. (2012). *Guía para la interpretación de la fertilidad de los suelos de Costa Rica*. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACCS). San José: Editorial Universidad de Costa Rica. 106 p.
- Cadavid, L. F. (2002). Suelo y fertilización para la yuca. (pp. 76-103). En Bernardo, O. P. y Hernán, C. (Comp.), *La Yuca en el Tercer Milenio: Sistemas modernos de producción, procesamiento, utilización y comercialización*. Cali: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).
- Cadavid, L. F. (2008). *Fertilización del cultivo de la yuca*. CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). Cali: Consorcio Latinoamericano y del Caribe de apoyo a la Investigación y al Desarrollo de la Yuca (CLAYUCA). Obtenido de:
http://www.clayuca.org/clayucanet/edicion12/fertilizacion_yuca.pdf
- Cadavid, L. F. (1988). Efecto de la fertilización y humedad relativa sobre la absorción y distribución de nutrimentos en yuca (*Manihot esculenta*, Crantz). Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agropecuarias. 290 p.
- Cenoz, P. J., López, A. & Burgos, A. (2000). Efecto de los macronutrientes en el desarrollo y rendimiento de Mandioca (*Manihot esculenta*, Crantz). Comunicaciones Científicas y Tecnológicas 2000. Universidad Nacional del Nordeste, Facultad de Ciencias Agrarias-UNNE, Corrientes, Argentina. p 3.

- Cubero F, D. (2001). *Clave de bolsillo para determinar la capacidad de uso de las tierras*. San José: MAG, ACCS. ARAUCARIA España-Costa Rica. 19 p.
- De Diego, G. E. & Quirós, B. J. (2006). Análisis de crecimiento y absorción de nutrimentos en yuca (*Manihot esculenta*) en El Tanque de La Fortuna, San Carlos, Alajuela. Tesis de Licenciatura, Escuela de Agronomía, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional, San Carlos. p 187.
- Furcal, P., Gadea, A., De Diego, G. E. & Quirós, B.J. (2009). Absorción de nutrimentos en yuca (*Manihot esculenta*, Crantz). Análisis de crecimiento del cultivo de la yuca. XVIII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Del 16 al 20 de noviembre de 2009. San José.
- Gadea, A., Furcal, P., De Diego, G. E. & Quirós, B. J. (2012). *Absorción de nutrimentos en el cultivo de yuca*. IV Congreso Internacional CLAYUCA Costa Rica. 4 y 5 de octubre de 2012, CTEC del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Santa Clara, San Carlos.
- Grant, C. A., Flanten, D. N., Tomasiwicz, D. J. & Shepard, S. C. (2001). Importancia de la nutrición temprana con fósforo. Informaciones agronómicas. Quito: Instituto de la Potasa y el Fósforo. Obtenido de [http://www.ipni.net/ppiweb/iaecu.nsf/\\$webindex/D5D0A43850DBD34205256D1100732710/\\$file/Importancia+de+la+nutrici%C3%B3n+temprana+con+P.pdf](http://www.ipni.net/ppiweb/iaecu.nsf/$webindex/D5D0A43850DBD34205256D1100732710/$file/Importancia+de+la+nutrici%C3%B3n+temprana+con+P.pdf).
- Howeler, H. (1981). Nutrición mineral y fertilización de yuca (*Manihot esculenta*, Crantz) Cali: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). 52 p.
- Howeler, H. & Cadavid, L.F. (1990). Short and long-term fertility trials in Colombia to determine the nutrient requirements of cassava. *Fertilizer Research*, 26, 61-80.
- INFOAGRO (Sistema de Información para el Sector Agropecuario Costarricense). (2009). *Síntesis analítica. Situación y tendencias del Sector Agropecuario 2004-2008*. Obtenido de:
<http://www.infoagro.go.cr/SEPSA/documentacion/informes/SintesisAnaliticaSA20180310.pdf>
- IPNI (International Plant Nutrition Institute). (2013). *Fuentes de nutrientes específicos. Polifosfato 2*. Obtenido de [http://www.ipni.net/publication/nss-es.nsf/0/0D2D851649D0F67585257BBA0059A466/\\$FILE/NSS-ES-02.pdf](http://www.ipni.net/publication/nss-es.nsf/0/0D2D851649D0F67585257BBA0059A466/$FILE/NSS-ES-02.pdf)
- López, J. (2002). Semilla vegetativa de la yuca. (pp. 49-75). En Bernardo, O. P. y Hernán, C. (Comp.), *La Yuca en el Tercer Milenio: Sistemas modernos de producción, procesamiento, utilización y comercialización*. Cali: CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical).
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). (2012). *Boletín Estadístico Agropecuario N° 22. Serie cronológica 2008-2011*. SEPSA (Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria. Obtenido de <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/a00305.pdf>
- Mejía de Tafur, M. S. (2002). Fisiología de la yuca (*Manihot esculenta*, Crantz). (34-45 pp). En Bernardo, O. P. y Hernán, C. (Comp.), *La Yuca en el Tercer Milenio: Sistemas modernos de producción, procesamiento, utilización y comercialización*. Cali: CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical).
- Molina, E. (2002). *Análisis de suelos y su interpretación*. San José: CIA-UCR. 8 p.
- Navarro, F. (1983). Guía técnica para el cultivo de la yuca (*Manihot esculenta*). Managua: Ministerio de Desarrollo Agropecuario y Reforma Agraria, IICA (Instituto Centroamericano de Cooperación para la Agricultura). (Serie IICA N°. 444). 30 p.
- Núñez, J. (2001). *Manejo y conservación de suelos*. 1 ed. San José: Editorial Universidad Estatal a Distancia. 288 p.
- Rodríguez, Z. F., Mármol, L. E., Martínez, J. & Montiel M. M. (2009). Acumulación total y por órganos de macronutrientes en plantas de yuca (*Manihot esculenta*, Crantz) cv. 'Tempranita' en la altiplanicie de Maracaibo. Facultad de Agronomía. Universidad del Zulia, Maracaibo. *Rev. Fac. Agron. (LUZ)*, 26, 470-489.
- Villalobos R. E. & Killorn, R. (2001). Nutrición mineral. (pp. 159-198). En: UCR (Ed.) *Fisiología de la producción de los cultivos tropicales. Fascículo 1. Capítulo V*. San José.

Estudio ecológico sobre insuficiencia renal crónica y arsénico en las aguas para consumo humano por distritos en Guanacaste

Ecological study on chronic kidney disease and arsenic in drinking water in districts of Guanacaste

Darner Mora-Alvarado¹, Azucena Urbina-Campos², Horacio Chamizo-García³

Fecha de recepción: 21 de octubre del 2014

Fecha de aprobación: 3 de febrero del 2015

Mora-Alvarado, D; Urbina-Campos, A; Chamizo-García, H. Estudio ecológico sobre insuficiencia renal crónica y arsénico en las aguas para consumo humano por distritos en Guanacaste. *Tecnología en Marcha*. Vol. 28, Nº 2, Abril-Junio. Pág 102-115.

1 Microbiólogo y Máster en Salud Pública. Director del Laboratorio Nacional de Aguas del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA). Costa Rica. Correo electrónico: dmora@aya.go.cr

2 Licenciada en Química. Funcionaria del Laboratorio Nacional de Aguas del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA). Costa Rica.

3 Máster en Salud Pública. Catedrático de la Universidad de Costa Rica. Costa Rica.

Palabras clave

Arsénico; agua; ecológico; insuficiencia renal; morbilidad.

Resumen

El objetivo del estudio fue analizar la asociación entre el consumo de agua contaminada con arsénico total (As-total) superior a 10 µg/L y los índices de morbilidad estandarizada (IME) de insuficiencia renal crónica (IRC) en los 59 distritos de los 11 cantones de la provincia de Guanacaste, Costa Rica.

Para ello se realizaron al menos 1600 muestreos y análisis de As-total en las aguas de 421 acueductos, a los cuales se les calculó el promedio ponderado según su población; luego se establecieron los IME utilizando los egresos hospitalarios de personas con esta patología. Con estas variables se diseñó un estudio ecológico-retrospectivo con características descriptivas y analíticas, aplicando la correlación lineal al 95% de confianza entre los promedios ponderados de As-total (µg/L) y los IME de cada cantón. Por otro lado, se realizó un análisis de tendencia, utilizando intervalos de exposición a As-total y los IME ubicados en cada zona. Además, se elaboró un análisis descriptivo entre los 17 distritos con IME con significancia estadística y los promedios ponderados de As-total.

Como resultados, los datos de As-total indican que de los 421 acueductos, solo 11 (2,6%) presentaron concentraciones superiores a 10 µg/L y pertenecen a los distritos de Cañas, Bebedero y Bagaces. Los resultados de IME de IRC indican que de los 59 distritos, 32 (54,2%) tenían un IME mayor a 1, es decir, el riesgo de enfermar por IRC era mayor al promedio nacional en el periodo 2003-2012. Los análisis estadísticos indican una correlación simple o r de 0,41, calificando la asociación entre ambas variables como Media, es decir, entre 0,33 y 0,66. El análisis de tendencias, según los intervalos o zonas de exposición a As-total, indican un comportamiento irregular en los intervalos 4 y 5, en donde la exposición "Medianamente Alta (11 a 20 µg/L de As-total) presenta un IME de IRC más alto que el intervalo Alta Exposición, o mayor a 20 µg/L de As-total. En el análisis descriptivo de los 17 distritos con IME con significancia estadística se observan varios distritos con promedios ponderados de As-total inferior a 3 µg/L pero con IME de IRC muy altos, como Nosara, Nacascolo, Diríá, Sámara, Palmira y Filadelfia.

Conclusiones: la comparación individual de los 17 distritos de los promedios ponderados de As-total y los IME de IRC demuestran que existen distritos que no estuvieron expuestos a As-total, pero que presentan altos IME de IRC, como Mansión, Sámara, Hojancha y Palmira. Además, se presenta la misma situación en los distritos con Muy Baja Exposición, como Liberia, Nicoya, Nacascolo, Nosara, San Antonio, Santa Cruz, Veintisiete de Abril y Diríá. Esto sugiere que el agua contaminada con As-total en los distritos de Guanacaste probablemente no es un factor de riesgo común en las zonas afectadas por la epidemia de IRC.

Recomendaciones: se debe continuar con otros estudios de tipo transversal o casos y controles, sin descartar ninguna hipótesis sobre factores de riesgo comunes en los distritos afectados con IRC, incluyendo la exposición a plaguicidas, altas temperaturas, metales pesados, incluido el As-total en aguas, y agroquímicos, entre otros.

Keywords

Arsenic; water; ecological; Chronic Kidney Disease; morbidity.

Abstract

To analyze the association between arsenic-contaminated drinking water intake (total-As) above 10 ug/L and the Standardized Morbidity Index (SMI) for Chronic Kidney Disease (CKD) in the 59 districts of the province of Guanacaste, Costa Rica.

1600 sampling and analyses for total-As were performed on water from 421 aqueducts and population weighted averages were calculated in each of the 59 districts. SMI were established using the CKD hospital discharge data for the year 2012. Using the above variables, and through a descriptive and retrospective-analytical methodology, an ecological study was designed, in which a linear correlation was tested, (95% confidence level), between the weighted averages (total-As, ug/L) and the SMI for the 59 districts. On the other hand a tendency analysis was performed with exposure intervals for each zone. In addition, a descriptive analysis was done for the 17 districts with a statistically significant SMI considering population weighed averages for As-total exposure.

Total-As data show that among the 421 studied aqueducts, only 17 (4,00%) display concentrations above 10 ug/L, which are located in the districts of Cañas, Bebedero, Bagaces, and La Cruz. Results for SMI for CKD indicate that among the 59 districts, 33 (55,9%) had a SMI above "1,0", in other words, the risk of disease por CKD was over the national average for the period of study. Statistical analyses indicate a simple correlation "r" of 0,41, which can be qualified as a medium-strength association between both variables, with a range of 0,33 and 0,66. Tendency analysis, according to the exposure intervals for As-total, show an irregular behavior within intervals 4 and 5, where the "medium-exposure" range, resulting from a weighted average between 11 and 20 ug/L, has a SMI for CKD higher than the "high-exposure" interval, which is higher than 20 ug/L total-As. In the descriptive analysis for the 17 districts with statistically significant SMI, some districts with a population-weighted average of total-As below 3 ug/L, but with a very high SMI for CKD, such as Nosara, Nacascolo, Diríá, Sámara, Palmira and Filadelfia.

Conclusions: even though the tendency analysis shows there is an increased risk of illness as exposure augments up to the exposure range, individual comparison of the population-weighted averages for total-As and the SMI for CKD of the 17 districts; it is evident that some districts that were not exposed to total -As have a high SMI for CKD, such as Mansión, Sámara, Hojancha and Palmira. The same situation is also seen for the very low exposure category, such as Liberia, Nicoya, Nacascolo, Nosara, San Antonio, Santa Crur, 27 de Abril and Diríá. This suggests that total-As contaminated water, in the districts of Guanacaste, probably is not a common risk factor in the zones affected by the CKD epidemic.

Recommendations: cross sectional and case/control studies should be done, without neglecting any hypothesis regarding the common risk factors in the CKD affected districts, including exposure to pesticides, high temperature, heavy metals (including total-As in drinking water) agrochemicals, agricultural occupation, among others.

Introducción

En el año 2002 la National Kidney Foundation de Estados Unidos definió la insuficiencia renal crónica (IRC) como la "presencia de daño renal con una duración igual o mayor a tres meses, caracterizada por anomalías estructurales o funcionales con o sin descenso de las tasas de filtración glomerular a menos de 60 mL/min/1,73 m²" (National Kidney Foundation, 2002). La IRC es un proceso fisiopatológico multifactorial de carácter progresivo e irreversible, que con frecuencia lleva a un estado terminal al paciente, que requiere de terapia de reemplazo, diálisis o trasplante de riñón.

La creciente incidencia y prevalencia de esta patología en países desarrollados oscila entre 13% y 16%, convirtiéndose en un verdadero problema de salud pública a nivel mundial; en los países en desarrollo varía de 0% a 16% (Soyibo y Roberts, 2011; Calvo et al., 2010; Flores, 2009). Las causas o etiologías, de acuerdo con su fisiopatología, se clasifican en vascular, glomerular, túbulo intersticial y obstructiva e involucran al menos 80 agentes causales, de los cuales existen algunos de iniciación, de susceptibilidad porque aumentan el daño renal, y otros de progresión causantes del deterioro de los riñones (Brooks, 2009). Los principales agentes etiológicos son diabetes, hipertensión arterial, glomerulonefritis, enfermedades poliquísticas y cálculos renales (Ministerio de Salud de Chile, 2010).

No obstante, en algunos países como Sri-Lanka, Egipto, India, México y en la costa pacífica de Centroamérica se ha observado, en las últimas dos décadas, un crecimiento de la prevalencia de IRC de etiología desconocida que no cumple con los factores de riesgo tradicionales (Wanigasuriya et al., 2014; Saraj, 2014; Xavier, 2012; López et al., 2014). Por ejemplo, en Nicaragua los estudios de prevalencia varían de 0% a 13%, con una media de 8,7%; la mortalidad en el periodo de 1992 a 2005 pasó de 4,5 a 10,9/100.000 habitantes y los departamentos más afectados han sido León y Chinandega, en la costa pacífica, que presentan actividades comerciales comunes como cultivo de caña, algodón y el uso de al menos 20 tipos de agroquímicos, algunos de los cuales son nefrotóxicos (Ramírez, 2011; Callejas et al., 2003). Lo mismo sucede en el Salvador, en donde otro factor de riesgo es la alta temperatura a que se exponen los trabajadores agrícolas (Henneva et al., 2014; Rodríguez, 2014; Almaguer et al., 2014).

Ante esto, en el año 2009 la Escuela de Salud Pública de Boston (EE. UU.) inició investigaciones para determinar las causas de la epidemia. Primero se realizaron 22 estudios, en los que se evaluaron exposiciones a situaciones como el trabajo agrícola (caña de azúcar, algodón, arroz, banano y café), metales pesados en aguas, suelos, plaguicidas, condiciones médicas incluyendo la deshidratación, infecciones del tracto urinario (chistate), diabetes, hipertensión, uso de antiinflamatorios, consumo de alcohol y lija (ron), tabaquismo e historial familiar de IRC. De estas posibles causas, en forma consistente se observaron asociaciones positivas para el trabajo agrícola en ingenios o cultivos de caña de azúcar, exposición a plaguicidas, deshidratación, hipertensión, consumo de lija e historial familiar con IRC (Cuadra et al., 2005).

En Costa Rica también se ha observado un incremento de los casos de IRC. En la provincia de Guanacaste, también ubicada en la costa pacífica, la incidencia ha sido de 112,9/100.000 habitantes, triplicando el promedio nacional (Blanco, 2013). Aunque las condiciones laborales y el clima son semejantes a los de las zonas de El Salvador, Nicaragua y otros países costeros de Mesoamérica, las fuerzas vivas y algunos políticos, en conjunto con varios medios de comunicación, han vinculado directamente la IRC con el consumo de agua contaminada con trazas de arsénico total (As-total) superiores a 10 µg/L, tipificado en el Reglamento para la Calidad del Agua Potable (Poder Ejecutivo de Costa Rica, 2005). Este vínculo ha sido generalizado para la totalidad de la provincia de Guanacaste, cuando en realidad los distritos expuestos a concentraciones superiores a 10 µg/L de As-total son Bagaces, Cañas y Bebedero (Mora, 2011; Mora, 2013; Mora, 2014) (Grupo de Trabajo AyA y Comisión Agua Segura MINSA, 2013). En razón de esta situación se realiza el presente estudio, con el objetivo de analizar la asociación entre el consumo de agua contaminada con As-total superior a 10 µg/L y los índices de morbilidad estandarizado (IME) de IRC en los 59 distritos de los 11 cantones de la provincia de Guanacaste.

Metodología

Para cumplir con el objetivo del estudio se definieron tres etapas. En la primera se efectuaron los muestreos y análisis de As-total de los 421 acueductos inventariados en los 59 distritos estudiados. Con los datos de As-total se calcularon los promedios ponderados, de acuerdo con la población de cada distrito. Los muestreos y los análisis de aguas se ejecutaron con procedimientos acreditados con la Norma INTE-ISO/IEC 17025: 2005, del Laboratorio Nacional de Aguas (LNA), en el periodo comprendido entre septiembre de 2009 y julio de 2014.

Los muestreos se realizaron en 43 acueductos operados por el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA), dos sistemas municipales y 376 acueductos comunales a cargo de Asociaciones Administradoras de Acueductos (Asadas) y/o Comités Administradores de Acueductos Rurales (CAARs).

Las técnicas utilizadas en la cuantificación de las concentraciones de As-total fueron:

- a) Absorción atómica con horno de grafito
- b) Espectrometría de masas con fuente de plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MASAS).

Ambas técnicas cumplen con las directrices del Standard Methods for Examination of Water and Waste Water Method, 53 B. 22 edition (APHS/AWWA/WEF, 2012).

Luego, para el cálculo de los promedios ponderados de As-total ($\mu\text{g/L}$) en los acueductos de cada distrito, se aplicó la siguiente fórmula:

$$\sum \frac{W_i}{W_t} (\bar{X})$$

W_i : Población que abastece cada acueducto

W_t : Población total por distrito con datos de exposición a As

\bar{X} : Promedio aritmético de la concentración de As en cada acueducto.

En la segunda etapa se calculó el IME de IRC para cada uno de los 459 distritos del país, y posteriormente en forma específica para los 59 distritos de la provincia de Guanacaste.

Los egresos hospitalarios se obtuvieron del área de estadística de la Caja Costarricense de Seguro Social (CCSS) y la población del Centro Centroamericano de Población (CCP) (CCP, 2012), para el periodo comprendido entre los años 2003 y 2012. Con estos datos de egresos hospitalarios por IRC se calculó la morbilidad bruta por 1000 personas, la cual corresponde al cociente del total de casos ocurridos entre el total de la población de cada distrito. Luego, se determinaron los IME de IRC como indicador de riesgo para grupos de edades quinquenales, lo cual refleja la probabilidad de enfermar contemplando el efecto de la edad. Para calcular los IME se empleó un método indirecto, que ha sido utilizado en investigaciones similares (Benach et al., 1998) así como por la disponibilidad y accesibilidad para descargar la información de las bases de datos disponibles en línea. Con los datos disponibles se realizó un análisis espacial de los últimos 10 años, mediante mapas de la división política administrativa de distritos del Atlas del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), tanto para el país como para la provincia de Guanacaste (Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2008).

Una vez realizados los cálculos de IME de IRC de los 59 distritos guanacastecos, se procedió a identificar los que obtuvieron valores superior a 1, y entre estos los que tenían significado estadístico. El valor de IME de 1 refleja el promedio nacional del riesgo de enfermar de IRC en cada distrito.

La tercera etapa se dividió en tres fases. En la primera se sometieron las variables de los promedios ponderados de As-total y los IME de IRC por distritos a un análisis de correlación lineal al 95% de confianza, en los 59 distritos. En la segunda se elaboró un análisis de exposición por intervalos de los promedios ponderados de As-total e IME de IRC correspondiente. Los cinco intervalos se definieron de la siguiente forma:

Intervalo 1 (No expuesto): el promedio ponderado de As-total en las aguas para consumo humano (ACH) por distritos que arrojaron resultados de ND (No Detectado), los cuales, para efectos prácticos, definimos con el valor de 1 y no de 0, debido a que en la cuantificación de análisis químicos no existe el cero.

Intervalo 2 (Muy baja exposición): el promedio ponderado de As-total en los distritos con valores entre $>1-3 \mu\text{g/L}$. Este intervalo se identificará como D (Detectable pero no cuantificable).

Intervalo 3 (Baja exposición): el promedio ponderado de As-total de los distritos con resultados entre $>3-10 \mu\text{g/L}$.

Intervalo 4 (Mediana exposición): el promedio ponderado de As-total de los distritos con resultados entre $>10-20 \mu\text{g/L}$.

Intervalo 5 (Alta exposición): el promedio ponderado de As-total de los distritos con resultados $>20 \mu\text{g/L}$.

En cada intervalo se ubican los IME de IRC de la zona correspondiente. Luego, los resultados se visualizan a través de un gráfico para analizar si existe alguna tendencia entre los intervalos de As-total y los IME de IRC.

Por último, en la tercera fase, y fundamentados en el principio epidemiológico “de que en zonas afectadas por una enfermedad de origen desconocido, se deben buscar factores de riesgo comunes para definir la causalidad de la misma”, se graficaron los datos promedio de As-total y el IME de IRC de cada distrito, en donde el IME tenía significancia estadística al 95% de confianza.

Resultados

Los resultados de esta investigación se presentan, en concordancia con La metodología, en tres etapas.

El total de los 421 acueductos de la provincia de Guanacaste, evaluados en el periodo de septiembre de 2009 al 15 de julio de 2014, se distribuyen en ND (No detectado), D (Detectado pero no cuantificable), de $>3-10 \mu\text{g/L}$, $>10-20 \mu\text{g/L}$ y $>20 \mu\text{g/L}$ de As-total.

El resumen, los análisis de As-total en las aguas para consumo se distribuyen de la siguiente manera: 1.042 (64,1%) ND, 33 (2,03%) D, 349 (21,5%) de $>3-10 \mu\text{g/L}$, 93 (5,72) $>10-20 \mu\text{g/L}$, y 109 (6,7%) $>20 \mu\text{g/L}$, para un total de 1626 análisis de As-total en los 59 distritos guanacastecos.

En el cuadro 1 se resumen los datos de los promedios ponderados de As-total en las aguas para consumo con IME de IRC en los 59 distritos de Guanacaste. Además, se presenta la morbilidad bruta de los límites inferiores y superiores de IRC. Por otro lado, mediante un asterisco, se identifican los distritos que presentan el IME de IRC con significancia estadística al 95% de confianza.

Cuadro 1. Guanacaste: promedios ponderados de As-total e Índice de Morbilidad Estandarizado por Edad por distritos en Guanacaste

Código y nombre de distritos de la provincia	Promedio ponderado de As-total μ/L	Índice de Morbilidad Estandarizado por Edad de Insuficiencia Renal	IC inferior	IC superior	Morbilidad bruta
50101: Liberia*	1,59	2,25	1,70	2,81	1,40
50102: Cañas Dulces	1,35	1,16	0,00	2,76	0,79
50103: Mayorga	1,32	1,19	0,00	3,51	0,75
50104: Nacascolo*	2,31	8,25	2,86	13,64	5,33
50105: Curubandé	1,63	2,92	0,06	5,77	1,85
50201: Nicoya*	2,69	3,63	2,67	4,59	2,66
50202: Mansión*	1,00	3,08	1,26	4,90	2,51
50203: San Antonio*	1,76	3,16	1,70	4,62	2,81
50204: Quebrada Honda	1,12	2,78	0,34	5,22	2,23
50205: Sámará*	1,00	6,88	3,14	10,61	4,53
50206: Nosara*	1,84	12,50	7,79	17,22	8,07
50207: Belén de Nosarita	2,28	0,64	0,00	1,89	0,48
50301: Santa Cruz*	1,22	3,76	2,71	4,80	2,75
50302: Bolsón	1,00	3,17	0,06	6,29	2,51
50303: Veintisiete de Abril*	1,03	3,45	1,57	5,32	2,60
50304: Tempate	1,23	3,01	0,92	5,09	2,15
50305: Cartagena	1,65	2,07	0,26	3,89	1,42
50306: Cuajiniquil	1,87	2,50	0,00	5,97	1,72
50307: Diríá*	1,10	6,14	3,22	9,05	5,21
50308: Cabo Velas	1,00	2,06	0,04	4,09	1,27
50309: Tamarindo	1,15	0,72	0,00	1,73	0,49
50401: Bagaces*	32,04	6,29	4,39	8,20	4,07
50402: Fortuna	1,21	0,00	0,00	0,00	0,00
50403: Mogote	1,11	0,00	0,00	0,00	0,00
50404: Río Naranjo	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50501: Filadelfia*	3,15	5,03	3,02	7,04	3,25
50502: Palmira*	2,99	5,19	2,47	7,90	3,31
50503: Sardinal	1,08	0,93	0,24	1,62	0,58
50504: Belén	1,00	1,41	0,28	2,55	0,97
50601: Cañas*	25,10	5,57	4,24	6,90	3,43
50602: Palmira	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Continúa

Continuación

Código y nombre de distritos de la provincia	Promedio ponderado de As-total μ /L	Índice de Morbilidad Estandarizado por Edad de Insuficiencia Renal	IC inferior	IC superior	Morbilidad bruta
50603: San Miguel	1,00	1,05	0,00	3,10	0,78
50604: Bebedero*	15,13	10,41	5,31	15,52	6,11
50605: Porozal	1,71	0,00	0,00	0,00	0,00
50701: Las Juntas	1,46	1,15	0,30	2,00	0,79
50702: Sierra	1,22	0,63	0,00	1,88	0,39
50703: San Juan	1,23	0,00	0,00	0,00	0,00
50704: Colorado	2,30	0,36	0,00	1,08	0,23
50801: Tilarán	1,00	0,55	0,00	1,18	0,40
50802: Queb Grande	1,41	2,35	0,05	4,64	1,53
50803: Tronadora	1,27	0,00	0,00	0,00	0,00
50804: Santa Rosa	1,87	0,00	0,00	0,00	0,00
50805: Líbano	1,06	1,56	0,00	4,61	1,34
50806: Tierras Morenas	1,06	0,00	0,00	0,00	0,00
50807: Arenal	1,61	0,00	0,00	0,00	0,00
50901: Carmona	1,00	0,65	0,00	1,93	0,49
50902: Santa Rita	1,00	0,94	0,00	2,79	0,67
50903: Zapotal	1,00	2,98	0,00	6,34	2,49
50904: San Pablo	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50905: Porvenir	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50906: Bejuco	1,00	0,57	0,00	1,69	0,40
51001: La Cruz*	3,62	2,61	1,19	4,02	1,60
51002: Santa Cecilia	1,00	1,58	0,20	2,96	0,88
51003: La Garita	1,73	0,00	0,00	0,00	0,00
51004: Santa Elena	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00
*51101: Hojancha	1,00	4,36	1,89	6,83	3,24
51102: Monte Romo	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
51103: Puerto Carrillo	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
51104: Huacas	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Fuente: Elaborado por los autores.

* Distritos con IME de IRC con significancia estadística al 95% de confianza.

En el mismo cuadro 1 se observan los 33 distritos (55,9%) con IME de IRC superior a 1 o al promedio nacional, lo cual significa mayor riesgo de enfermarse por dicha enfermedad.

En las figuras 1 y 2 se ubican, por intervalos, los IME de IRC en 459 distritos de Costa Rica y los 59 distritos de Guanacaste, respectivamente.

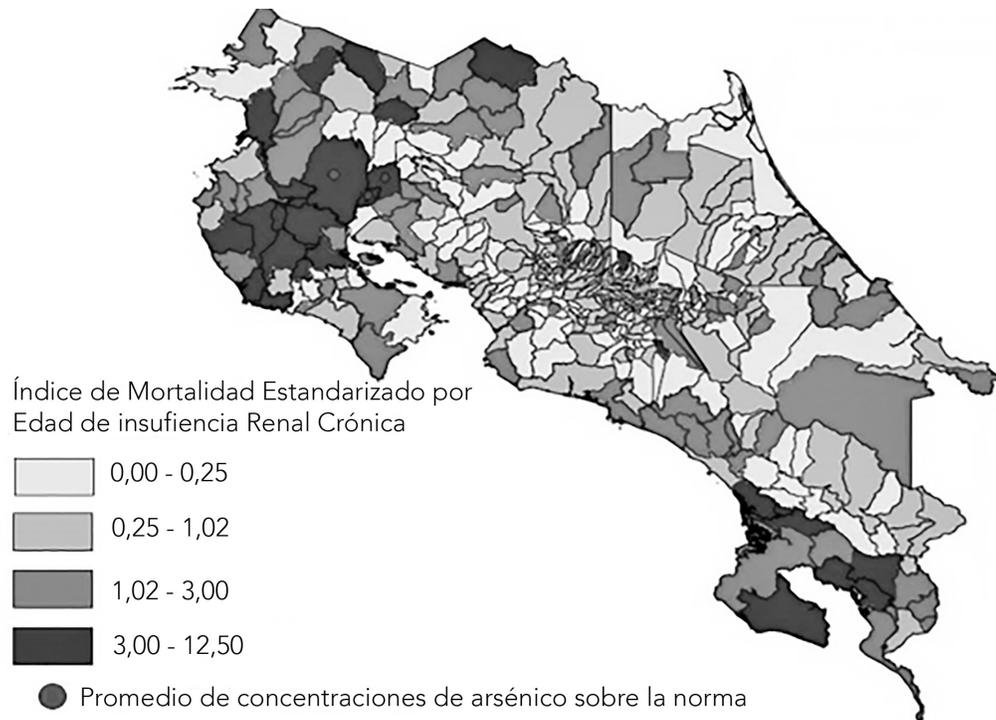


Figura 1. Índice de Morbilidad Estandarizado por Edad de Insuficiencia Renal Crónica de 2003 a 2012 en Costa Rica y promedios de concentraciones de As sobre la norma

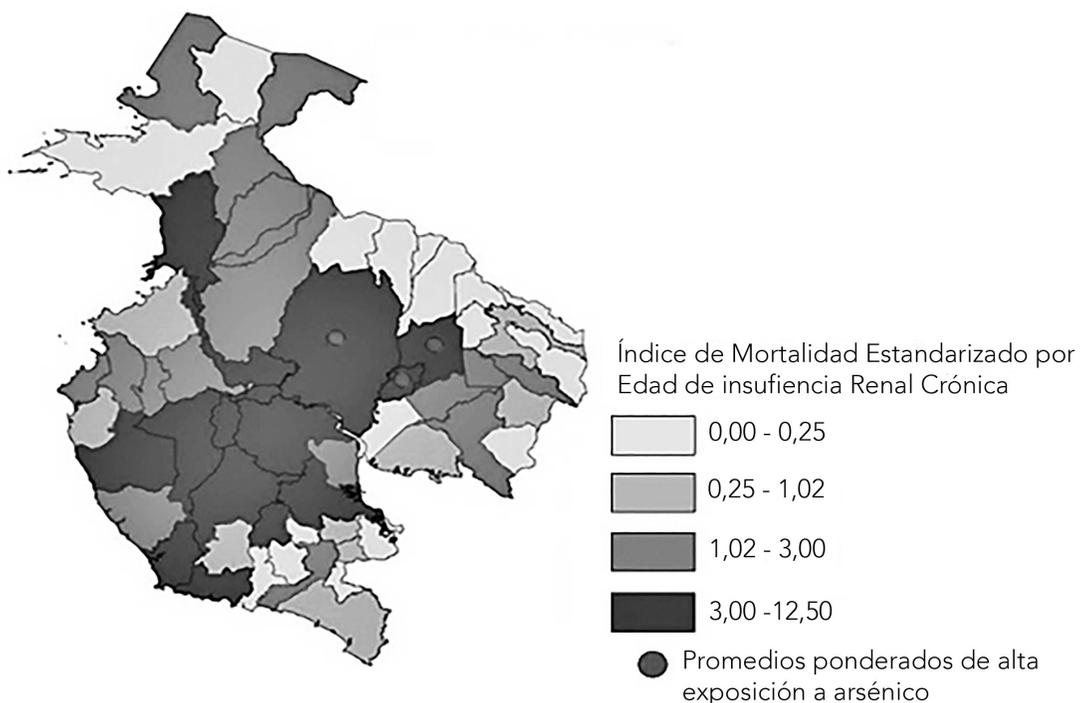


Figura 2. Índice de Morbilidad Estandarizado por Edad de Insuficiencia Renal Crónica de 2003 a 2012 en Guanacaste y promedios ponderados de alta exposición a As

El análisis de correlación lineal, al 95% de confianza, de los pares de promedios ponderados de As-total ($\mu\text{g/L}$) y los IME de IRC, indica un resultado de 0,41, lo cual refleja una asociación media (0,33 a 0,66) entre ambas variables.

Con respecto a las zonas de exposición a As, según promedios ponderados por población e insuficiencia renal crónica al año 2012 en Guanacaste, se utilizó el código de la décima Clasificación Internacional de Enfermedades CIE-10 N18.

Los resultados obtenidos con esta clasificación, según los promedios de As-total ponderados en cada población, son:

Intervalo 1 (No Expuesto): Mansión, Sámara, Bolsón, Cabo Velas, Río Naranjo, Belén, Palmira, San Miguel, Tilarán, Carmona, Santa Rita, Zapotal, San Pablo, Porvenir, Bejuco, Santa Cecilia, Hojancha, Monte Romo, Puerto Carrillo y Huacas.

Intervalo 2 (Muy baja exposición): Liberia, Cañas Dulces, Mayorga, Nacascolo, Curubandé, Nicoya, San Antonio, Quebrada Honda, Nosara, Belén de Nosarita, Santa Cruz, Veintisiete de Abril, Tempate, Cartagena, Cuajiniquil, Diriá, Tamarindo, Fortuna, Mogote, Palmira, Sardinal, Porosal, Juntas, Sierra, San Juan, Colorado, Quebrada Grande, Tronadora, Santa Rosa, Líbano, Tierras Morenas, Arenal, La Garita y Santa Elena.

Intervalo 3 (Baja exposición): Filadelfia y La Cruz.

Intervalo 4 (Mediana exposición): Bebedero.

Intervalo 5 (Alta exposición): Bagaces y Cañas.

En la figura 3 se observa el IME por edad de cada zona; el caso de mediana exposición es el distrito de Bebedero.

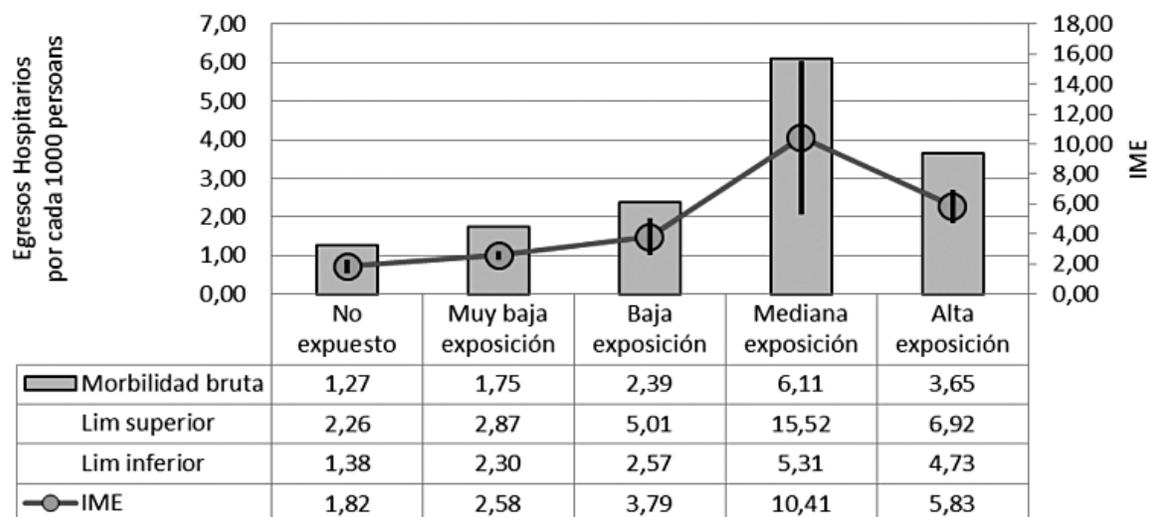
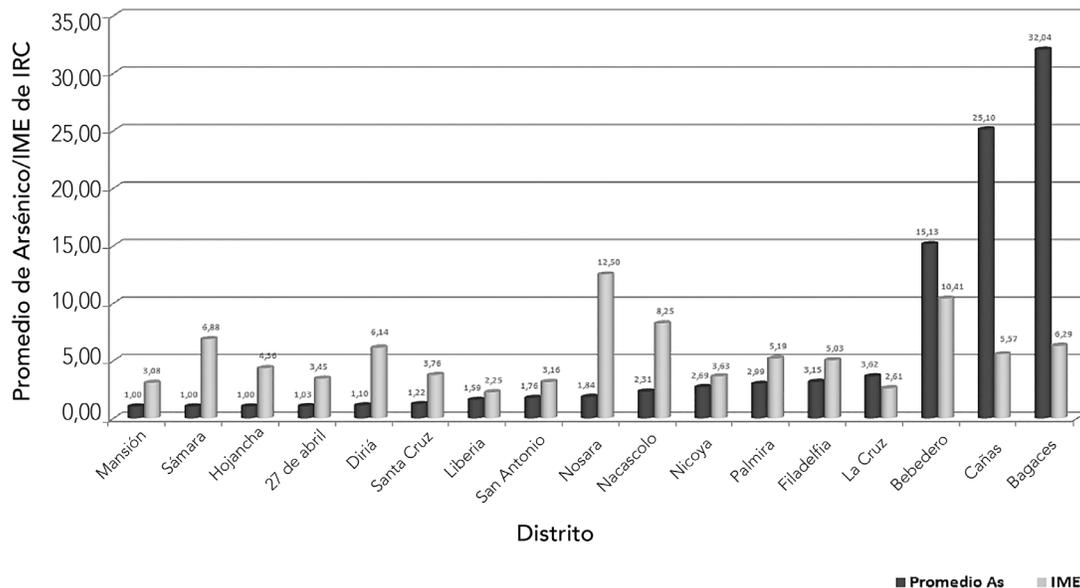


Figura 3. Morbilidad de insuficiencia renal crónica por zonas de exposición a arsénico en Guanacaste por distritos de 2003 a 2012.

De los 59 distritos de Guanacaste, se seleccionaron los 17 que tenían IME de IRC superior a 1 y con significancia estadística y se compararon con los promedios de As-total respectivos. Dichos resultados se observan en la figura 4.



Fuente Laboratorio Nacional de Aguas

Figura 4. Promedios Ponderados de As-total y IME de IRC con Significancia Estadística en 17 Distritos de Guanacaste.

Análisis de resultados

De conformidad con el orden establecido en la presentación de los resultados, a continuación se realiza el análisis de las mismas tres etapas:

Con respecto a la primera etapa, los exámenes de As-total en los 421 acueductos distribuidos en los 59 distritos, el 87,5% presentaron resultados inferiores a 10 µg/L; de ellos, el 73,2% mostró concentraciones ND, el 2,3% resultados D y el 24,5% valores en el intervalo de >3-10 µg/L.

El 12,5% de los resultados mayores a 10 µg/L se concentró en los distritos de Bagaces, Cañas y Bebedero de Cañas. En el caso de Cañas y Bagaces, los datos utilizados fueron los determinados antes de las soluciones aplicadas por el AyA en los respectivos acueductos.

Con el propósito de obtener datos de As-total lo más cercanos posible a la realidad de cada distrito, se aplicó el cálculo de los promedios ponderados por población, utilizando la fórmula mencionada en la metodología. Los resultados indican que:

- De los 59 distritos, 3 (5,1%) tenían resultados mayores a 10 µg/L de As-total; estos fueron Bagaces (32,04 µg/L), Cañas (25,10 µg/L) y Bebedero (15,13 µg/L).
- Dos distritos (3,4%) se ubicaron en el intervalo de >3-10 µg/L; estos fueron: Filadelfia (3,15 µg/L) y La Cruz (3,62 µg/L).
- Un total de 34 distritos (57,6%) se ubicaron en el intervalo >1-3 µg/L de As-total.
- 20 distritos presentaron un promedio ponderado de 1, para un 33,9%.

En la segunda etapa se determina que los IME de IRC por distritos, calculados a partir de los egresos hospitalarios observados entre los esperados, indican que:

- De los 59 distritos, 33 (55,9%) tenían resultados superiores a 1 o al promedio nacional; es decir, el riesgo de enfermar por IRC es mayor que en distritos con IME igual o menor que 1.
- De los 33 distritos con IME de IRC superior a 1, un total de 17 (51,5%) tenían IME con significancia estadística.

Por otro lado, la figura 1 permite observar conglomerados de IRC en la provincia de Guanacaste. En la figura 2 se aprecia que la epidemia de IRC, de origen desconocido, se concentra en 17 distritos (con significancia estadística) incluidos Mansión, Sámara, Hojancha, Veintisiete de Abril, Diríá, Santa Cruz, Liberia, San Antonio, Nosara, Nacascolo, Nicoya, Palmira, Filadelfia, La Cruz, Bebedero, Cañas y Bagaces.

En la primera fase de la tercera etapa, el análisis de correlación lineal al 95% de confianza, entre los datos de As-total y los IME de IRC en los 59 distritos de Guanacaste, indican un valor "r" de 0,41, el cual demuestra una asociación media entre un valor de ("r" 0,33 a 0,66) entre ambas variables.

Con respecto a la segunda fase de la clasificación por zonas de exposición a As-total, en la figura 3 no se observa una tendencia concordante, que indique que a mayor promedio de As-total mayor es el incremento de IME de IRC entre los cinco intervalos, sobre todo entre los de baja, mediana y alta exposición.

En la tercera fase, sobre las concentraciones promedio de As-total y los IME de IRC para cada uno de los 17 distritos con significancia estadística, en la figura 4 se observa que:

Bagaces, Cañas y Bebedero tienen IME de IRC de 6,29, 5,57, y 10,41 con As-total promedio de 32,04 µg/L, 25,10 µg/L y 15,13 µg/L, respectivamente.

La comparación individual de los promedios ponderados de As-total y los IME de IRC de los 17 distritos demuestra que existen algunos que no estuvieron expuestos a As-total pero que presentan altos IME de IRC, como Mansión, Sámara, Hojancha y Palmira. Además, se presenta la misma situación en los distritos con muy baja exposición, como Liberia, Nicoya, Nacascolo, Nosara, San Antonio, Santa Cruz, Veintisiete de Abril y Diríá. Esto sugiere que el agua contaminada con As-total en los distritos de Guanacaste no es el factor de riesgo inicial de la epidemia de IRC.

Conclusiones y recomendaciones

El análisis de los resultados permite presentar las siguientes conclusiones y recomendaciones.

Conclusiones

La distribución de los exámenes de As-total en las ACH suplidas por acueductos demuestran que solo tres distritos guanacastecos están expuestos a As-total mayor a 10 µg/L (5,1%); es decir, los 56 distritos restantes (94,9%) tienen valores inferiores a 10 µg/L, que es el valor permitido por el Reglamento para la Calidad del Agua Potable.

Los resultados de las tres fases -las estadísticas de análisis de correlación lineal al 95% de confianza de un r de 0,41, el análisis de tendencias de exposición a As-total e IME de IRC respectivo y el estudio descriptivo de los promedios ponderados de As-total y los IME de IRC en los 17 distritos con significancia estadística permiten concluir que:

- No se observa una correlación lineal fuerte entre ambas variables de As-total e IME de IRC en los 59 distritos de Guanacaste.

- No se observa concordancia entre la exposición a As-total, en los intervalos de Mediana exposición y Alta exposición, y los IME de IRC en las respectivas zonas, es decir, es mayor el IME de IRC entre 11-20 µg/L que en >20 µg/L.
- La comparación individual de los 17 distritos, de los promedios ponderados de As-total y los IME de IRC demuestra que existen distritos que no estuvieron expuestos a As-total pero presentan IME de IRC altos, como Mansión, Sámara, Hojancha y Palmira. Además, se presenta la misma situación en los distritos con muy baja exposición, como Liberia, Nicoya, Nacascolo, Nosara, San Antonio, Santa Cruz, Veintisiete de Abril y Diriá. Esto sugiere que el agua contaminada con As-total en los distritos de Guanacaste probablemente no es un factor de riesgo común en las zonas afectadas por la epidemia de IRC.

Recomendaciones

Con el propósito de detectar las verdaderas causas de la IRC en Guanacaste y otras comunidades de la costa pacífica de Mesoamérica, es fundamental aplicar el principio de buscar factores de riesgo comunes en las diferentes zonas afectadas, como el tipo de trabajo, la exposición a plaguicidas y las altas temperaturas durante la jornada laboral, litiasis renal y uso de antiinflamatorios, entre otros.

Por último, es necesario tomar medidas urgentes para atender esta epidemia de IRC de origen desconocido, en el marco de la “Declaración de San Salvador” de la Comisión de Ministerios de Salud de Centroamérica y República Dominicana (COMISCA) y el 52º Consejo Directivo 65ª Sesión del Comité Regional (OMS/OPS), del 4 de septiembre de 2013. (OMS/OPS, 2013).

Bibliografía

- Almaguer, M., Herrera, R. & Orontes, C. (abril, 2014). *Chronic Kidney Disease of Unknown Etiology in Agricultural Communities*. *Medic Review* 16(2).
- APHS/AWWA/WEF. (2012). *Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water*. 22 ed. Washington D.C.
- Ariana Ramírez Rubio, Madeleine Kangsen Scammell. *Enfermedad Renal Crónica en Nicaragua*. Análisis Cualitativo de Entrevistas Semiestructurales con Médicos y Farmacéuticos. Universidad de Boston; 2011.
- Benach, J., Borrell, C., García, M. D. & Chamizo, H. (1998). *Desigualdades sociales en mortalidad en áreas pequeñas de España SESPAS*. Informe 1998. Granada: Sociedad Española de Salud Pública y Administración Sanitaria.
- Blanco, C. (19 agosto, 2013). *Químicos causan insuficiencia renal crónica y muerte en Guanacaste*. *La Prensa Libre*, sección Enfoque.=
- Brooks, D. (2009). *Informe Final de Estudio de Alcance: Epidemiología de Enfermedad Renal en Nicaragua*. Informe Independiente Preparado por la Escuela de Salud Pública de la Universidad de Boston.
- Callejas Callejas, Li Medrano Alonso, C. D; Mendoza. (2003). *Insuficiencia Renal Crónica (IRC) en trabajadores de caña de azúcar. El Viejo, Chinandega*. Managua: Centro para el Control y Prevenciones de Enfermedad (CDC) de Estados Unidos,
- Ministerio de Salud de Nicaragua. Calvo, M. et al. (2010). *Evaluación de la comparación corporal en pacientes con Insuficiencia Renal Crónica*. *Nutr. blosp.*, 25(4), 682-687.
- Centro Centroamericano de Población (CCP) (2014). Datos en línea e UCR. *Información demográfica*. San José: Universidad de Costa Rica. Obtenido de www.ccc.ac.cr.
- Cuadra S. N., Jakobsson, K. & Wessling, C. (2006). *Chronic renal disease in Central America. An assessment of available information*. SALTRA report 2005/6.
- Flores, J. (2010). *Enfermedad Renal Crónica: Epidemiología y Factores de Riesgo*. *Rev. Med. Clin. Condes*, 2(4), 502-507.

- Grupo de trabajo sobre Arsénico y Comisión Agua Segura. (noviembre, 2013). *Informe a la Sala Constitucional: Avance respecto a la Atención de Sistemas de Acueducto referido a la presencia de Arsénico sobre la Norma Nacional*. San José: Ministerio de Salud e Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados.
- Herrera, R. et al. (abril, 2014). *Clinical Characteristics of Chronic Kidney Disease of Nontraditional Causes in Salvadoran Farming Communities*. *Medicc Review*, 16(2).
- Instituto Tecnológico de Costa Rica. (2008). *Atlas Digital Costa Rica 2008*. Cartago: ITCR.
- Jayasinglee, S. (abril, 2014). *Chronic Kidney Disease of Unknown Etiology Should Be Renamed Chronic Agrochemical Nephropathy*. *Medicc Review*, 16(2).
- López, L. MD MS y colaboradores. (abril, 2014). *Histopathology of Chronic Kidney Disease of Unknown Etiology in Salvadoran Agricultural Commuties*. *Medicc Review*, 16(2).
- Ministerio de Salud de Chile. (2010). *Guía Clínica. Prevención de Enfermedad Renal Crónica*. Santiago: MINSAL.
- Mora, D. (2011). *Informe sobre el estado de la Problemática de Arsénico en Costa Rica*. Laboratorio Nacional de Aguas.
- Mora, D. (2013). (octubre-diciembre, 2013). *Agua para Consumo: Comparación de la Contaminación con Arsénico en Argentina, Chile y Centroamérica 2013*. *Revista del Colegio de Microbiólogos y Químicos Clínicos de Costa Rica* ISSN: 2215-3713.
- Mora, D. (2014). *La problemática del arsénico. Costa Rica en el Contexto Latinoamericano*. Laboratorio Nacional de Aguas; 2014.
- National Kidney Foundation. (2009). *Clinical Practice Guidelines for chronic kidney disease: evaluation, classification and stratification*. *Am. J. Kidney Dis.* 39 (suppl 1), S 1-5266.
- OMS/OPS. (septiembre-octubre, 2013). 52ª Consejo Directivo 65°. *Sesión del Comité Regional sobre La enfermedad Renal Crónica en Comunidades Agrícolas de Centroamérica*. Washington, D.C.
- Poder Ejecutivo de Costa Rica. (3 mayo, 2005). *Reglamento para la Calidad del Agua Potable*. Decreto Ejecutivo 32327, La Gaceta 84.
- Ramírez Rubio, A. & Kangsen Scammell, M. (2011). *Enfermedad Renal Crónica en Nicaragua. Análisis Cualitativo de Entrevistas Semiestructurales con Médicos y Farmacéuticos*. Universidad de Boston.
- Rodríguez, M. (abril, 2014). *Chronic Kidney Disease in Our Farming Communities Implications of on Epidemic*. *Medicc Review*, 16(2).
- Soyibo, A. & Roberts, L. (2011). *La enfermedad renal crónica en el Caribe*. *West Indian Med J.*, 60(4), 464.
- Wanigasuriya, K. (abril, 2014). *Update on Uncertain Etiology of Chronic Kidney Disease in Sri-Lanka North-Central Dry Zone*. *Medicc Review*, 16(2).
- Xavier F. et al. (abril, 2014). *Chronic Kidney Disease and Associated Risk Factors in two Salvadoran Farming Communities, 2012*. *Medicc Review*, 16(2).

Aislamiento de una bacteria endófitas de vainilla (*Vanilla planifolia*) con actividad biocontroladora in vitro contra *Fusarium oxysporum* f. sp. *Vanillae*

Isolation of vanilla-endophytic bacteria (*Vanilla planifolia*) with in vitro biocontrol activity against *Fusarium oxysporum* f. sp. *Vanillae*

Karol Jiménez-Quesada¹, Alexander Schmidt-Durán², Kevin Quesada-Montero³, Ileana Moreira-González⁴

Fecha de recepción: 23 de octubre del 2014
Fecha de aprobación: 21 de enero del 2015

Jiménez-Quesada, K; Schmidt-Durán, A; Quesada-Montero, K, Moreira-González, I. Aislamiento de una bacteria endófitas de vainilla (*Vanilla planifolia*) con actividad biocontroladora in vitro contra *Fusarium oxysporum* f. sp. *Vanillae*. *Tecnología en Marcha*. Vol. 28, N° 2, Abril-Junio. Pág 116-125.

1 Centro de investigación en Biotecnología (CIB), Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: kjimenez@itcr.ac.cr

2 Centro de investigación en Biotecnología (CIB), Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: aschmidt@itcr.ac.cr

3 Carrera de Ingeniería en Biotecnología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: kevin707qm@hotmail.com

4 Centro de investigación en Biotecnología (CIB), Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: imoreira@itcr.ac.cr

Palabras clave

Antagonismo; cultivo orgánico; fermentación; inductor biótico; sistema agroforestal.

Resumen

El género *Vanilla* pertenece a la familia Orchidaceae. Algunas de sus especies con interés comercial son *V. planifolia*, *V. pompona* y *V. tahitensis*. La clasificación de la calidad de la vainilla se efectúa según el largo de la cápsula y el contenido de vainillina, la cual se utiliza para elaborar alimentos y bebidas, como materia prima en la industria farmacéutica y en la producción de cosméticos y perfumes, entre otros usos. Se considera que el mayor problema que enfrenta la producción de vainilla es la pudrición de la raíz ocasionada por el hongo *Fusarium oxysporum* f. sp. *Vanillae*, que provoca entre 30-52% de la muerte de las plantas al atacar las raíces adventicias, impidiéndoles absorber agua y nutrientes. El hongo no puede erradicarse por la acción de agroquímicos ya que dañan la viabilidad de las plantas; además, el cultivo de vainilla sin la aplicación de agroquímicos de manera orgánica en sistemas agroforestales es una actividad que está cobrando gran interés entre los pequeños productores del país. Es por tal razón que en esta investigación se evaluó la capacidad de control de bacterias endófitas aisladas de muestras de vainilla procedentes de Corcovado, Puriscal, Dota y Guápiles, mediante pruebas de antagonismo in vitro entre la bacterias aisladas y el hongo *F. oxysporum*. El resultado es que la cepa bacteriana B1M11 es una candidata promisoría para responder al ataque del patógeno, lo que se corroboró con la aparición de un halo de inhibición del crecimiento del hongo en placa.

Keywords

Agroforestry system; antagonism; biotic inductor; fermentation; organic culture system.

Abstract

Vanilla sp. genus belongs to Orchidaceae family, and *V. planifolia*, *V. pompona* and *V. tahitensis* are species of commercial interest. The quality classification of vanilla is made according to the length of the capsule and vanillin content, which is used to make food and beverage, as raw material in the pharmaceutical industry and for the production of cosmetics and perfumes, among others. Currently, root rot caused by the fungus *Fusarium oxysporum* f. sp. *Vanillae* is considered to be the biggest problem facing vanilla production, causing 30 to 52% of plant death, attacking adventitious roots and preventing this plant is able to absorb water and nutrients. The fungus cannot be eradicated by the action of chemicals that damage the viability of the plants, and because the cultivation of vanilla in agroforestry systems without the application of agrochemicals is an activity that is gaining interest among small producers country. It is for this reason why was studied the ability of control of vanilla endophytic bacteria isolated from samples from Corcovado, Puriscal, Dota and Guápiles, by testing *in vitro* antagonism between asylee bacteria and fungus *F. oxysporum*, giving results about promising candidate B1M11 to respond to pathogen attack, which was corroborated by the appearance of a halo of inhibition of fungal growth on plate.

Introducción

El género *Vanilla* pertenece a la familia Orchidaceae, siendo *V. planifolia*, *V. pompona* y *V. thaitensis* las únicas especies de orquídeas que producen frutos comestibles (Paniagua, 2013).

La sustancia responsable de la fragancia peculiar y el sabor de la vainilla es la vainillina ($C_8H_8O_3$) que se encuentra en una concentración de 0,75 a 3,7% en la vaina y se relaciona directamente con la calidad del fruto (González et al., 2009). En Costa Rica, se tienen registros del cultivo de vainilla en Pérez Zeledón, Bocana de Puriscal, San Isidro de Dota, Quepos, La Cruz, Guápiles, Cutris, Florencia y Upala, que se realiza a partir de semilla proveniente del cultivo de tejidos y por esqueje o bejuco de al menos ocho nudos para asegurar un buen enraizamiento (Varela, 2011).

Se estima que el mayor problema que enfrenta la producción de vainilla es la pudrición de la raíz ocasionada por el hongo *F. oxysporum* f. sp. *Vanillae*, que causa entre 30-52% de la muerte de las plantas, atacando las raíces adventicias e impidiendo así que la planta sea capaz de absorber agua y nutrientes. La aparición de *F. oxysporum* es favorecida por el exceso de sombra y las altas precipitaciones, así como los suelos degradados y la escasez de materia orgánica (Olivares, 2010).

Fusarium sp. es un hongo patógeno que se caracteriza por crecer formando colonias de diversos colores -blanco, rosado pálido, rojo, anaranjado, púrpura, celeste, verde aceituna- de manera moderada a rápida. El micelio de este hongo puede ser ralo o denso, algodonoso con funículos o limoso. Además, los pigmentos que difunden en el agar suelen variar de color o tono con el pH (Carrillo, 2003).

La relación de este hongo con la afectación en los cultivos de vainilla está dada por el efecto de la cepa *Fusarium oxysporum* f. sp. *vanillae*. La sintomatología se inicia con la aparición de lesiones de color café oscuro en los tallos de vainilla, junto con zonas cloróticas en los entrenudos, hasta que se produce la necrosis, reducción y muerte del tejido, que se traslada progresivamente del tallo al nudo (He, 2007). Por su parte, cuando el ataque del hongo se inicia en la raíz, el daño desciende a partir de las raíces adventicias. En condiciones de alta humedad, la pudrición es suave; la proliferación de micelio y conidios se presenta sobre el tejido dañado, agudizando el inóculo en la plantación (Bhai y Dhanesh, 2008).

La problemática principal alrededor del combate de *F. oxysporum* es que los fungicidas para el control de este hongo perturban el ciclo de interacción entre los hongos micorrizógenos nativos que integran la rizosfera de la vainilla, provocando una ocasional o casi nula reproducción por semilla en la naturaleza, y probablemente una disminución en la capacidad de absorción de nutrientes por las raíces adventicias (Gätjens y Montero, 2012).

Debido a esto, los vainilleros de Costa Rica han optado por el cultivo de vainilla orgánica en sistemas agroforestales, para garantizar un producto libre de agroquímicos que no perturben la calidad ni dañen la fisiología de las plantas. No obstante, esta decisión está vinculada directamente con el aumento de las precauciones para evitar la aparición del hongo (Kistler, 1997; Villalba, Moreira y Díaz, 2012).

El cultivo de vainilla sin aplicación de agroquímicos es quizás una de las actividades más importantes entre los agricultores directamente involucrados en su producción en Costa Rica. Esto hace que sea necesario dotarlos de herramientas tecnológicas que les permitan seguir manejando sus sistemas de producción según un modelo orgánico (Villalba et al., 2012).

El control biológico en cultivos perennes como las orquídeas enfrenta grandes retos, principalmente por la ausencia de rotación de cultivos para reducir los niveles de inóculo de un determinado patógeno. Lo anterior incrementa el riesgo de plagas en una plantación. Una alternativa es evaluar bacterias endófitas de vainilla que demuestren en pruebas in vitro que poseen un potencial biocontrolador para hongos del suelo, con el propósito de conocer su impacto en el desarrollo y establecimiento del cultivo y la posible aparición de enfermedades

del suelo como posibles inductores de resistencia en las plantas inoculadas en los sistemas de producción orgánica (Paniagua, Villalba y Montero, 2011).

Los microorganismos endófitos son aquellos que habitan en los tejidos internos de una planta sin resultar patógenos para ella. En general, la investigación ha demostrado que los endófitos bacterianos pueden ser un factor clave en la reducción de la herbivoría, la promoción del crecimiento de la planta, el aumento de la absorción de minerales, la fijación de nitrógeno, la supresión de enfermedades y la inducción de cascadas de defensa (Melnick, Bailey y Backman, 2012).

El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto biocontrolador *in vitro* de las bacteria endófitas aisladas en el cultivo de la vainilla (*Vainilla* sp.), para el combate biológico de la marchitez causada por el hongo *F. oxysporum*.

Materiales y métodos

La presente investigación se llevó a cabo en los laboratorios de Biocontroladores y Biología Molecular del Centro de Investigación en Biotecnología (CIB) del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), sede Cartago.

Recolección del material vegetal

El material de vainilla necesario para el aislamiento de bacterias endófitas de interés se recolectó en diferentes regiones del país: Bocana de Puriscal y San Isidro de Dota (San José), Barra de Parismina y La Colonia de Guápiles (Limón), Upala (Alajuela) y en la Península de Osa (Puntarenas); también se obtuvo material de invernadero procedente de la aclimatación de plantas *in vitro* del Instituto de Investigación y Servicios Forestales (INISEFOR-UNA). El protocolo de recolección consistió en el corte de esquejes de 30-40 cm de plantas de vainilla adultas, que contuvieran aproximadamente 2 ó 3 nudos, utilizando una cuchilla y sellando los cortes con cloro comercial (3,5% i.a.). Se procedió con el corte de los esquejes, seleccionando aquellos que fisiológicamente se observaran sanos y afectados por el hongo *F. oxysporium*.

Aislamiento de bacterias endófitas

Se desinfectó el tejido superficial de los tallos. Para esto se utilizaron fragmentos de aproximadamente 10 cm, que se trasladaron a la cámara de flujo laminar y se colocaron en una solución de hipoclorito de sodio al 0,5% (3,5% i.a.) durante 10 minutos; transcurrido ese tiempo, se lavaron los explantes con agua destilada estéril, luego con alcohol al 70% durante 30 segundos y posteriormente con agua destilada una vez más. Concluida la desinfección, cada muestra se trasladó a un mortero para macerarla manualmente utilizando 10 ml de PBS 1%; a partir de cada macerado se prepararon dos diluciones (10^{-1} y 10^{-2}) y de cada una de ellas se tomó 1 ml para inocular en medio Agar Papa Dextrosa (PDA) y Agar Nutritivo (AN), dando como resultado un total de cuatro placas inoculadas por muestra, mantenidas a 30 ± 1 °C por un período de tres días para AN y de una semana a temperatura ambiente para PDA, antes de su evaluación.

Purificación de los aislamientos

Transcurrido el período de incubación de los macerados, se evaluaron las placas, separando las colonias que presentaban diferente morfología y/o coloración y obteniendo cultivos puros de las mismas.

Pruebas de antagonismo *in vitro*

Las pruebas de antagonismo realizadas consistieron en inocular en placas con medio de cultivo AN un segmento de 5 mm² del hongo *F. oxysporum* colocado en el centro de la placa y cuatro bacterias endófitas obtenidas de los aislamientos, equidistantemente inoculadas por traspaso con asa bacteriológica. La cepa del hongo fue facilitada por la empresa Plantech S. A. En total se realizaron ocho ensayos por duplicado, para un total de 30 bacterias morfológicamente diferentes analizadas. El periodo de incubación del ensayo fue de dos semanas a 30 ± 1 °C.

Selección de la cepa bacteriana con potencial biocontrolador

Una vez ejecutadas las pruebas de antagonismo en placa entre la diferentes bacterias aisladas ante el hongo *F. oxysporum*, los criterios de selección de la cepa de interés se determinaron según presencia/ausencia de un halo de inhibición definido, observable a simple vista.

Resultados y discusión

Recolección del material vegetal

El material de *Vanilla* sp. recolectado para ser procesado y hacer la bioprospección de las bacterias endófitas provenía de diversos lugares del país, como se observa en el cuadro 1.

Cuadro 1. Descripción de muestras de *Vainilla* sp. recolectadas en diversas regiones de Costa Rica para utilizarlas en el aislamiento de bacterias endófitas

Nº muestra	Especie	Región de procedencia	Otros datos	Estado fisiológico del material
1	V. planifolia	Material in vitro INISEFOR	Ensayo de aclimatación	Sano
2	No especificada	Barra de Parismina	Orilla de la playa	Sano
3	No especificada	Península de Osa	Playa Blanca, Puerto Escondido	Sano
4	Híbrido, cruce entre V. planifolia y V. pompona	Península de Osa	Corcovado Finca Gallardo, Alfredo Mesén, planta madre,	Sano
5	No especificada	Península de Osa	Corcovado Finca Andrés Plani	Sano
6	V. pompona	Upala	Bosque	Sano
7	No especificada	Península de Osa	Finca Gilbar	Sano
8	V. planifolia	San Isidro de Dota	Finca Onde Chinchilla	Enfermo
9	V. planifolia	Bocana, Puriscal	Finca Eugenia Garro	Sano
10	V. pompona	La Colonia de Guápiles	Finca Juan Carvajal	Sano
11	V. pompona	La Colonia de Guápiles	Finca Juan Carvajal	Enfermo

La muestra 1 fue la única que se obtuvo a partir de una planta joven proveniente del cultivo *in vitro* de *V. planifolia*. Por otra parte, las muestras 2, 3 y 6 provenían de plantas adultas que crecieron naturalmente en un hábitat como bosque y playa. Finalmente, las muestras 4, 5, 7, 8, 9, 10 y 11 se recolectaron a partir de plantas adultas cuyo crecimiento se ha adecuado dentro de un sistema agroforestal. Los sistemas agroforestales son una forma de uso de la tierra en el que plantas leñosas perennes (árboles) interactúan biológicamente en un área con cultivos y/o animales, con el propósito fundamental de diversificar y optimizar la producción respetando el principio de la sostenibilidad. Generalmente, es el árbol el que contribuye con productos adicionales, mejora el suelo, el microclima o sirve de tutor (Varela, 2011).

Se determinó que las muestras 8 y 11 se encontraban evidentemente afectadas por el hongo *F. oxysporum*, puesto que mostraban la sintomatología característica del ataque del patógeno, como las lesiones café oscuro en los tallos y necrosis y reducción de los tejidos en algunas zonas, aunado a la pudrición de la raíz (Bhai y Dhanesh, 2008). La aparición del hongo en una plantación o en un sistema agroforestal puede deberse a que el terreno retiene altos porcentajes de humedad y tiene grandes extensiones de sombra, siendo el exceso de estos dos factores una causa común de la aparición del patógeno (Olivares, 2010).

En cuanto a las muestras sanas, se observaron en buen estado fisiológico, con un color verde intenso y raíces arraigadas al soporte natural sobre el que han crecido. Algunas de las muestras sanas recolectadas se encontraron asociadas a tutores de *Erythrina berteroana* (poró) y *Acnistus arborescens* (güitite), como se observa en la figura 1, y dentro de un sistema agroforestal con árboles de cítricos y *Gliricidia sepium* (madero negro), principalmente, creando con esto los tres niveles de altura recomendados.



Figura 1. Plantación de *Vainilla planifolia* en sistema agroforestal, Bocana de Puriscal: A) planta de vainilla en sistema de barbaoca natural, B) planta de vainilla en un tutor de poró.

Sin embargo, aunque la muestra 10 estaba inmersa en un sistema agroforestal en asociación con especies como poró, *Vochisya guatemalensis* (chancho), y *Terminalia amazonia*, entre muchas otras, esta finca no hacía monitoreo de las condiciones de humedad ni de estancamientos de agua. La formación de encharcamientos dentro de la plantación contribuye a la aparición de plagas y enfermedades como *F. oxysporum* (Chaverri, 2013). Esto es de gran interés, dado que, como se muestra en la figura 2, esta plantación de Guápiles resguardaba material de vainilla (*V. planifolia* y *V. pompona*) tanto sano como enfermo (muestra 11).



Figura 2. Plantación de vainilla en sistema agroforestal, La Colonia de Guápiles: A) planta de *Vainilla planifolia* fisiológicamente estable, B) planta de *Vainilla pompona* enferma con *Fusarium oxysporum*.

Aislamiento y purificación de bacterias endófitas

Una vez recolectado el material de vainilla, se procedió a ejecutar el protocolo de desinfección y aislamiento de bacterias endófitas. Debido a que los endófitos viven dentro de los espacios intercelulares de las plantas, la clasificación de una bacteria o un hongo como organismo endófito se basa en su recuperación a partir de material vegetal y semillas adecuadamente esterilizadas en su superficie. Por lo tanto, la detección con éxito de bacterias endófitas en las plantas depende de un procedimiento adecuado de esterilización de la superficie; además, la planta debe volver a infectarse con la cepa endofítica, así como otras cepas de la especie, ya que estas comparaciones permitirán establecer la unicidad de una cepa como un endófito o la singularidad de endofitismo dentro de la especie (Bacon y Hinton, 2007).

A partir de las 11 muestras analizadas, se evaluó el número de bacterias morfológicamente diferentes según color, tamaño y forma de las colonias y se aislaron en cultivos puros. La dilución de los macerados ayudó a bajar la concentración de microorganismos presentes, para obtener distintas colonias dentro de la misma placa Petri pero distantes entre ellas (Madigan, Martinko, Dunlap y Clark, 2009), a fin de utilizarlas en las pruebas de antagonismo, como se presenta en el cuadro 2.

En el cuadro anterior, el crecimiento en Agar Papa Dextrosa y Agar Nutritivo se evaluó tanto para las diluciones 10^{-1} como 10^{-2} .

La mayoría de las especies de endófitos pertenecen a las familias *Acetobacteraceae*, *Enterobacteriaceae*, *Spirillaceae* y *Bacillaceae*. Por lo tanto, las especies de los géneros *Acetobacter*, *Achromobacter*, *Burkholderia*, *Campylobacter*, *Corynebacterium*, *Cytophaga*, *Bacillus*, *Brevibacterium*, *Flavobacterium*, *Leuconostoc*, *Klebsiella*, *Micrococcus*, *Enterobacter*, *Azospirillum* y *Erwinia* se han asociado con óvulos, semillas, vainas, raíces, hojas y tallos de varias plantas de importancia económica, y estas bacterias han demostrado desempeñar un rol positivo o no tener efecto aparente sobre la supervivencia de varias especies de plantas (Ferrando y Fernández-Scavino, 2013).

Pruebas de antagonismo in vitro

El nicho endofítico ofrece una oportunidad única para el control de patógenos. El endófito está protegido dentro de la planta y se multiplica en los espacios intercelulares cuando la planta

crece. La asociación es a largo plazo, lo que sugiere una aplicación para cultivos perennes, tales como la vainilla. El principal uso de las bacterias endofíticas se relaciona con el control de enfermedades en plantas. La alta diversidad de bacterias endofíticas que se conocen podría explicar el gran número de mecanismos de control de una enfermedad que presenta una especie vegetal, entre los que se incluyen la producción de compuestos antimicrobianos, la competencia por macronutrientes y micronutrientes, el hiperparasitismo y la resistencia sistémica adquirida (Rathod et al., 2013).

Cuadro 2. Resultados del aislamiento de bacterias endófitas de *Vanilla* sp. y de su capacidad in vitro para inhibir el crecimiento del hongo *Fusarium oxysporum*.

Nº muestra de vainilla	Crecimiento en PDA	Crecimiento en AN	Nº colonias aisladas	Nº colonias seleccionadas para la prueba in vitro	Resultado prueba de antagonismo in vitro
1	+	+	6	4	-
2	-	+	5	4	-
3	-	-	-	-	-
4	-	+	4	4	-
5	-	+	2	2	-
6	-	+	2	2	-
7	-	+	6	6	-
8	-	+	2	2	-
9	-	+	2	2	-
10	-	+	2	2	-
11	-	+	4	2	+ Muestra B1M11 (10 ⁻¹)

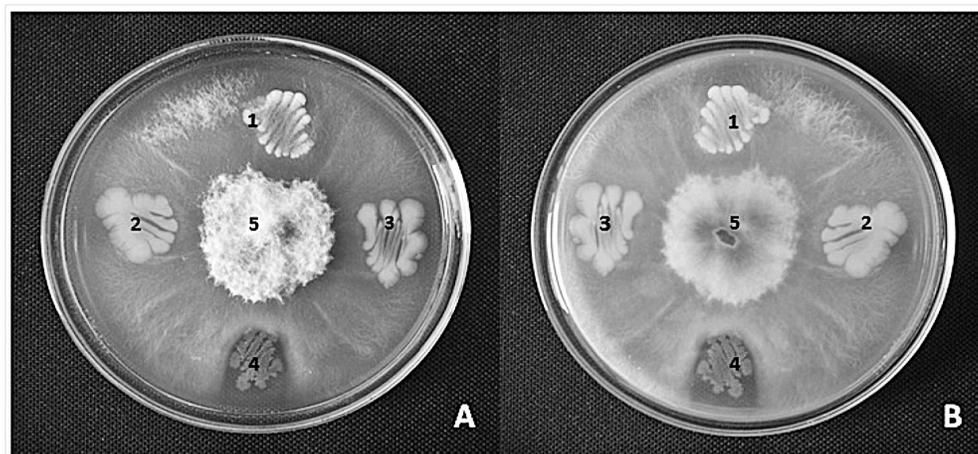


Figura 3. Prueba de antagonismo in vitro entre el hongo *Fusarium oxysporum* (5) y cuatro bacterias endófitas aisladas de vainilla: B1M11 (10⁻²) (1), B1M10 (10⁻²) (2), B1M10 (10⁻¹) (3), B1M11 (10⁻¹) (4): A) vista frontal de la placa Petri, B) vista inversa de la placa Petri.

Para efectos de esta investigación, la muestra 11 presentaba un estado fisiológico deteriorado, como se mencionó en el cuadro 1 y como se observa en la figura 2; entonces, tomando en cuenta la enfermedad de la planta y que esta presentaba al menos una bacteria endófitas con capacidad de defensa, se tienen entonces indicios de una relación de incompatibilidad entre la planta y el patógeno, ya que esta parece estar generando mecanismos de defensa contra el microorganismo invasor a pesar de que éste ya ingresó (Stella, 2010).

Tras aclarar que las muestras 10 y 11 son un segmento sano y uno enfermo, respectivamente, de una misma planta, se podría inferir que la planta como tal posee bacterias endófitas que participan en la defensa frente al fitopatógeno y por eso el resultado positivo en la prueba de antagonismo, pero quizá, en este caso, la bacteria endófitas se encontraba en una baja concentración en el momento que el hongo penetró el tejido y no logró evitar la enfermedad, por lo que se podrían buscar maneras de potenciar naturalmente esa bacteria endófitas en la vainilla.

En general, los factores que favorecen el ingreso de microorganismos fitopatógenos en la vainilla son múltiples y pasan de los genéticos a los ambientales, pero se concuerda en que las variedades comerciales de vainilla disponibles en el mercado tienen tejidos ricos en nutrientes que las hacen muy susceptibles a las infecciones causadas por hongos y bacterias; esto se aúna a que la polinización manual de la vainilla, aunque es muy efectiva, si excede el número de flores fertilizadas según la capacidad de la planta, ésta se debilita y es igualmente susceptible al ataque de patógenos (Paniagua, 2013).

Selección de la cepa bacteriana con potencial biocontrolador

La cepa bacteriana identificada como B1M11 (10^{-1}) fue la única que se perfiló como candidata promisorias para responder al ataque del hongo patógeno *F. oxysporum*. Esto se determinó mediante la aparición de un halo de inhibición del crecimiento del hongo en placa, como se observa en la figura 3. El halo se presenta como un cese en el crecimiento del hongo alrededor de la bacteria, de manera que el micelio no alcanza a entrar en contacto con ella y genera una región en la que se observa únicamente el medio de cultivo, como línea divisoria entre ambos microorganismos.

Se debe continuar con las pruebas bioquímicas y moleculares para la identificación de esta bacteria, ya que los estudios ecofisiológicos de las relaciones huésped-endófito requieren el análisis de genes reporteros para la cuantificación de actividad transcripcional y metabólica. Los genes reporteros comúnmente usados codifican proteínas cuya expresión se detecta fácilmente mediante mediciones rápidas, sensibles, altamente específicas, cuantitativas y reproducibles. Estos incluyen cloranfenicol acetiltransferasa, P-galactosidasa, luciferasa, P-gluconidasa (GUS) y la proteína verde fluorescente (Bacon y Hinton, 2007). Además, las pruebas moleculares permitirán un mayor conocimiento de la expresión de genes en cultivos perennes y pueden proporcionar una mejor comprensión de la resistencia inducida en las plantas (Rathod et al., 2013).

Conclusiones

- La cepa bacteriana identificada como B1M11 (10^{-1}) es una candidata promisorias para responder al ataque del hongo patógeno *F. oxysporum*.
- Los híbridos de vainilla producto del cruce de *V. planifolia* y *V. pompona* parecen ser igualmente susceptibles a las infecciones causadas por el hongo *F. oxysporum*.
- Para el aislamiento de bacterias endófitas promisorias en vainilla, se puede utilizar material que presente el inicio de la sintomatología causada por el ataque de *F. oxysporum*.

Bibliografía

- Bacon, C. & Hinton, D. (2007). Isolation in Planta Detection, and Uses of Endophytic Bacteria for Plant Protection. (pp. 638-651). En C. Hurst. *Manual of Environmental Microbiology*. 3 ed. Santiago de Cali, Colombia. Bhai, S.
- Dhanesh, J. (2008). Occurrence of fungal diseases in vanilla (*Vanilla planifolia* Andrews) in Kerala. *Journal of Spices and Aromatic crops*, 17(2), 140-148.
- Carrillo, L. (2003). Los hongos de los alimentos y forrajes. *Fusarium*. Salta, Argentina: Editorial de la Universidad Nacional de Salta.
- Chaverri, G. (2013). *Cultivo de vainilla orgánica en sistemas agroforestales. Experiencias en el cultivo de vainilla*. San José: INISEFOR-Colegio de Ingenieros Agrónomos.
- Ferrando, L. & Fernández-Scavino, A. (2013). Functional Diversity of Endophytic Bacteria. (pp. 195-211). En R. Aroca. *Symbiotic Endophytes: Soil Biology*. Granada, España: Springer.
- Gätjens, O. & Montero, W. (2012). *Desarrollo de una nueva metodología de transformación genética no tradicional, como estrategia potencial para inducir resistencia a infecciones fúngicas en vainilla (Vanilla planifolia)*. San Carlos, Costa Rica. Informe final a la VIE. ITCR.
- González, M., Lázaro, C., Engelmann, F., Gámez, R., Martínez, Y., Pastelin, M. & Díaz, C. (2009). Multiplication and cryopreservation of vanilla (*Vanilla planifolia* 'Andrews'). *In Vitro Cell. Dev. Biol. Plant*, 45, 574-582.
- Kistler, C. (1997). Genetic diversity in the plant-pathogenic fungus *Fusarium oxysporum*. *Phytopathology*, 87, 474-479.
- Madigan, M., Martinko, J., Dunlap, P. & Clark, D. (2009). *Brook: Biología de los Microorganismos*. 12 ed. Madrid: Pearson Education.
- Melnick, R., Bailey, B. & Backman, P. (2012). Bacterial Endophytes of Perennial Crops for Management of Plant Disease. (pp. 49-75). En D. Maheshwari, M. Saraf, A. Aeron. *Bacteria in Agrobiolgy: Crop Productivity*. Ahmedabad, India: Springer.
- Olivares, H. (2010). Sombra artificial y aplicación de thidiazurón en el crecimiento y fisiología de la vainilla (*Vanilla planifolia* Andrews). Tesis Maestría. Texcoco, México. Campus Montecillo.
- Paniagua, A. (2013). *Cultivo de vainilla orgánica en sistemas agroforestales. Introducción al cultivo de vainilla*. San José: INISEFOR-Colegio de Ingenieros Agrónomos.
- Paniagua, A., Villalba, V. & Montero, L. (2011). *Desarrollo de sistemas agroforestales como alternativa de producción sostenible para pequeños y medianos productores de la zona Atlántica de Costa Rica*. Informe Final al Programa de Regionalización Interuniversitaria. Costa Rica: CONARE.
- Rathod, D., Dar, M., Gade, A., Shrivastava, R., Rai, M., & Varma, A. (2013). Microbial Endophytes: Progress and Challenges. (pp. 101-121). En S. Chandra, H. Lata, A. Varma. *Biotechnology for Medicinal Plants*. Berlín: Springer.
- Stella, A. (2010). *Inducción de Resistencia en Plantas. Interacción Planta-Patógeno*. San José: IICA.
- Varela, E. (2011). *Vanilla production in Costa Rica*. En D. Havkin-Frenkel, F. Belanger (Eds.), *Handbook of vanilla science and technology*. Iowa: Blackwell Publishing Ltd.
- Villalba, V., Moreira, I. & Díaz, G. (2012). *Identificación y estudio molecular de Fusarium sp., agente causal de la marchitez necrótica presente en los sistemas agroforestales en asocio con el cultivo de vainilla (Vanilla sp.)*. Informe final a la VIE. ITCR.

El agua como parte de la cultura de las comunidades rurales: un análisis para la cuenca del río San Carlos

Water as part of the culture of rural communities: an analysis for the San Carlos River basin

Cristian Moreira-Segura¹, Freddy Araya-Rodríguez², Claudia Charpentier-Esquivel³

Fecha de recepción: 26 de setiembre del 2014

Fecha de aprobación: 7 de febrero del 2015

Moreira-Segura, C; Araya-Rodríguez, F; Charpentier-Esquivel, C. El agua como parte de la cultura de las comunidades rurales: un análisis para la cuenca del río San Carlos. *Tecnología en Marcha*. Vol. 28, N° 2, Abril-Junio. Pág 126-140.

1 Máster en Ciencias de la Educación, estudiante del programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE), profesor de la Escuela de Idiomas y Ciencias Sociales, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede San Carlos. Costa Rica. Correos electrónicos: cristianmoreiras@gmail.com, cmoreira@itcr.ac.cr. Teléfono: (506) 2401-3131.

2 Doctor en Ciencias Agrícolas, Coordinador General del Programa Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo Sostenible (DOCINADE). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede San Carlos. Costa Rica.

3 Doctora en Educación Ambiental, profesora del Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE), Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede San Carlos. Costa Rica.

Palabras clave

Recurso hídrico; educación ambiental; cultura del agua; comunidades rurales.

Resumen

En este artículo se presenta parte de los resultados de una investigación que se realizó en tres comunidades rurales de la región Huetar Norte de Costa Rica. Se seleccionó un total de 262 vecinos de esas comunidades con el propósito de recabar información sobre los conocimientos, las actitudes, los valores, las habilidades, las destrezas y el comportamiento que tienen los habitantes de esos lugares con respecto al recurso hídrico. Se determina que los pobladores tienen un nivel mínimo de conocimientos sobre la conservación del recurso hídrico, una actitud positiva para realizar cambios en las acciones cotidianas relacionadas con el uso del agua y una disposición también positiva. No obstante, las habilidades y destrezas que aplican para su conservación son insuficientes y no se traducen en acciones positivas. Los resultados obtenidos ofrecen la base para fundamentar una propuesta de educación ambiental para el cuidado del agua en los hogares de esta región.

Keywords

Water resources; environmental education; water culture; rural communities.

Abstract

This article presents part of the results of a research carried out in three rural communities in the Northern Zone of Costa Rica, a total of 262 residents of these communities were selected and interviewed in order to provide information on the knowledge, attitudes, values, abilities, skills and behavior of the residents of these communities related to water resource. It was identified that the people from these communities have a low level of knowledge on the conservation of water resources; a positive attitude to make changes in everyday actions involving the use of water and also have a positive disposition. However, the skills that are applied for conservation tend to be insufficient and lack of impact positive action, they show inadequate competence to carry out such action. The results provide the basis to support an environmental education proposal for water conservation in homes in this region.

La problemática del agua

En Costa Rica, de las 34 cuencas hidrográficas que tiene el país, cinco están clasificadas como de la mayor importancia en relación con la cantidad de población que se asienta en ellas, lo cual ocasiona que estén afectadas por la contaminación física debida a sedimentos, la contaminación fecal por los vertidos domésticos no tratados y la contaminación orgánica por las descargas agroindustriales con bajo nivel de tratamiento. Estas cinco cuencas representan más del 50% del territorio costarricense (MINAET, 2009).

El tema del recurso hídrico y su relación con los efectos del cambio climático ha cobrado gran relevancia dentro de la comunidad científica y este interés se ha trasladado a diversos campos profesionales, entre ellos el de la salud, por el impacto que tiene en la incidencia de afecciones como diarreas, dengue o parásitos intestinales, y su impacto en las poblaciones humanas más vulnerables. La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2004) estima que aproximadamente el 80% de todas las enfermedades que aquejan a los países en desarrollo son atribuibles, en

parte, a la falta de abastecimiento de agua potable y de medios adecuados de saneamiento. A este respecto, el Ministerio de Salud de Chile (2009) advierte que estos efectos negativos son reversibles y prevenibles y considera que la morbilidad y mortalidad derivadas de las enfermedades más graves asociadas con el agua se reducirían hasta en un 80% si se garantizara el acceso al agua potable y a una adecuada canalización. Según los expertos, la disponibilidad de agua potable per cápita ha disminuido un 62% en los últimos 50 años. Se estima que para 2025 habrá disminuido un 21% más, o sea 83% en 75 años (MINAET, 2007). Tres de cada cuatro fuentes de abastecimiento no están protegidas. Cuatro de cada cinco enfermedades que afectan a los centroamericanos están relacionadas con la contaminación o el mal manejo del agua y más de una cuarta parte del suministro del líquido en el área metropolitana de Costa Rica se pierde a causa de las fugas (MINAET, 2009).

Se tiene claro que el tiempo para asumir seriamente la responsabilidad ambiental se agota, y que su ausencia genera impactos de fondo. Los efectos del consumo desmedido e irracional de los recursos naturales se perciben ya en la capacidad del planeta para sostener el nivel de vida de las sociedades, en la calidad y disponibilidad de estos para su uso actual y futuro, en la salud de los seres vivos y en el equilibrio natural. La problemática ambiental que sufre el planeta, en general, y la que recae sobre el agua en particular, se enmarcan en un contexto global, pues tal y como plantean Cisneros y Tundisi (2012), el agua es el componente más importante del planeta y todos los seres vivos dependen de ella. El agua también promueve o desincentiva el crecimiento económico y el desarrollo social de cada región y afecta sus patrones de vida y su cultura, por lo que se la reconoce como un agente preponderante en el desarrollo regional y nacional (p. 31).

Tradicionalmente, el agua ha sido considerada un recurso de “propiedad común”, abundante y accesible a todos por igual, y cuyo precio es muy bajo o nulo. Esto ha determinado unos patrones de uso y consumo del agua que provocan que el recurso se derroche. Cuando el precio de un recurso como el agua es muy bajo o se aleja de su costo real, se utiliza sin tomar en cuenta ni la cantidad ni la conservación. Históricamente, el agua ha participado en el desarrollo social, económico y cultural de Costa Rica, pero su relativa abundancia ha creado la impresión de que es un recurso infinitamente renovable. Sin embargo, la historia ha demostrado que la calidad de los recursos hídricos ha ido cambiando a través del tiempo con graves consecuencias para los humanos y el ambiente (Cisneros y Tundisi, 2012, p. 228).

El MINAET, en su Política Hídrica Nacional (2009), en el apartado sobre lineamientos estratégicos, pone de manifiesto la necesidad de crear una “cultura del agua”, mediante la aplicación de procesos educativos de carácter formal (sistema escolar) para niños y jóvenes y no formal (fuera del sistema escolar) para la población en general. Para lograr ese cambio, es necesario no solo la buena voluntad sino también la acción informada y decidida basada en el conocimiento sobre el uso adecuado del recurso hídrico. La nueva cultura del agua implica que la labor de la educación ambiental debe tener un carácter preventivo, lo que resulta más conveniente tanto en términos económicos como medioambientales, buscando promover un cambio de hábitos y actitudes cotidianas que se concreten en acciones adecuadas en este campo (Márquez, 2003).

El agua como parte de la cultura comunal

En primer lugar, se debe considerar que el contexto, como conjunto organizado, como sistema, ha de interpretarse fundamentalmente a través de las relaciones entre sus partes, no por la mera descripción de estas (Novo, 2003). A pesar de que el tema del agua se ha abordado desde hace ya algún tiempo (Aguayo, Herrera y Palos, 2004; Lirios, 2005; Corral-Verdugo, Sing, Blanca y Tapia, 2008; Verdugo, Armenta, Sing y González, 2009), no es sino hasta ahora que

adquiere la importancia necesaria debido a problemas más evidentes y agudos, tales como la contaminación, el limitado acceso a fuentes adecuadas, el uso irracional y la constante preocupación de grupos organizados por estos temas.

Según Calixto (2009), el problema socioambiental del agua en el momento actual es vital; si no existiese agua para el consumo humano, grandes poblaciones se verían obligadas a desplazarse, propiciando enfermedades y escasez de alimentos. Márquez (2003) agrega que el agua ha sido, es y será “un tema intemporal, de perenne actualidad que ocupa y preocupa en distinto grado y manera a buena parte de la sociedad, pero que no es un hecho aislado sino que forma parte de la problemática ambiental que vivimos” (p.16), por lo cual es primordial cambiar nuestros propios esquemas de significado. Según Díaz y Arceso (2002), construir significados nuevos implica un cambio en los esquemas de conocimiento que se poseen previamente, lo cual se logra introduciendo nuevos elementos o estableciendo nuevas relaciones entre ellos. También es una realidad incuestionable que la gestión actual del recurso agua, a nivel global y sectorial, no es la más adecuada y que predomina el despilfarro sobre su uso racional y sostenible (Márquez, 2003). Por todo lo anterior, resulta evidente que la resolución de problemas reales, aquellos que afectan las necesidades, deseos e intereses de las personas, se constituye en una de las estrategias más eficaces para trabajar en educación ambiental (Novo, 2003). En un entorno comunal, el elemento educativo se convierte en un bastión clave de la perpetuación de prácticas deseables en lo referente al ambiente, la asimilación de conceptos y creación de nuevas actitudes. Novo (1996) indica que las iniciativas de educación no formal en el terreno ambiental deben ser enfocadas en los grupos comunales organizados que:

todos los días adoptan pequeñas decisiones a la hora de comer, vestirse, comprar, etc., decisiones que unidas conforman grandes impactos. Y hay que resaltar que el papel de la población adulta es muy importante no sólo porque decide, sino también porque puede controlar decisiones (p. 8).

Es necesario reconocer la importancia del agua como elemento de la naturaleza imprescindible para la vida de los seres vivos y actuar en consecuencia. En última instancia, la alfabetización ambiental se expresa como el ejercicio de una acción responsable hacia la resolución de los problemas ambientales (Hollweg et al., 2011).

La importancia de conocer la cultura del agua de las comunidades rurales en Costa Rica, con el fin de apoyar a los grupos en la identificación y ejecución de acciones para su conservación, fue lo que motivó la realización del presente estudio.

Metodología

Lugar de estudio

La investigación se llevó a cabo en tres comunidades de la cuenca del río San Carlos: Santa Rita, Muelle y Boca Tapada (las partes baja, media y alta, respectivamente), las cuales se muestran en la figura 1. La selección de estas tres zonas obedece a que, de acuerdo con Castillo (2007), las cuencas que son compartidas por poblaciones ubicadas en sus partes alta, media y baja son también ejemplo de referente común, dada la intensa interrelación que se da entre ellas al estar asociadas a un mismo recurso, al grado de que lo que se haga o deje de hacer en una parte de cada cuenca incide o afecta a las demás partes y, por ende, a sus poblaciones.

de contenido, se efectuó mediante el criterio de expertos. Este grupo lo conformaron cuatro especialistas en educación ambiental que le introdujeron cambios y mejoras.

Una vez validado por los expertos, se aplicó a 20 personas de una comunidad que no participó en el estudio pero tenía características similares a las de las comunidades objeto de análisis: Santa Clara, en Florencia de San Carlos. Esto permitió realizar mejoras al instrumento para la recolección de los datos pertinentes para la investigación apegada a los objetivos a desarrollar.

Este cuestionario se aplicó a 30 personas de las comunidades en estudio y las respuestas fueron anotadas y categorizadas y luego se seleccionó el enunciado que mejor representaba la categoría y se utilizó para construir el instrumento con preguntas cerradas.

Los ítems contenidos en el instrumento se distribuyen de la siguiente manera: nueve para medir el componente de conocimientos, siete para abordar la disposición ambiental, 17 para medir comportamiento y 15 para valorar competencias, para un total de 48 ítems. Cada enunciado se evaluó con una escala tipo Likert de cuatro y cinco puntos. La persona encuestada tenía que seleccionar una de esas respuestas.

Se realizaron análisis estadísticos univariados y los promedios de las escalas se utilizaron para construir índices que representaron a las variables (disposición, comportamiento y competencia). Con estos índices se elaboró la matriz de correlaciones, en la que se determinó una relación entre las variables. Finalmente, se hizo un análisis de trayectorias para establecer las relaciones entre los componentes. Esta información es de suma relevancia pues permite diseñar el tipo de intervención en educación ambiental.

Resultados

Características generales de los participantes en el estudio

La aplicación del cuestionario se hizo de manera personal a un total de 262 personas mayores de edad, residentes de las tres comunidades seleccionadas. En el cuadro 1 se presenta la información de los participantes en la investigación y los datos más importantes son los siguientes: el género de los participantes (52% hombres y 48% mujeres), de estos, el 56% corresponde a personas entre 18 y 40 años; el 79% tiene algún grado de educación formal pero casi la mitad tiene solamente primaria y la mayoría (61%) cuenta con más de 11 años de residir en la comunidad.

El estudio determinó que la mayor parte de la población que participó en la investigación se ubica en un rango de edad mayor a los 40 años, con un nivel educativo de primaria para casi el 50% de los participantes; solamente el 17% cuenta con educación universitaria. Con esta información se concluye que el nivel educativo de la mayoría es básico. Se identifica también que un 61% de los participantes cuenta con más de 10 años de residir en la comunidad y solo una pequeña parte (39%) tiene menos de un decenio; de lo anterior se puede afirmar que la población tiene un tiempo considerable de residir en el lugar.

La figura 2 muestra los resultados de las acciones que de manera individual estarían dispuestos a realizar los participantes para solucionar la problemática de la desatención de las fuentes de agua. De las respuestas emitidas, las tres que tuvieron el mayor porcentaje fueron: discutir la problemática en las reuniones comunales (32%), informarse más profundamente sobre los problemas que les afectan (25%) y buscar medidas para colaborar en la comunidad (24%). Es importante señalar que solo el 7% está dispuesto a plantar árboles y el 9% a educar a jóvenes, tareas fundamentales pero que requieren un compromiso mayor que ir a reuniones o informarse sobre los problemas de la localidad. Ninguna de las respuestas fue señalada por la mayoría y según indican Durán, Alzate, López y Sabucedo (2007):

para que pueda iniciarse cualquier tipo de cambio es preciso, en primer lugar, que la ciudadanía tome conciencia de que existe un problema y que su acción puede contribuir a la solución del mismo. En lo que respecta al medio ambiente, parece que ese primer paso ya ha sido dado (p. 288).

Cuadro 1. Características de los participantes en el estudio

Características	Porcentaje
Género	100
Masculino	52
Femenino	48
Edad	100
18 a 30	29
31 a 40	27
41 a 50	19
51 o más	25
Escolaridad	100
Sin estudios	3
Primaria	47
Secundaria	32
Técnica	1
Universitaria	17
Años de residir en la comunidad	100
0 a 10	39
11 a 30	34
31 o más	27
Total de la muestra	262

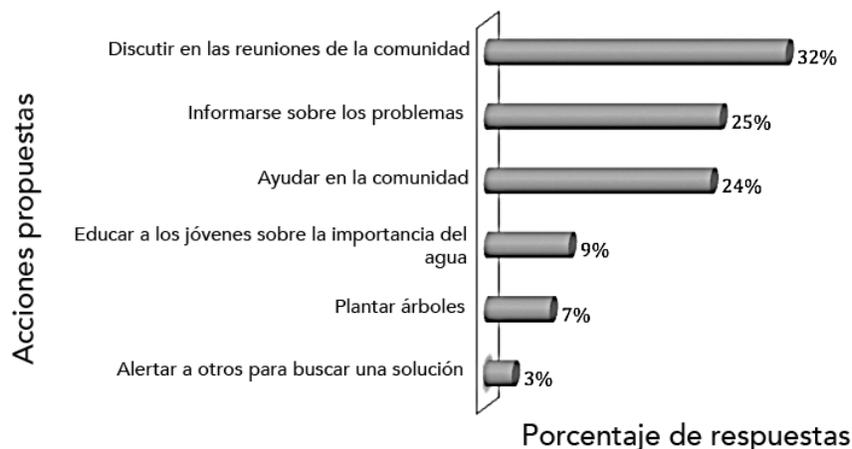


Figura 2. Acciones individuales para atender adecuadamente las fuentes de agua

En la figura 3 se muestra que la mayoría de las personas (88%) indica que toma medidas en sus casas para reducir el consumo de agua cuando se incrementa la factura. Esto sugiere que existe interés por bajar el monto del recibo de agua, pero no es claro si se hace por razones económicas o ambientales.

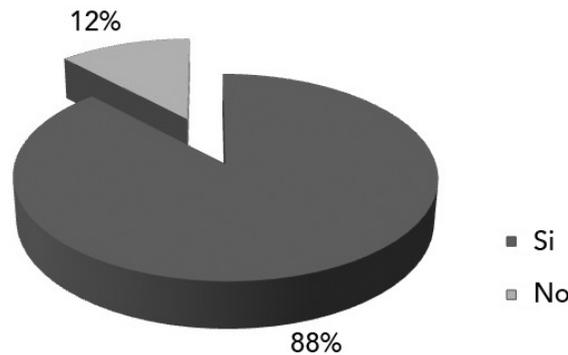


Figura 3. Porcentaje de los participantes que toma medidas ante el aumento del consumo de agua en sus hogares.

Al preguntarles sobre las medidas que tomarían para atender una fuga de agua en su casa, la mayoría (51%) indicó que lo repararía personalmente y solo el 4% manifestó que esperaría para reparar el daño (ver Figura 4). Esta respuesta es muy importante, pues una fuga puede causar el desperdicio de hasta 30 litros de agua diarios y la conducta del despilfarro debe ser enfrentada con los programas de educación ambiental.

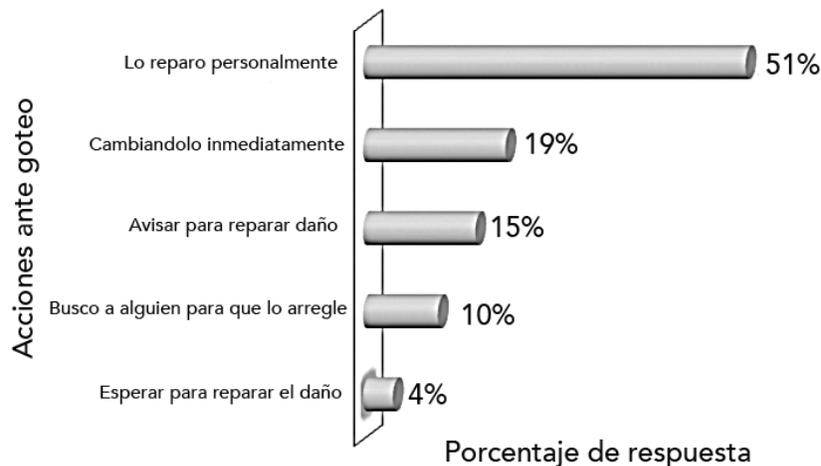


Figura 4. Medidas que tomarían los participantes en el estudio para atender una fuga de agua en el hogar.

Al indagar sobre la problemática que aqueja al agua en el contexto comunal, la mayoría de los participantes respondió que era la falta de conciencia que existe sobre la importancia que tiene el recurso hídrico (41%) y la contaminación que se hace de los ríos y las quebradas a causa de los desechos que se arrojan a ellos de manera indiscriminada (31%) (ver figura 5). Esta

respuesta es relevante, debido a que la problemática identificada se puede abordar y revertir con la implementación de un plan de educación ambiental.

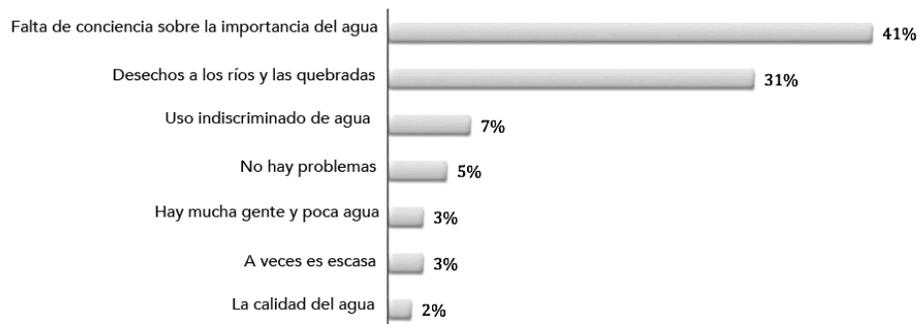


Figura 5. Problemas relativos al agua de mayor importancia en la comunidad.

Uno de los elementos más significativos de la información obtenida es el que ilustra la figura 6. Aquí se refleja que los esfuerzos que los participantes hacen, o dicen hacer, son insuficientes para ahorrar agua y evitar el desperdicio, puesto que si el consumo promedio per cápita se compara con el que tienen los demás costarricenses, los centroamericanos y el promedio mundial, se ve con claridad que el consumo de la población participante es muy superior y justifica que se trabaje en pro del uso sostenible del líquido en un programa de educación ambiental.

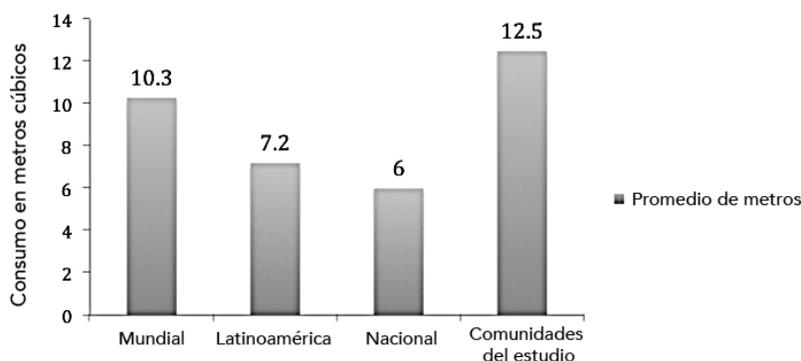


Figura 6. Consumo mensual promedio de agua de los habitantes de las comunidades en estudio en San Carlos, comparado con el nacional, el de América Latina y el mundial

Disposición ambiental para proteger el agua

El análisis de las respuestas sobre la disposición ambiental de los participantes para tomar medidas en pro de un uso sostenible del agua permite identificar competencias que requieren la integración de conocimientos, habilidades, destrezas o comportamientos. Según el enunciado, en algunos casos lo deseado lleva a seleccionar el lado positivo o bien el lado negativo de la escala. Por lo tanto, se considera que la elección de las opciones *totalmente de acuerdo* y

medianamente de acuerdo corresponde a una respuesta positiva ante el enunciado propuesto y la escogencia de las alternativas *poco de acuerdo* y *nada de acuerdo* son evidencia de una posición negativa hacia las afirmaciones propuestas.

De esta manera, las respuestas constituyen elementos esenciales para identificar los rasgos más importantes de la cultura ambiental que tienen las personas de las comunidades estudiadas sobre el recurso hídrico. Los aspectos que se consideran favorables porque contribuyen a la conservación del agua deben reforzarse y si fueron evaluados negativamente, se les debe prestar particular atención para considerarlos en la definición de competencias para la preservación del recurso. Lo mismo sucede con las situaciones que adversan la conservación y que no fueron reconocidas como tales.

Al analizar las respuestas que dieron los entrevistados sobre aspectos que reflejan su disposición ambiental hacia el recurso hídrico (Cuadro 2), en el caso de la afirmación “Es muy difícil que una persona como yo pueda lograr un cambio en otros con respecto a la manera en que usan el agua”, se puede observar que la mayoría está en desacuerdo (82%). Este resultado es un excelente referente a considerar en el programa porque expresa su voluntad de participar en la educación de la gente de su comunidad y, por lo tanto, se considerará en la propuesta. Sin embargo, algunos estudios muestran que las actitudes no necesariamente se traducen en comportamientos y por esa razón se deben incorporar en el trabajo en competencias del plan. Así lo confirman Arreguín-Moreno, Román-Pérez, Laborín-Álvarez, Moreno, Valdez y Valenzuela (2009), al revelar que sus resultados indican que la población tiene actitudes positivas en relación con el cuidado de su consumo doméstico de agua pero no se refleja en sus prácticas.

El 73% de los participantes no está de acuerdo en que el precio que se paga por el agua es inferior a su valor real. Esta respuesta difiere de los resultados de otros estudios, que demuestran que el pago del agua no refleja el costo real, y, por lo tanto, se les debe educar sobre los costos de ofrecer el servicio de abastecimiento y conservación del recurso hídrico. Uno de esos estudios es el de Barrantes (2010), quien afirma que:

Una de las principales causas de esta problemática es que las tarifas de agua consideran sólo el costo financiero de brindar el servicio de abastecimiento, sin incluir los costos ambientales en que se debe incurrir para disponer de agua en calidad y cantidad socialmente aceptables (p. 132).

De igual manera, Merayo-Calderón señala en un estudio realizado en Guanacaste en 2004 que, “aunque la voluntad de pago de los pobladores de la cuenca del río Endemedio es alta, el monto que están dispuestos a pagar adicional a la tarifa actual no es suficiente para cubrir los costos reales del agua” (p. 90).

El análisis de otras preguntas denota que los entrevistados siguen considerando que no es importante dedicar su tiempo a la participación activa en grupos ambientales organizados que protegen el agua. Por ejemplo, el 55% indica que existen cosas más importantes que hacer. Este resultado debe incorporarse en el programa, ya que es necesario lograr la participación de miembros de la comunidad de diferentes edades para que los proyectos tengan continuidad en el tiempo. Un esfuerzo que comprueba este planteamiento es el de UNAGUAS de Grecia, que dedica tiempo para realizar talleres con los miembros de la comunidad cuya temática gira en torno a la solución de los problemas con el acueducto y el recurso hídrico común. Sin lugar a dudas, para que pueda iniciarse cualquier tipo de cambio es preciso, en primer lugar, que la ciudadanía tome conciencia de que existe un problema y que su acción puede contribuir a la solución (Durán et al., 2007, p. 228).

La participación comunal resulta fundamental para el éxito de la conservación del recurso hídrico y por ello este elemento debe incluirse en el plan de educación ambiental, siendo los

pobladores los principales actores de las acciones, las iniciativas y de la organización de grupos que cuiden el agua.

Cuadro 2. Disposición ambiental hacia situaciones que inciden en la conservación del recurso hídrico

Afirmación	Totalmente de acuerdo (%)	Medianamente de acuerdo (%)	Poco de acuerdo (%)	Nada de acuerdo (%)
Tiene poco sentido que yo evite el despilfarro de agua, si los demás no hacen lo mismo.	21	17	37	25
Hay cosas más importantes que formar parte activa de un grupo ambiental que cuida el agua.	23	32	15	30
Es muy difícil que una persona como yo pueda lograr un cambio en otros con respecto a la manera en que usan el agua.	11	7	42	40
Una medida para proteger el agua es pagar un precio más elevado por metro cúbico.	21	17	37	25
El precio que se paga por el agua es inferior a su valor real.	15	12	49	24

Comportamientos sobre el recurso hídrico

El cuadro 3 incluye las respuestas que brindaron los participantes en este estudio ante diferentes situaciones relacionadas con el agua que se les plantearon. Es evidente que ninguna de las respuestas obtuvo mayoría en la parte de la escala que dice “Lo hago casi siempre”, es decir, no forman parte de la cultura de conservación del recurso hídrico actual y todas deben ser consideradas en el plan de educación ambiental .

En relación con las acciones ambientales que aparecen en este cuadro, se puede observar que las respuestas que reflejan comportamientos de las personas que participaron en el estudio y que apoyan la conservación del agua están por debajo del 50% y la mayoría son inferiores al 25%. Es decir, que las acciones individuales que realizan en favor del recurso hídrico se producen con poca frecuencia o no se hacen del todo.

Por otra parte, un comportamiento que se esperaría fuera habitual, la revisión del consumo mensual de agua que se tiene en el hogar, lo practica casi siempre solamente el 40% de participantes. Otra situación que se hubiera esperado que la practicara la mayoría de los participantes es la reparación de manera inmediata de las fugas en la tubería del hogar, pero solo el 50% lo hace. Sin embargo, de estas respuestas no queda claro si las acciones de revisión de consumo y reparación de fugas se realizan por razones de tipo ambiental (cuidar el recurso) o económico (reducir la factura mensual). Corral-Verdugo (2008) refuerza lo relevantes que son los análisis de los recibos de consumo, al señalar que no existe una medida más precisa ni más relacionada con el gasto de agua que la que reflejan esas mediciones.

Esta información es clave para la formulación de un plan de educación ambiental, pues los resultados expuestos por Hassel y Cary (2007) confirman que la mayoría de los usuarios subestima su consumo de agua, lo cual sugiere que es posible conseguir un mayor ahorro de agua en los hogares. Solo el 9% de los participantes señaló que reduce el tiempo que tarda en la ducha, comportamiento que únicamente requiere la decisión y el compromiso. Este resultado

es relevante, pues estudios realizados confirman que la ducha es uno de los puntos del hogar con más alto consumo (Loh y Coghlan, 2003; Roberts, 2005; Heinrich, 2007). También Fan y colaboradores (2013) concluyen que se requiere más educación para cambiar puntos de vista tradicionales y comportamientos hacia un mejor uso de equipos que utilizan agua y la calidad de vida, así como la incorporación de prácticas de conservación del recurso, tales como tomar duchas cortas y enseñar a los niños a conservar el agua y ser un buen modelo para otros.

Cuadro 3. Acciones ambientales para la conservación del recurso hídrico

Comportamientos	No lo he hecho ni lo haría (%)	No lo he hecho pero estoy dispuesto a hacerlo (%)	Lo he hecho alguna vez (%)	Lo hago casi siempre (%)
Participo como voluntario(a) en la siembra de árboles.	18	71	10	1
Participo en campañas de limpieza de ríos.	8	56	15	21
Colaboro con instituciones u organismos en defensa del recurso hídrico.	21	21	33	25
Reduzco el tiempo que tardó en la ducha diariamente.	20	36	35	9
Instalo dispositivos en los grifos (llaves) para que reduzcan la cantidad de agua que sale del tubo.	2	64	11	23
Reparo inmediatamente las fugas en la tubería del hogar.	8	26	16	50
Recolecto agua de lluvia para usarla en actividades que no requieran que sea potable.	18	31	30	21
Me lavo los dientes utilizando un vaso con agua.	23	17	40	20
Lavo el carro con una cubeta de agua en lugar de hacerlo con una manguera.	12	50	35	3
Reviso el consumo mensual de agua para regular el uso que hacemos en la casa.	21	9	30	40
Les indico a otros miembros de la familia sobre medidas para evitar el consumo excesivo de agua.	15	23	37	25
Organizo un proyecto ambiental para proteger la fuente de agua donde los ciudadanos de mi comunidad se involucren.	16	79	3	2

Los entrevistados respondieron que acciones como reducir el tiempo que se tarda en la ducha (9%) o lavarse los dientes con un vaso de agua (20%) están entre las que realizan casi siempre. Por otra parte, recolectar agua de lluvia para usarla en actividades que no requieran que sea potable no es tan frecuente (21%), aunque estas acciones sean relativamente sencillas. Por otra parte, acciones un poco más complejas, que implican una inversión de dinero y de tiempo, como la instalación de dispositivos reductores de consumo en los grifos, se mantienen con un porcentaje de respuesta similar (23%). Donde las tres acciones implican un grado mayor de compromiso y se señala que se realizan de manera regular, se observa un porcentaje muy bajo de escogencia: participo como voluntario(a) en la siembra de árboles: 1%, lavo el carro con una

cubeta de agua en lugar de hacerlo con una manguera: 3%, y organizo un proyecto ambiental para proteger la fuente de agua donde los ciudadanos de mi comunidad se involucren: 2%.

Otro elemento que se debe incorporar en el plan es que las personas participen en la educación del núcleo familiar, puesto que solo un 37% de los entrevistados le ha hablado a otros miembros de la familia sobre medidas para evitar el consumo excesivo de agua y el 25% manifiesta que lo hace casi siempre.

La información recolectada refleja que un porcentaje mínimo de entrevistados casi siempre participa en campañas de limpieza de ríos (21%) y con instituciones u organismos en defensa del recurso hídrico (25%). No obstante, los participantes indican que, aunque no lo han hecho, estarían dispuestos a participar como voluntarios en la siembra de árboles (71%) y en campañas de limpieza de ríos (56%). Un resultado semejante obtuvo Corral-Verdugo (2002) en una investigación en dos comunidades mexicanas, concluyendo que “para muchas personas, los esfuerzos de conservación que observan en otras personas es una razón fundamental para que ellos mismos se incorporen en un proyecto proambiental” (p. 527).

El plan de educación ambiental debe tomar en cuenta estas intenciones de actuar y potenciarlas para que los ciudadanos se incorporen en iniciativas existentes o que ellos mismos establezcan acciones concretas que contribuyan con la conservación del recurso. Otro resultado importante es que la mayoría indicó que aunque, no lo han hecho, estarían dispuestos a instalar dispositivos en los grifos (64%) y hasta organizar proyectos ambientales que involucren a otros ciudadanos. Fan y colaboradores (2013), como producto de su investigación con 3200 individuos sobre sus hábitos de uso del agua, afirman que “los resultados revelan que los residentes prefieren implementar prácticas de conservación que sean convenientes y que no requieren un aporte adicional, de tiempo, de equipo y o de conocimientos técnicos” (p. 52).

Es importante que el proceso educativo oriente a los pobladores a entender que no son otros los que deben realizar las acciones necesarias para cuidar el agua, cuando son las propias acciones desfavorables o la falta de acciones positivas las causantes del deterioro del recurso hídrico en la comunidad. Esto lo reafirma Corral-Verdugo (2002) al aseverar que “al percibir que los demás no ahorran agua disminuye la motivación para la conservación, y debido a una motivación reducida, aumenta el consumo de agua” (p. 533).

Los resultados de este estudio son de suma importancia porque fortalecen el planteamiento de que las acciones de un plan de educación ambiental para la conservación del recurso hídrico “deberán ir más allá del difundir conocimientos en la población, pues adolecería de los factores motivacionales y de competencia” (Aguayo, Herrera y Palos, 2004, p. 66). Este plan debe lograr una participación activa de los ciudadanos mediante la formación de las competencias necesarias para la acción.

Las respuestas que se han señalado como importantes son elementos que se deben incorporar obligatoriamente en el diseño del plan ambiental para la conservación del recurso hídrico en las comunidades de la cuenca del río San Carlos, sin embargo, es posible que estos resultados sean empleados en esfuerzos similares en otras poblaciones con una cultura semejante.

Conclusiones

Para la construcción de una “cultura del agua”, es necesario identificar los conocimientos, habilidades, creencias, actitudes y valores que tienen las personas del grupo meta, para que ellas mismas analicen los resultados obtenidos y logren identificar los cambios necesarios para lograr la conservación del recurso hídrico.

Un plan de educación ambiental debe contribuir con el desarrollo de la competencia necesaria para lograr la ejecución de acciones ambientales.

Un plan de educación ambiental debe promover que se tomen medidas de manera individual, para luego plantear acciones colectivas y comunales más elaboradas y de mayor complejidad.

El estudio revela que los pobladores de las comunidades en estudio tienen actitudes positivas y una disposición adecuada para la conservación del recurso hídrico, no obstante, esos elementos no se reflejan en sus acciones concretas. Es relevante apuntar que ese cambio de la intención a la acción no es más que la aceptación de la cuota de responsabilidad individual, aceptando que todos, de manera personal, contribuimos con el ahorro o el desperdicio de este recurso vital. Es importante tener en cuenta que la sensibilización es solo el inicio del proceso hacia la acción efectiva para conservar el agua.

Agradecimiento

El trabajo de campo para esta investigación se llevó a cabo gracias al apoyo económico del fondo de incentivos del Consejo Nacional para Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICIT) de Costa Rica.

Bibliografía

- Adamson-Badilla, M. (2010). *Disponibilidad de recurso hídrico en Costa Rica*. Obtenido de http://cglobal.imn.ac.cr/sites/default/files/documentos/disponibilidad_de_recursos_hidricos_en_cr.pdf
- Aguayo, J., Herrera, M. & Palos, P. (2004). Predicción de la conservación de agua a partir de factores socio-cognitivos. *Medio ambiente y comportamiento humano*, 5(1-2), 53-70.
- Arreguín-Moreno, R. H., Román-Pérez, R., Laborín-Álvarez, J. F., Moreno, J. L., Valdez, E. A. & Valenzuela, B. (2009). Factores psicosociales relacionados con el consumo doméstico de agua en una región semidesértica. *Salud Pública de México*, 51(4), 321-326.
- Barrantes, G. (2010). Evaluación del servicio ambiental hídrico en la cuenca del río Tempisque (Costa Rica) y su aplicación al ajuste de tarifas. *Revista Lebrez*, 2, 1.
- Blumstein D. & Saylan C. (2007). The failure of environmental education (and how we can fix it). *PLoS Biol* 5(5), e120. doi:10.1371/journal.pbio.0050120
- Calixto, R. (2009). Las representaciones sociales del uso del agua. X Congreso Nacional de Investigación Educativa. Memoria electrónica: www.comie.org.mx/congreso/memoriaelectronica
- Castillo, C. (2007). *Comunidades rurales. Criterios y herramientas para su diagnóstico*. San José: EUNED.
- Cisneros, B. & Tundisi, J. (2012). Diagnóstico del agua en las Américas. Red Interamericana de Academias de Ciencias. Foro Consultivo Científico y Tecnológico, AC. México.
- Corral-Verdugo, V., Frias-Armenta, M., Pérez-Urías, F., Orduña-Cabrera, V. & Espinoza-Gallego, N. (2002). Residential water consumption, motivation for conserving water and the continuing tragedy of the commons. *Environmental management*, 30(4), 527-535.
- Corral Verdugo, V., Sing, F., Blanca, S. & Tapia Fonllem, C. (2008). Un registro observacional del consumo individual de agua: Aplicaciones a la investigación de la conducta sustentable. *Revista mexicana de análisis de la conducta*, 34(1), 79-96.
- Corral Verdugo, V., Fonllem, C., Armenta, M., Sing, B. & González, D. (2009). Orientación a la sostenibilidad como base para el comportamiento pro-social y pro-ecológico. *Medio ambiente y comportamiento humano: Revista Internacional de Psicología Ambiental*, 10(3), 195-215.
- Díaz, F. & Arceso, G. (2002). *Estrategias docentes para un aprendizaje significativo. Una interpretación constructivista*. 2 ed. México: McGraw Hill.
- Durán, M., Alzate, M., López, W. & Sabucedo, J. M. (2007). Emociones y comportamiento pro-ambiental. *Revista Latinoamericana de Psicología*, 39(2), 287-296.

- Fan, L., Liu, G., Wang, F., Geissen, V., Ritsema, C. J. & Tong, Y. (2013). Water use patterns and conservation in households of Wei River Basin, China. *Resources, Conservation and Recycling*, 74, 45-53.
- Hassell, T. & Cary, J. (2007). Promoting behavioural change in household water consumption: literature review. Obtenido de <http://www.vu.edu.au/sites/default/files/Promoting%20behavioural%20Change%20in%20Household%20Water%20Consumption.pdf>
- Heinrich, M. (2007). Water end use and efficiency project (WEEP)-Final Report. BRANZ Study Report 159. Branz, Judgeford, New Zealand.
- Hollweg, K., Taylor, J., Bybee, R., Marcinkowski, T., McBeth, W. & Zoido, P. (2011). Developing a framework for assessing environmental literacy. Washington, D.C.: North American Association for Environmental Education. Obtenido de <http://www.naaee.net>.
- Lirios, C. (2005). Un Modelo para Explicar el Uso del Agua en la Zona Metropolitana del Valle de México. *Revista Internacional de Psicología*, 6(02).
- Loh, M. & Coghlan, P. (2003). *Domestic Water Use Study*. Perth: Water Corporation.
- Márquez, D. (2003). De la teoría a la práctica en educación ambiental: el caso del agua. En *Memorias del Congreso Agua y Educación Ambiental: Nuevas Propuestas para la Acción*. Alicante.
- Merayo-Calderón, O. (2004). Valoración económica del agua potable en la cuenca del Río Endemedio, Santa Cruz, Guanacaste, Costa Rica. *Recursos Naturales y Ambiente.*, Vol. 63, 90-96.
- MINAET (Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones). (2007). *Política Hídrica Nacional*. San José.
- Ministerio de Ambiente y Energía. (2009). *Estrategia de Cambio Climático*. San José.
- Ministerio de Salud de Chile (2009). Manual de salud ambiental infantil para enseñanza de grado en Escuelas de Medicina. Chile.
- Novo, M. (1996). Educación Ambiental: Teoría y Práctica La Educación Ambiental formal y no formal: dos sistemas complementarios. *Revista Iberoamericana de Educación*, 11. Obtenido de <http://www.rieoei.org/oeivirt/rie11.htm#Contenido>.
- Novo, M. (2003). *La educación ambiental: principios básicos desde el punto de vista metodológico*. Madrid: Editorial Universitas.
- Organización Mundial de la Salud (2004). Guidelines for Drinking Water Quality, Volume 3
- Roberts, P. (2005). *Yarra Valley Water 2004 Residential End Use Measurement Study*. Melbourne: Yarra Valley Water.
- Rojas, N. (2011). *Estudio de Cuencas Hidrográficas de Costa Rica. Cuenca del Río San Carlos*. Obtenido de <http://cglobal.imn.ac.cr/documentos/estudio-cuencas-hidrograficas-san-carlos>

Desafíos en la gestión de residuos sólidos para las ciudades de países en desarrollo

Solid waste management challenges for cities in developing countries

Lilliana Abarca-Guerrero¹, Ger Maas², William Hogland³

Fecha de recepción: 5 de diciembre del 2014

Fecha de aprobación: 9 de febrero del 2015

Abarca-Guerrero, L; Mass, G, Hogland, W. Desafíos en la gestión de residuos sólidos para las ciudades de países en desarrollo. *Tecnología en Marcha*. Vol. 28, N° 2, Abril-Junio. Pág 141-168.

Este artículo ha sido publicado en *Waste Management Journal*, Vol. 33 (1). Lilliana Abarca-Guerrero, Ger Maas y William Hogland. Solid waste management challenges for cities in developing countries. Pp. 220-232. Copyright Elsevier (2013).

1 Universidad Tecnológica de Eindhoven, Países Bajos. Correos electrónicos: l.abarca.guerrero@tue.nl; labarca@itcr.ac.cr

2 Universidad Tecnológica de Eindhoven, Países Bajos. Correo electrónico: g.j.maas@tue.nl

3 Escuela de Ciencias Naturales, Linnaeus University, Kalmar, Suecia. Correo electrónico: william.hogland@lnu.se

Palabras clave

Gestión integrada de residuos; índice de generación; calidad; actor social; factor; países en desarrollo.

Resumen

El manejo de residuos sólidos es un desafío para las autoridades de las ciudades de los países en desarrollo, principalmente debido al incremento en su generación, la carga impuesta sobre el presupuesto municipal como resultado de los altos costos asociados a su manejo, la falta de comprensión sobre una diversidad de factores que afectan las diferentes etapas del manejo de residuos y los vínculos necesarios para habilitar el funcionamiento de todo el sistema de manejo. Un análisis de la literatura sobre el trabajo realizado y reportado principalmente en publicaciones de 2005 a 2011, relacionadas con el manejo de residuos en los países en desarrollo, demostró que pocos artículos brindan información cuantitativa. El análisis se realizó en dos de las revistas científicas más importantes en gestión de residuos, *Waste Management Journal* y *Waste Management and Research*. El objetivo de esta investigación fue determinar las acciones y el comportamiento de los actores sociales que juegan un papel en el proceso de manejo de residuos y analizar factores influyentes en el sistema, en más de 30 áreas urbanas en 22 países en desarrollo de tres continentes. En este estudio se utilizó una combinación de métodos para evaluar a los actores sociales involucrados y los factores que influyen en el manejo de residuos en las ciudades. Se recogieron datos de la literatura científica, bases de datos existentes, observaciones realizadas durante visitas a áreas urbanas, entrevistas estructuradas con profesionales de relevancia, ejercicios suministrados a los participantes en talleres y un cuestionario aplicado a los actores involucrados. Se utilizaron métodos estadísticos descriptivos e inferenciales para sacar conclusiones. El resultado de la investigación es una lista completa de los actores sociales involucrados que son pertinentes en los sistemas de manejo de residuos y un juego de factores que revelan las causas más importantes del fracaso de los sistemas. La información brindada es muy útil para la planificación, cambio o implementación de los sistemas de manejo de residuos en las ciudades.

Keywords

Integrated solid waste; management; generation rate; quality; stakeholder; influential factor; developing countries.

Abstract

Solid waste management is a challenge for the cities' authorities in developing countries mainly due to the increasing generation of waste, the burden posed on the municipal budget as a result of the high costs associated to its management, the lack of understanding over a diversity of factors that affect the different stages of waste management and linkages necessary to enable the entire handling system functioning. An analysis of literature on the work done and reported mainly in publications from 2005 to 2011, related to waste management in developing countries, showed that few articles give quantitative information. The analysis was conducted in two of the major scientific journals, *Waste Management Journal* and *Waste Management and Research*. The objective of this research was to determine the stakeholders' action/behavior that have a role in the waste management process and to analyze influential factors on the system, in more than thirty urban areas in 22 developing countries in 4 continents. A combination of methods was used in this study in order to assess the stakeholders and the factors influencing the performance

of waste management in the cities. Data was collected from scientific literature, existing data bases, observations made during visits to urban areas, structured interviews with relevant professionals, exercises provided to participants in workshops and a questionnaire applied to stakeholders. Descriptive and inferential statistic methods were used to draw conclusions. The outcomes of the research are a comprehensive list of stakeholders that are relevant in the waste management systems and a set of factors that reveal the most important causes for the systems' failure. The information provided is very useful when planning, changing or implementing waste management systems in cities.

Introducción

Los niveles crecientes de población, la economía en auge, la rápida urbanización y la mejora de los estándares de vida comunitaria han acelerado mucho la tasa de generación de residuos sólidos municipales en los países en desarrollo (Minghua et al., 2009). Las municipalidades, que generalmente son las entidades responsables de la gestión de residuos en las ciudades, tienen el desafío de ofrecer un sistema efectivo y eficiente a los habitantes. Sin embargo, a menudo enfrentan problemas que superan su capacidad para resolverlos (Sujauddin et al., 2008), principalmente debido a la falta de organización, recursos financieros, y la complejidad y multidimensionalidad del sistema (Burntley, 2007).

En los últimos años, se ha emprendido un gran número de estudios de investigación para determinar los factores influyentes que afectan los sistemas de manejo de residuos en las ciudades de los países en desarrollo. Una revisión de las publicaciones de dos de las principales revistas científicas relacionadas con el manejo de residuos, *Waste Management Journal* y *Waste Management and Research*, entre los años 2005 y 2011, indicó que 37 brindaban información relacionada con factores que afectan el sistema. De manera sorprendente, pocas ofrecían información cuantitativa.

El objetivo de esta investigación fue determinar las acciones y el comportamiento de los actores sociales que juegan un papel en el proceso de manejo de residuos y analizar los factores que influyen en el sistema, en más de 30 áreas urbanas de 22 países en desarrollo de tres continentes.

Marco teórico

El modelo de gestión integrada de residuos sólidos (GIRS) permite estudios de residuos de los sistemas complejos y multidimensionales de manera integral. El modelo fue creado por profesionales en ambiente y desarrollo urbano de WASTE (WASTE, 2004), los socios u organizaciones que trabajan en este tema en países en desarrollo a mediados de los años 80 y desarrollado aún más por el Grupo de Trabajo Colaborativo (CWG) sobre manejo de residuos a mediados de los años 90 (Anschütz et al., 2004).

El GIRS reconoce la importancia de tres dimensiones al analizar, desarrollar o cambiar un sistema de gestión de residuos. Las dimensiones son: los actores sociales involucrados que tienen un interés en el manejo de residuos, los elementos o las etapas del movimiento o flujo de materiales desde los puntos de generación hasta el tratamiento y la disposición final y los aspectos o "lentes" a través de los cuales se analiza el sistema (Müller et al., 2002; Müller y Scheinberg, 2002; Zurbrügg et al., 2005; Zuilen, 2006; Consorcio ISSOWAMA, 2009; Wilson et al., 2009; Scheinberg et al., 2010a, 2011).

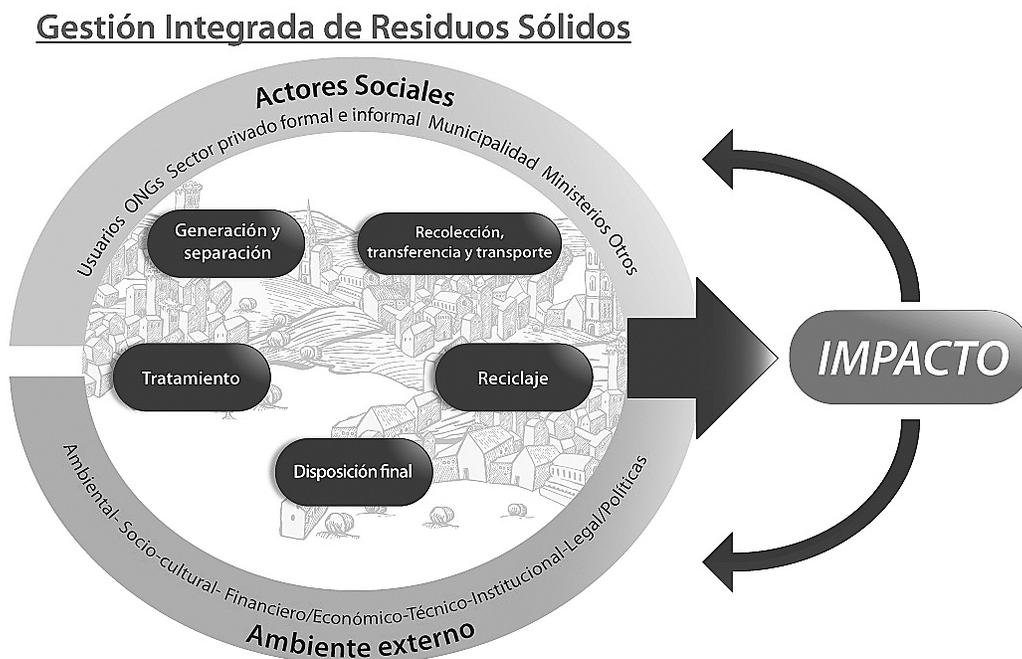


Figura 1. El modelo de gestión integrada de residuos sólidos (GIRS) (WASTE, 2004, adaptado de Consorcio ISSOWAMA, 2009).

Este trabajo se plantea dentro de un modelo adaptado del GIRS (figura 1). Se enfoca especialmente en investigar las acciones y comportamiento de los actores sociales involucrados y los factores que influyen sobre los elementos del sistema de gestión de residuos de la ciudad y los vínculos técnicos pero también ambientales, socioculturales, legales, institucionales y económicos presentes que permiten su funcionamiento.

Para facilitar el análisis de la información, los elementos existentes de los sistemas de gestión de residuos se describen en términos de generación y separación, recolección, transferencia y transporte, tratamiento, reciclaje y disposición final de los residuos.

Revisión de la literatura

En el pasado, la investigación ha identificado los actores sociales involucrados o la gente u organizaciones que podrían tener un interés en la gestión adecuada de residuos. Los actores sociales involucrados reportados son: gobierno nacional y local (Shekdar, 2009), contratistas privados, ministerios de Salud, Ambiente, Economía y Finanzas (Geng et al., 2009) y compañías recicladoras (Tai et al., 2011).

Algunos académicos han identificado factores que afectan los elementos de los sistemas de gestión de residuos. Según Sujauddin y colaboradores (2008), la generación de residuos está influenciada por el tamaño de la familia, su nivel de educación y el ingreso mensual. Las actitudes de los hogares relacionadas con la separación de residuos se ven afectadas por el apoyo y la inversión de compañías de bienes raíces, el involucramiento de comités residenciales comunitarios para la participación pública (Zhuang et al., 2008) y la tarifa para el servicio de recolección con base en el volumen o el peso de los residuos (Scheinberg, 2011). El género, la influencia de los pares, el tamaño del terreno, la ubicación del hogar y la membresía en una

organización ambiental explican el uso de los residuos domésticos y el comportamiento de separación (Ekere et al., 2009).

Se ha reportado que las prácticas de recolección, transferencia y transporte son afectadas por los sistemas inapropiados de recolección de residuos, la mala planificación de rutas, la falta de información sobre los horarios de recolección (Hazra y Goel, 2009), infraestructura insuficiente (Moghadam et al., 2009), calles en malas condiciones y la cantidad de vehículos utilizados en la recolección (Henry et al., 2006). Sharholy et al. (2008) mencionaron la organización del sector informal y la promoción de microempresas como maneras efectivas y asequibles de ampliar los servicios de recolección.

La falta de conocimiento de los sistemas de tratamiento por parte de las autoridades se reporta como un factor que afecta este aspecto específico del proceso (Chung y Lo, 2008).

Tadesse y colaboradores (2008) analizaron los factores que influyen en la toma de decisiones sobre la disposición de los residuos domésticos. Los resultados mostraron que la presencia de sitios para la disposición final afecta de manera significativa la elección que se haga al respecto. El suministro inadecuado de contenedores y las distancias más largas hasta ellos incrementan la probabilidad del vertido de residuos en áreas abiertas y a lo largo de los caminos en relación con el uso de contenedores comunales. Pokhrel y Viraraghavan (2005) mencionan los recursos financieros insuficientes y la ausencia de legislación como factores que limitan la disposición segura de residuos en rellenos bien equipados.

En relación con los costos de disposición final, Scheinberg (2011), analizando datos de "Gestión de residuos sólidos en las ciudades del mundo" (Scheinberg et al., 2010b), señala que existen indicaciones de que las altas tasas de recuperación están asociadas con los costos a pagar en los sitios de disposición final. Un alto precio por la eliminación o disposición tiene el efecto de más recuperación de residuos, lo que va a generar las cadenas de valor o la reutilización beneficiosa de éstos.

En relación con el reciclaje, González-Torre y Adenso-Díaz (2005) indican que las influencias sociales y los factores altruistas y normativos son algunas de las razones para que ciertas comunidades desarrollen fuertes hábitos de reciclaje. Los autores también demostraron que las personas que acuden con frecuencia a los contenedores para disponer de residuos ordinarios tienen mayores probabilidades de reciclar algún producto en casa, y en la mayoría de los casos, conforme disminuye la distancia hasta los contenedores de reciclaje, aumenta el número de las fracciones que los ciudadanos reciclan y recogen en el hogar. Minghua y colaboradores (2009) afirman que para aumentar las tasas de reciclaje, el gobierno debería promover los mercados de materiales reciclados y aumentar el profesionalismo de las compañías recicladoras. Otros académicos mencionan factores como el apoyo financiero para proyectos de reciclaje e infraestructuras (Nissim et al., 2005), compañías recicladoras en el campo (Henry et al., 2006), puntos de entrega y centros de comercialización (Matete y Trois, 2008) y la organización del sector informal (Sharholy et al., 2008).

La gestión de residuos también es afectada por los aspectos o factores externos que facilitan el funcionamiento del sistema. Estos son técnicos, ambientales, financieros, socioculturales, institucionales y legales.

La literatura sugiere que los factores técnicos que influyen en el sistema están relacionados con la falta de destrezas técnicas entre el personal de las municipalidades y autoridades gubernamentales (Hazra y Goel, 2009), infraestructura deficiente (Moghadam et al., 2009), carreteras y vehículos en mal estado (Henry et al., 2006) e insuficientes tecnologías y datos confiables (Mrayyan y Hamdi, 2006).

Matete y Trois (2008) y Asase y colaboradores (2009), respectivamente, sugieren que los factores que afectan el aspecto ambiental de la gestión de residuos sólidos en los países en desarrollo son la falta de sistemas de control ambiental y la evaluación de los impactos reales. Ekere y colaboradores (2009) proponen que para tener mejores sistemas es necesario el involucramiento de la población en organizaciones ambientales activas.

Las municipalidades han fracasado en la gestión de los residuos sólidos debido a factores financieros. El enorme gasto necesario para brindar el servicio (Sharholy et al., 2007), la ausencia de apoyo financiero, los recursos limitados, los usuarios que no están dispuestos a pagar por el servicio (Sujauddin et al., 2008) y la falta de un uso apropiado de los instrumentos económicos han impedido la entrega de servicios apropiados de gestión de residuos. Sharholy et al. (2008) indicaron que el involucramiento del sector privado es un factor que podría mejorar el desempeño del sistema.

Se considera generalmente que la gestión de residuos es deber y responsabilidad únicas de las autoridades locales, y que no se espera que el público contribuya (Vidanaarachchi et al., 2006). La eficiencia operativa de la gestión de residuos sólidos depende de la participación activa tanto de la municipalidad como de los ciudadanos, por lo tanto, los aspectos socioculturales mencionados por algunos académicos incluyen a las personas que participan en la toma de decisiones (Sharholy et al., 2008), la sensibilización de la comunidad y la apatía de la sociedad a la hora de contribuir a las soluciones (Moghadam et al., 2009).

A menudo se observan deficiencias en la gestión de las municipalidades. Algunos investigadores que han estudiado los factores institucionales que afectan el sistema han llegado a la conclusión de que las autoridades locales de gestión de residuos carecen de capacidad organizacional (liderazgo) y conocimiento profesional. Además, señalaron que la información disponible es muy escasa desde el dominio público (Chung y Lo, 2008). La información extremadamente limitada no está completa o se encuentra dispersa en varias agencias involucradas, por lo tanto, es extremadamente difícil percibir mejor el complejo problema de la gestión municipal de los residuos (Seng et al., 2010).

Los trabajadores municipales que trabajan con residuos se asocian con un estatus social bajo (Vidanaarachchi et al., 2006), situación que resulta en poca motivación de su parte. Los políticos asignan baja prioridad a los residuos sólidos en comparación con otras actividades municipales (Moghadam et al., 2009), lo cual resulta en que las municipalidades cuenten con poco personal que posea capacitación y destrezas en el tema (Sharholy et al., 2008). Los factores positivos mencionados que mejoran el sistema son el apoyo de las autoridades municipales (Zurbrügg et al., 2005) y los planes estratégicos para la gestión de residuos que permitan monitorearlo y evaluarlo anualmente (Asase et al., 2009).

Los investigadores han documentado cómo un marco legal adecuado contribuye positivamente al desarrollo del sistema de gestión integrada de residuos (Asase et al., 2009), mientras que la ausencia de políticas satisfactorias (Mrayyan y Hamdi, 2006) y las débiles regulaciones son perjudiciales para él (Seng et al., 2010).

Metodología de la investigación

La revisión de la literatura ofreció un panorama general de los actores sociales involucrados reportados y los factores que afectan los sistemas de gestión de residuos. Los datos sobre los indicadores de desempeño del país se recogieron de bases de datos. Estas fueron de: salud pública (mortalidad perinatal, mortalidad adulta, expectativa de vida al nacer y expectativa de una vida saludable al nacer) (WHO, 2010a, 2010b, 2010c, 2010d; USEPA, 2010), economía (Producto Interno Bruto/cápita/año) (WB, 2010) y ambiente (huella ecológica/cápita) (Red de

la Huella Global, 2010), emisión de CO₂/cápita (UN, 2007). Además, se seleccionaron los siguientes parámetros de caracterización del país: personas/km², porcentaje de población urbana (CIA, 2010).

Además, se recogió información de más de 30 áreas urbanas visitadas, en algunos casos en más de una ocasión, en 22 países en desarrollo de tres continentes (cuadro 1). La recolección de datos ha sido apoyada por diferentes contribuyentes en esas ciudades durante las visitas del primer autor en el período comprendido entre 1985 y 2011.

Asimismo, la información se recogió por medio de ejercicios suministrados a los participantes durante talleres, incluyendo preguntas sobre los actores sociales involucrados y el estado del sistema de gestión de residuos sólidos en la ciudad en relación con los elementos, los aspectos y los problemas asociados con ellos. Las prácticas de gestión de residuos fueron seguidas durante visitas a los hogares, hospitales, oficinas y escuelas, sitios de construcción, centros de salud, áreas agrícolas y comerciales. Las siguientes características se anotaron: los sistemas de recolección y transporte, procedimientos de tratamiento de residuos, identificación de materiales para reutilizar y reciclar e instalaciones de disposición final. Los hallazgos se presentaron, analizaron y validaron con los actores sociales involucrados pertinentes de las ciudades visitadas.

Los parámetros encontrados en las visitas del primer autor a las ciudades permitieron crear un cuestionario (Apéndice A) que se ha utilizado para sistematizar la información recogida antes de 2009 y obtener nuevos datos sobre los sistemas de gestión de residuos en las ciudades hasta 2011. Incluye 122 preguntas, de las cuales 74 se miden según una escala de cinco puntos tipo Likert con anclajes que van desde nunca, ninguna, muy malo (1) hasta siempre, todos, excelente (5) (Matell y Jacoby, 1971), como valores de mediciones reales (5 preguntas), una escala binaria (Sí/No) (22 preguntas) (Ekere et al., 2009) e información general (21 preguntas). La revisión de la literatura desde 2005 hasta 2011 permitió validar algunos de los parámetros utilizados en la herramienta, así como introducir otros no reportados durante los años examinados.

De manera previa a la recolección de datos, el cuestionario fue evaluado para determinar la fácil comprensión y validez de los contenidos. Se le pidió a un grupo de actores sociales involucrados de 8 municipalidades (3 en Sudáfrica, 2 en Indonesia, 1 en Perú, 1 en Kenia, 1 en las Filipinas) en 5 países diferentes en 3 continentes, que criticaran el cuestionario en cuanto a ambigüedad, claridad y propiedad de los ítems utilizados para operacionalizar cada concepto. Se les pidió también a los encuestados evaluar la medida en la que los factores abordaban suficientemente los temas investigados. Con base en la retroalimentación recibida, el instrumento fue modificado y utilizado para recoger información sobre el estado de la gestión de residuos en las ciudades.

Debido a la cantidad de información, algunos parámetros han sido agrupados con base en los datos primarios.

- (i) La separación doméstica como sigue: sumando los puntos suministrados por el encuestado sobre las variables de cinco puntos sobre el alcance de la separación de residuos a nivel municipal: doméstico, comercial, plástico, papel, metal, vidrio, materiales orgánicos, baterías, eléctrico y electrónico.
- (ii) La sofisticación del sistema de recolección de residuos como sigue: 1= ninguna recolección organizada de residuos sólidos, 2= solo mano de obra (carretilla y/o carro manual y/o bicicleta tirada por persona y/o triciclo, 3= mano de obra y tracción animal, 4= transporte motorizado (motocicleta y/o tractor y/o camión) pero sin utilizar ningún contratista, y 5= transporte motorizado (motocicleta y/o tractor y/o camión) y utilizando

compactador.

- (iii) Campañas de sensibilización ambiental como sigue: un punto por cada respuesta afirmativa a las variables nominales: campañas de sensibilización ambiental apoyadas por la municipalidad, campañas de sensibilización de reutilización en la municipalidad, presencia de campañas ambientales en la ciudad, campañas de sensibilización pública para la gestión de residuos más los puntos suministrados por el encuestado sobre las variables de cinco puntos, campañas de reducción en escuelas y campañas de sensibilización de reciclaje.
- (iv) Eficiencia de la recolección: un punto por cada respuesta afirmativa a la variable nominal: Sistema de recolección estructurado más los puntos suministrados por el encuestado sobre las variables de cinco puntos: cantidad e idoneidad del equipo para la recolección de residuos, eficiencia en el sistema de recolección y disponibilidad de instalaciones de transporte para la recolección de residuos.
- (v) Legislación: un punto por cada respuesta afirmativa a la variable nominal: ¿Existe legislación ambiental? Más los puntos suministrados por el encuestado sobre las variables de cinco puntos: idoneidad de los marcos políticos y legales para la gestión de residuos sólidos, la aplicación de la ley en la práctica y la clara implementación de las leyes del país por parte de la municipalidad.
- (vi) Conocimiento local disponible como sigue: un punto por cada respuesta afirmativa a la variable nominal: presencia de personal calificado en la municipalidad, presencia de profesionales en el campo de la gestión de residuos trabajando para la municipalidad y universidades que ofrecen educación terciaria en temas de gestión de residuos.

Los resultados fueron explorados inicialmente utilizando una prueba Kolmogorov-Smirnov, indicando que los datos no estaban distribuidos normalmente. Consecuentemente, se utilizó una prueba paramétrica no estándar en el subsiguiente análisis estadístico (Field, 2009). Las medidas de correlación del coeficiente de Spearman ayudaron a obtener las correlaciones entre los factores de la ciudad. Los valores se encuentran a niveles significativos de $p < 0.01^{**}$ (2 colas). Se realizó un análisis bivariado entre variables relacionadas con aspectos de tecnologías, educación ambiental, socioculturales, institucionales, financieros y legales. La información se analizó utilizando el Paquete Estadístico para Ciencias Sociales (SPSS, por sus siglas en inglés) Versión 17.0.

Se utilizó el Análisis de Componente Principal (PCA, por sus siglas en inglés) con rotación ortogonal (varimax), con el propósito de establecer los componentes o factores lineales que existen en algunos datos. Se utilizó la estadística Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) para evaluar la idoneidad del PCA para las variables iniciales que miden la idoneidad de la muestra. La prueba Bartlett de esfericidad se aplicó para examinar si los datos originales eran apropiados para el análisis de factores (Field, 2009).

Cuadro 1. Áreas urbanas visitadas, Producto Interno Bruto (PIB), tasa de generación de residuos (kg/cápita/día) y origen del residuo sólido: 1= domésticos; 2= oficinas, escuelas, 3= construcción, 4= centros de salud, 5= agricultura, 6= industria y 7= comercio.

Continente	País	PNB (US\$)	Año de estudio	Ciudad	Origen del residuo que llega al sitio de disposición final	Tasa de generación de residuos (kg/cápita/día)
África	Etiopia	344	2009	Addis Ababa	1,2,4,6,7	0.32
	Kenia	738	2009	Nakuru	1,2,3,4,5,6,7	0.50
	Malawi	326	2009	Lilongwe	1	0.50
	Sud-África	5786	2009	Pretoria	1,2,3,4,7	0.65
	Sud-África	5786	2009	Langeberg	1,3,4,5,6,7	0.65
	Sud-África	5786	2009	Emfuleni	1,3,6	0.60
	Tanzania	509	2010	Dar es Salam	1,2,4,5,6,7	0.50
	Zambia	985	2010	Lusaka	1,2,3,4,6,7	0.37
	Asia	Bangladesh	551	2007, 2008, 2009	Gazipur	1,4
Bután		1805	2010	Thimphu	1,2,3,7	0.54
China		3744	2010	Beijing	1,3,4,7	0.80
India		9232	2010	Doddaballapur	1,2,3,6,7	0.28
Indonesia		2349	2009, 2010	Banda Aceh	1,4	0.90
Indonesia		2349	2009, 2010	Ambon	1,4	0.90
Indonesia		2349	2010	Jogjakarta	1,2,5,7	0.90
Nepal		364	2007	Kathmandu	1,2,6,7	0.35
Paquistán		495	1995	Lahore	1,2,6,7	0.84
Filipinas		1995	2009	Quezon City	1,2,3,4,7	0.67
Sri Lanka		2068	2010	Balangoda	1,2,3,4,6,7	0.83
Sri Lanka		2068	2010	Hambantota	1,2,3,4,7	0.81
Tailandia		4043	2009, 2010	Bangkok	1,2,3,4,6,7	1.10
Turquía		8215	2010	Kutahya	1,2,4,6,7	0.60
Turquía		8215	2010	Bitlis	1,2,3,4,5,6,7	0.90
Turquía		8215	2010	Amasya	1,2,4,7	1,20
Centro y Sur América	Costa Rica	4084	1985, 1995	Cartago	1,2,3,4,5,7	0.7-0.8
	Costa Rica	6386	2011	San José	1, 2, 3, 4, 6, 7	1.10
	Costa Rica	3370	1991	Talamanca	1,7	0.30
	Costa Rica	4084	1992, 1995	Tárcoles	1,7	0.30-0.50
	Costa Rica	5529	2001	Tuis	1,7	0.30
	Ecuador	1771	1995	Píllaro	1,7	0.50
	Ecuador	1771	1995	El Carmen de los Colorados	1,7	0.50
	Nicaragua	1069	2008, 2009, 2010	Managua	1,2,3,4,5,6,7	0.48
	Nicaragua	1069	2009, 2010	Masaya	1,2,4,7	0.40
	Perú	4447	2008, 2009, 2010	Cañete	1,2,3,4,5,6,7	0.47
	Surinam	5888	2008, 2009	Paramaribo	1,7	0.47
Surinam	5888	2008	Asidonhopo	-*	0.28	

* Ausencia de sitio oficial de disposición

Resultados y discusión

Actores involucrados

Se identificaron los actores sociales involucrados en los sistemas de gestión de residuos durante los talleres. Los actores sociales involucrados principales “reconocidos” o formales incluyeron la autoridad local, algunos ministerios del gobierno central y contratistas privados que brindan servicios. Los participantes en los talleres reconocieron a los gobiernos nacionales y locales como los actores sociales involucrados más importantes que definen políticas y la oferta de sistemas de gestión de residuos sólidos, respectivamente. Los contratistas privados también son considerados actores sociales involucrados importantes, así como los usuarios del servicio tales como hogares, organizaciones civiles, el sector comercial e industrial. Se mencionaron menos las instituciones educativas y de investigación, los partidos políticos, los agricultores (incluyendo granjas avícolas y la industria pesquera), centros de salud, medios de comunicación, organizaciones donantes, cámaras de comercio e industria, compañías recicladoras, policía y líderes religiosos.

Los actores sociales involucrados “no reconocidos” o informales incluyen los recogedores de residuos que recolectan puerta a puerta, en la calle o en el sitio de disposición; los compradores itinerantes de residuos, los dueños de tiendas de chatarra y los barrenderos de las calles.

5.2 Generación y separación

La cantidad de generación de residuos sólidos está asociada mayormente con el estatus económico de una sociedad. Shekdar (2009) sugiere que la cantidad de generación de residuos sólidos es menor en países con un PIB menor. Sin embargo, esta relación no puede verse en los datos presentados en el Cuadro 1. Una posible explicación es que las tasas de generación de residuos se han recolectado de la información brindada por varias fuentes en las ciudades: municipalidades, ONG, universidades, centros de investigación o bien fueron recolectadas por el primer autor; mientras que el PIB es un indicador de la situación económica a nivel nacional.

El estudio investigó los factores que afectan la separación de residuos a nivel del hogar. Las correlaciones más significativas encontradas entre la separación en los hogares y los parámetros de la ciudad se presentan en el Cuadro 2. Los residuos de papel, plástico, vidrio, comida, metal, baterías y residuos eléctricos y electrónicos fueron las categorías utilizadas durante la encuesta como un concepto llamado “separación en los hogares”.

Estos hallazgos presentados en el Cuadro 2 revelan que a nivel municipal, el conocimiento limitado sobre tecnologías y buenas prácticas para la gestión de residuos, la falta de equipo para la recolección de materiales clasificados y la ausencia de tomadores de decisiones interesados en temas ambientales impide el desarrollo de programas de separación de residuos. Las campañas de sensibilización influyen en el comportamiento de los individuos para segregar los residuos, debido a su preocupación ambiental y la necesidad de participar en las soluciones. El sustento de mucha gente de escasos recursos depende de la recolección puerta a puerta de materiales reciclables, en las calles o en el sitio de disposición. Estos recicladores (buzos, basuriegos, pepenadores, cirujas) a menudo pagan una tarifa, por lo tanto, los hogares separan los residuos para obtener algunas monedas por ellos. Han aparecido compañías recicladoras en las ciudades debido al aumento de precios de estos materiales secundarios. La combinación de estos dos hechos pareciera haber fomentado más separación a nivel de los hogares. Por último, la separación mejora cuando los ciudadanos comparten con la municipalidad la responsabilidad de la toma de decisiones sobre el sistema de residuos de la ciudad.

El PCA realizado con los ocho factores correlacionados permitió encontrar tres dimensiones (cuadro 3). El PCA reveló que existen tres componentes muy importantes en relación con la separación de residuos:

Concientización. La eficiencia en la separación de residuos depende de la sensibilización de los ciudadanos y líderes municipales sobre los impactos de los sistemas de gestión de residuos en la ciudad.

Conocimiento. Los tomadores de decisiones en la municipalidad son propensos a crear programas de separación de residuos cuando están familiarizados con tecnologías nuevas y apropiadas, así como buenas prácticas para la gestión de estos materiales.

Equipo. La disponibilidad de equipo y maquinaria para gestionar y reciclar los residuos parecieran ser factores clave para promover la separación de residuos a nivel del hogar.

El proceso del factor de extracción demuestra que la sensibilización explica el 44,4% de la varianza total de las variables observadas, el conocimiento el 17,2% y el equipo el 11,0%. Los tres componentes juntos dan como resultado el 72,6% de la varianza inicial. La medida KMO verificó la idoneidad de la muestra para el análisis. $KMO = 0.72$, lo que está por encima del límite aceptable de 0,5 (Field, 2009). La prueba de esfericidad de Bartlett $\chi^2 (55) = 351.268$, $p < 0.001$ indicó que las correlaciones entre variables eran suficientemente grandes para el PCA.

Recolección, transferencia y transporte

El estudio demostró que las municipalidades recogen residuos de las áreas comerciales con frecuencias que varían entre 14 veces por semana (por ej., Amasya) a 1 vez por semana (por ej., Lilongwe). La recolección en el centro de la ciudad también varía desde 14 veces por semana (por ej., Ambon) a 0 vez por semana (por ej., Asidohopo). En las ciudades estudiadas los residuos sólidos generados se recogen en estaciones establecidas o puerta a puerta. Pocas ciudades tienen estaciones de transferencia: Ambon, Jogjakarta, Beijing, Bangkok, Dar es Salam, Emfuleni, Langeberg, Pretoria, Gazipur y Managua.

Cuadro 2. Correlación Spearman de los factores de separación en los hogares y la ciudad, **= $p < 0.01$ (2 colas)

Parámetro Separación	Parámetro ciudad							
	Equipo disponible	Campañas educativas	Compañías recicladoras	Recolección de reciclables por los recicladores ^a	Interés de los líderes en el ambiente	Conocimiento de la tecnología	Conocimiento buenas prácticas	Toma de decisiones participación ciudadana
Separación hogares (HH)	.46**	.55**	.32**	.47**	.40**	.46**	.53**	.50**

^a Recicladores (buzos, basuriegos, pepenadores, cirujas).

** $p < 0.01$ (2 colas)

La recolección puerta a puerta se realiza por medio de una variedad de sistemas. Estos son: carro "jalado" por persona (por ej., Katmandú, Beijing), tracción animal (por ej., Nicaragua, Lahore), carrito (por ej., Hambatota, Lusaka), tractor (por ej., Langeberg, Balangoda), camión (por ej., Kuthaya, Nakuru), compactador (por ej., Banda Aceh, San José), triciclo (por ej., Cañete, Gazipur), motocicleta (por ej., Quezon City, Ambon) y carretillas (por ej., Masaya, Jogjakarta).

Cuadro 3. Análisis del componente principal de la separación en los hogares y sus factores ciudadanos relacionados después de la rotación varimax con normalización Kaiser convergido en cinco iteraciones. Solo se incluyen componentes que explican por lo menos el 10% de la varianza total. Cargas de más de 0.50 se consideran relevantes; n = 50.

Componentes	Cargas	Varianza explicada (%)	Alfa de Cronbach
Componente 1: Conciencia		44.4	0.7
• Separación hogares	+0.79		
• Programas concientización	+0.64		
• Participación ciudadana en toma de decisiones	+0.78		
• Interés de los líderes en temas ambientales	+0.59		
Componente 2: Conocimiento		17.2	0.8
• Conocimiento municipalidad sobre gestión y buenas prácticas de residuos sólido	+0.69		
• Conocimiento municipalidad sobre tecnologías para la gestión de residuos	+0.75		
Componente 3: Equipamiento		11.0	0.6
• Equipo disponible para gestión de residuos	+0.57		
• Presencia de compañías recicladoras en la región	+0.74		

El cuadro 4 resume los resultados de una serie de correlaciones entre algunos factores de la ciudad y la recolección, transferencia y transporte de los residuos de los hogares. El tiempo de recolección de residuos según las necesidades de servicio de los usuarios tiene una relación significativa con la disponibilidad de facilidades de transporte de residuos y la calidad de la carretera. Cuando los líderes locales se interesan en los asuntos de la gestión de los residuos sólidos, asignan fondos adecuados para el equipo y la infraestructura. Como resultado, los actores sociales involucrados están dispuestos a pagar y también a participar en las soluciones para una mejora del servicio. Los proveedores de la recolección de residuos a menudo tienden a olvidar las necesidades de los usuarios del servicio. Por lo tanto, la cooperación y coordinación entre los usuarios y los proveedores del servicio son de gran importancia.

El análisis de los datos sugiere que mejorar la infraestructura, incluyendo los caminos, aumentar el equipo y los recursos humanos tienen un impacto positivo en la entrega del servicio. Pero estos representan una carga económica para las municipalidades. La recolección, transferencia y transporte de los residuos son servicios municipales importantes pero caros (Faccio et al., 2011). Generalmente, constituyen el 80-95% del presupuesto total de la gestión de residuos sólidos. Por lo tanto, conforman el componente clave para determinar la economía de todo el sistema de gestión de residuos (Alagoz y Kocasoy, 2008). El apoyo financiero del gobierno central pareciera ser una solución para la falta de recursos financieros.

Un PCA realizado con nueve factores correlacionados (cuadro 5) permitió encontrar dos dimensiones: apoyo e infraestructura.

Apoyo: El apoyo al sistema por parte del gobierno central, el gobierno local, los proveedores del servicio y los usuarios es un elemento clave para la eficiencia de la recolección, transferencia y transporte de los residuos sólidos.

Infraestructura: En general, las municipalidades son responsables de la infraestructura y el equipo necesarios para la recolección, transferencia y transporte de los residuos. Su mejora afecta positivamente el desempeño del sistema.

El proceso del factor extracción demuestra que el apoyo explica el 45,8% de la varianza total de las variables observadas y la infraestructura el 15,5%. Los dos componentes juntos dan como resultado el 61,3% de la varianza inicial. La medida KMO verificó la idoneidad de la muestra para el análisis, $KMO = 0.76$. La prueba de esfericidad de Bartlett $\chi^2(55) = 351.268$, $p < 0.001$ indicó que las correlaciones entre variables eran suficientemente grandes para el PCA.

Tratamiento

Esta investigación encontró que 14 de las ciudades investigadas no tienen prácticas de compostaje, mientras que las otras 21 fabrican, hasta cierto punto, mejoradores de suelos (compost) con residuos orgánicos, ya sea a nivel de los hogares o por medio del sector privado o la municipalidad. En relación con la quema doméstica de residuos, se encontró que 22 ciudades reportan la quema de residuos a cielo abierto a nivel de los hogares.

El cuadro 6 muestra las relaciones entre el nivel de compostaje, la quema doméstica y los residuos tratados antes de disponer de ellos o eliminarlos con algunos parámetros de la ciudad.

Los resultados sugieren que el nivel de compostaje se correlaciona de manera positiva con la quema doméstica. Los sistemas de recolección de residuos indebidos, como resultado, entre otras cosas, de la falta de infraestructura o de las ineficiencias municipales, fomentan que la gente encuentre soluciones para sus residuos, tales como quema doméstica (materiales combustibles) y elaborar compostaje con la fracción putrescible.

En relación con el compostaje municipal, Shekdar (2009) argumenta que muchas instalaciones que realizan este proceso han sido cerradas, entre otras razones debido al monitoreo inadecuado de la calidad del compost que se produce y la incompatibilidad del diseño de la planta con las características de los residuos sólidos. Ambos factores están relacionados con el conocimiento local disponible y la infraestructura apropiada.

Cuadro 4. Correlación Spearman de recolección, transporte y transferencia y los factores de la ciudad, **= $p < 0.01$ (2 colas); *= $0.05 > p > 0.01$ (2 colas)

Parámetro	Ítem	Parámetro recolección, transporte y transferencia				Parámetro de la ciudad					
		Tiempo de recolección según las necesidades de los usuarios	Cantidad de equipo adecuado	Facilidades de transporte para rs ^a	Calidad del camino	Disposición de pagar	Disposición de participar en las soluciones	Prioridades para los rs ^a	Interés en los rs ^a	Coordinación y cooperación entre US y PS ^b	Apoyo del gobierno central
Parámetro de Recolección, transporte y transferencia	Tiempo de recolección según las necesidades de los usuarios	1.00	1.00	1.00	1.00						
	Cantidad de equipo apropiado	.29*	.67**	.47**							
	Facilidades de transporte para los rs ^a	.38**	.30**								
	Calidad del camino	.46**									
Parámetro de la ciudad	Disposición de pagar	.30*	.54**	.59**	.48**	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	Disposición de participar en las soluciones	.30*	.49**	.37**	.01	.33*					
	Prioridades para los residuos sólidos	.28*	.30**	.17	.18	.04	.26	.39**	.70**	.69**	
	Interés en los residuos sólidos	.48*	.70**	.48**	.36*	.42**	.52**	.18			
	Coordinación y cooperación entre US y PS ^b	.39*	.55**	.29*	.43**	.46**	.47**		.74**		
	Apoyo del gobierno central	.39*	.64**	.40**	.22	.46**	.39**	.15			

^a Residuos sólidos

^b Usuarios del servicio y proveedores del servicio.

Cuadro 5. Análisis del componente principal de los factores de recolección, transferencia y transporte y sus factores de ciudad relacionados después de la rotación varimax con normalización Kaiser convergida en cinco iteraciones. Solo se incluyen componentes que explican por lo menos el 10% de la varianza total. Las cargas de más de 0.50 se consideran pertinentes, y n = 50.

Componentes	Cargas	Varianza explicada (%)	Alfa de Cronbach
Componente 1: Apoyo		45.8	0.9
• Apoyo del gobierno central	+0.87		
• Interés de líderes municipales en temas de gestión de residuos sólidos	+0.82		
• Coordinación & cooperación entre los usuarios y los proveedores del servicio	+0.81		
• Actores sociales involucrados dispuestos a participar en las soluciones para un servicio mejorado	+0.66		
• Actores sociales involucrados dispuestos a pagar por servicios de residuos	+0.57		
Componente 2: Infraestructura		15.5	0.6
• Calidad de la carretera	+0.86		
• Cantidad de equipo apropiado	+0.83		
• Tiempo de recolección según las necesidades de los usuarios	+0.72		
• Prioridades de los tomadores de decisiones sobre temas de residuos sólidos	+0.63		

Disposición final

La mayoría de los sitios de disposición final en las ciudades estudiadas son botaderos a cielo abierto sin tratamiento de lixiviados ni protección en su base por medio de una geomembrana o capa con forro de arcilla, tampoco hay tratamiento de gases ni otras infraestructuras necesarias. Estos sitios reciben una diversidad de residuos, como se muestra en el cuadro 1. Las distancias a los sitios oficiales más importantes de disposición final varían entre 3 km en Hambantota hasta 50 km en Beijing desde los centros de la ciudad. Además de los sitios oficiales de disposición final, las ciudades sufren de la disposición ilegal de residuos en ríos, lagos, océanos, canales de drenaje, lotes baldíos y los lados de los caminos.

Este estudio investigó la práctica de cubrir los residuos en el sitio de disposición final. El cuadro 7 presenta los resultados que sugieren que los residuos se cubren en el sitio de disposición final si los líderes municipales o los tomadores de decisiones se interesan por el ambiente y los temas de gestión de residuos sólidos. El suministro de equipo e infraestructura es esencial para un sistema eficiente. La existencia de un marco legal con la implementación efectiva de las reglas facilita la planificación y operación del sistema. Este resultado está también de acuerdo con algunos de los hallazgos de Shekdar (2009).

Reciclaje

Los materiales de reciclaje incluidos en este estudio fueron: plástico, papel, metal, vidrio, orgánicos, baterías, eléctricos y electrónicos. El Cuadro 8 reporta los resultados del análisis de correlación entre la recolección de reciclables y algunos factores de la ciudad.

Los hallazgos sugieren que cuando los ciudadanos reciben información sobre los beneficios del reciclaje, cómo separar los residuos y participan en el diseño de los programas, es más probable que se integren a las campañas de reciclaje. También se encontró que cuando los líderes municipales se interesan y dan prioridad a los temas de residuos sólidos, apoyan estrategias que incluyen sistemas de recolección más eficiente, mejor infraestructura y tecnologías de reciclaje de bajo costo. El éxito de reciclar no depende solamente de los niveles de participación sino de la eficiencia del equipo y la infraestructura. Estos resultados concuerdan con los hallazgos de Manaf y colaboradores (2009), quienes reportan que los servicios de recolección irregulares, el equipo inadecuado que se utiliza para la recolección de residuos y las disposiciones legales inadecuadas son factores clave que desafían el escenario de reciclaje de residuos en Malasia hoy día.

Cuadro 6. Correlación Spearman del tratamiento de residuos y los factores de la ciudad, **= $p < 0.01$ (2 colas); * = $0.05 > p > 0.01$ (2 colas)

Parámetro		Parámetro de tratamiento			Parámetro de la ciudad		
Grupo	Ítem	Nivel de compostaje	Nivel de quema doméstica	Residuos tratados antes de disposición final	Idoneidad de la infraestructura	Interés de líderes en ambiente	Desempeño de la gestión municipal
Parámetro de tratamiento	Nivel de compostaje	1.00					
	Nivel de quema doméstica	.39**	1.00				
	Residuos tratados antes de disposición final	.24	-.11	1.00			
Parámetro de la ciudad	Idoneidad de la infraestructura	.33*	-.32*	.29*	1.00		
	Interés de líderes en ambiente	.20	-.28	.33*	.52**	1.00	
	Desempeño de la gestión municipal	.14	-.40**	.29*	.55**	.52**	1.00
	Conocimiento local	.35**	0-.06	-.01	-.10	-.09	-.16

Cuadro 7. Correlación Spearman de la disposición final y los factores de la ciudad, **= p <0.01 (2 colas)

Parámetro de disposición	Parámetro de la ciudad				
	Interés de los líderes en el ambiente	Cantidad e idoneidad del equipo	Infraestructura apropiada	Interés de los líderes en residuos sólidos	Marco legal
Residuos cubiertos en el sitio de disposición final	.67**	.63**	.56**	.67**	.52**

Cuadro 8. Correlación Spearman de la matriz de recolección de reciclables y los factores de la ciudad, **=p<0.01 (2 colas); *=0.05>p>0.01 (2 colas)

Parámetro de reciclaje	Parámetro de la ciudad						
	Marco legal	Campañas de concientización	Infraestructura adecuada	Recolección eficiente	Tecnologías de bajo costo disponibles	Participación ciudadana en la toma de decisiones	Interés en residuos sólidos
Recolección de reciclables	.46**	.55**	.32**	.47**	.40**	.46**	.53**

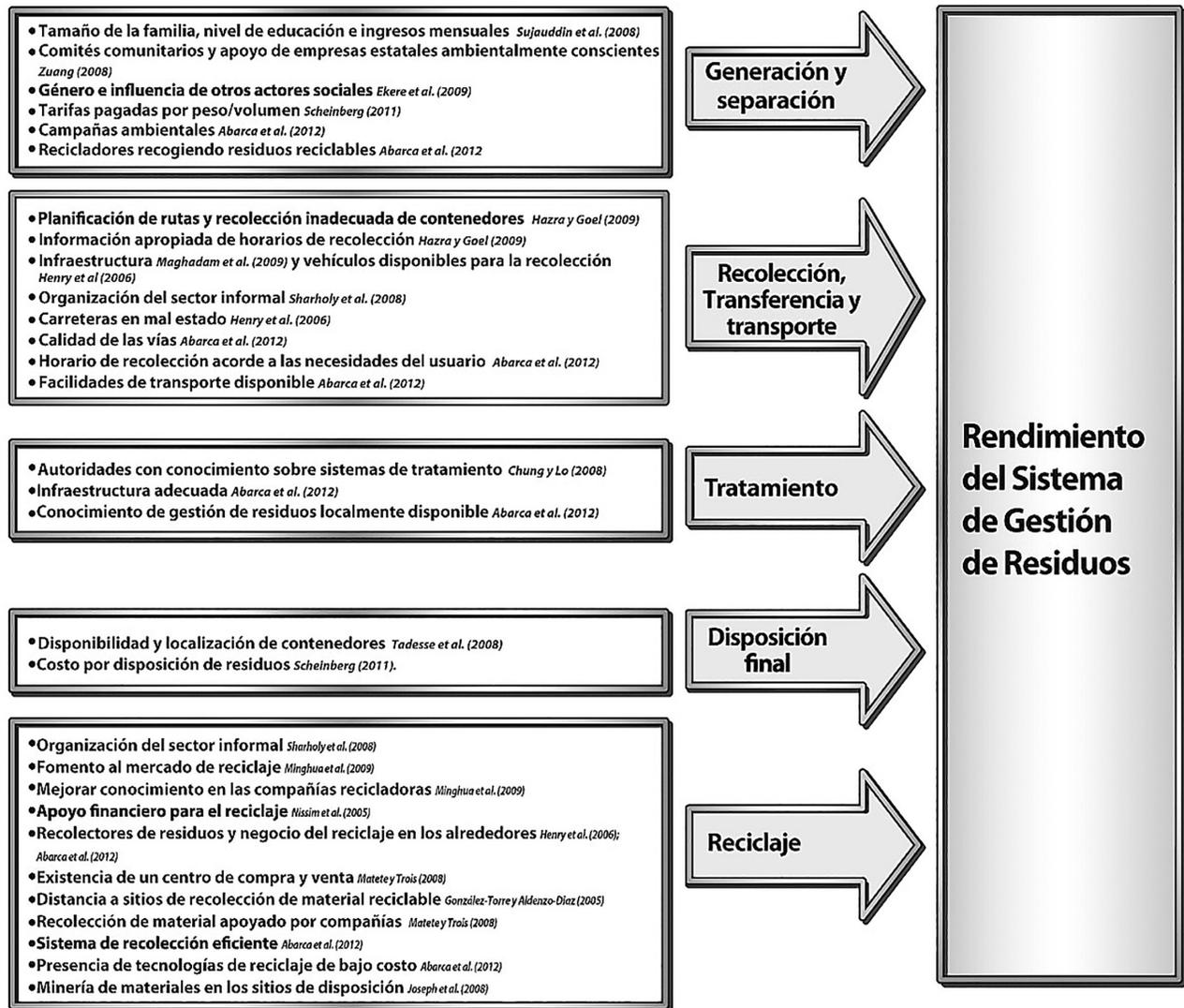


Figura 2. Factores que afectan los elementos de los sistemas de gestión de residuos

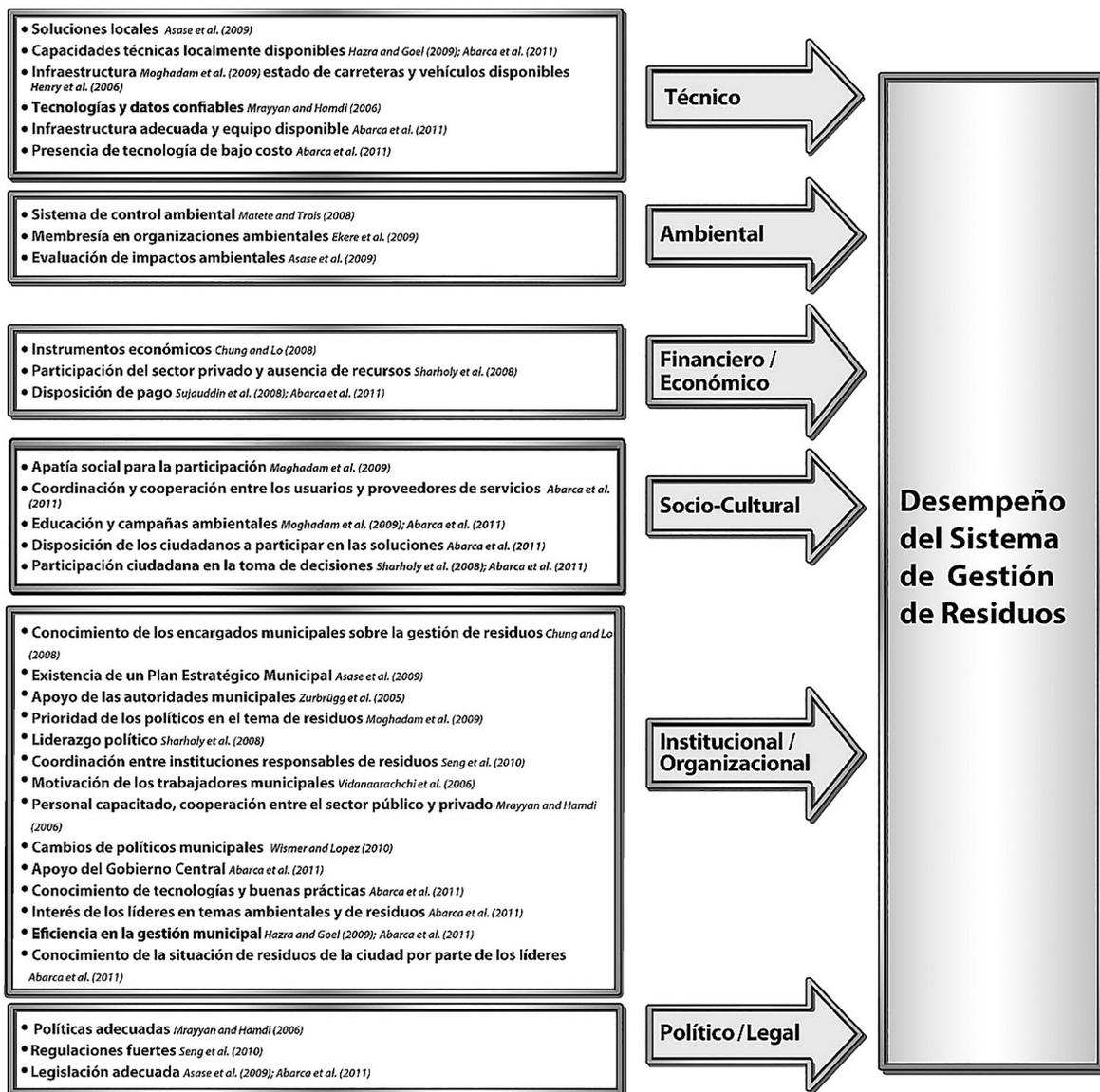


Figura 3. Factores que afectan los aspectos de los sistemas de gestión de residuos

Resumen de los factores que afectan el desempeño de los sistemas de gestión de residuos sólidos

Las figuras 2 y 3 resumen los factores reportados en la literatura y los hallazgos del presente estudio que afectan el desempeño de los sistemas de gestión de residuos sólidos. Algunos de ellos afectan los elementos de manera individual (figura 2), mientras que otros afectan todo el sistema de gestión de residuos (figura 3). Varios académicos han mencionado algunos factores en la literatura, así como el primer autor de este trabajo en diferentes artículos, pero solo el autor (o los autores) de un artículo o informe se menciona para simplificar las figuras.

Conclusiones

Las ciudades estudiadas son una mezcla de culturas y así es la variedad de sistemas de gestión de residuos sólidos. El resultado de esta investigación ofrece un análisis comprensivo

de los actores sociales involucrados y algunos factores clave que afectan esos sistemas. Los hallazgos clave se describen a continuación:

1. La gestión de residuos involucra un gran número de diferentes actores, con diferentes campos de interés. Todos juegan un papel importante en la conformación del sistema de una ciudad, pero a menudo esta es vista como una responsabilidad solo de las autoridades locales. En el mejor de los casos, los ciudadanos se consideran corresponsables junto con la municipalidad. El entendimiento detallado de quiénes son los actores sociales involucrados y de las responsabilidades que tienen en la estructura son pasos importantes para establecer un sistema eficiente y efectivo. El intercambio de comunicaciones entre los diferentes actores sociales involucrados es de alta importancia para obtener un sistema de gestión de residuos que funcione bien en las ciudades de los países en desarrollo.
2. La gestión de residuos sólidos es un tema de múltiples dimensiones. Las municipalidades generalmente buscan equipo como un camino para encontrar soluciones a la diversidad de problemas que enfrentan. Este estudio demuestra que un sistema efectivo no solo se basa en soluciones tecnológicas sino también ambientales, socioculturales, legales, institucionales y en vínculos económicos que deberían estar presentes para permitirle al sistema en general que funcione.
3. Los servicios de residuos sólidos tienen un costo como cualquier otro servicio que se ofrezca, pero usualmente los gastos no se recuperan. Se requieren recursos con el propósito de tener personal capacitado, equipo apropiado, la infraestructura correcta y el adecuado mantenimiento y operación. El apoyo financiero del gobierno central, el interés de los líderes municipales en temas de gestión de residuos, la participación de los usuarios del servicio y la debida administración de los fondos son esenciales para un sistema sostenible modernizado.
4. Es fundamental generar datos confiables y crear canales de información apropiados dentro y entre las municipalidades. Los tomadores de decisiones, los cuales son responsables de la planificación y la creación de políticas, necesitan estar bien informados sobre la situación de las ciudades para realizar cambios positivos, desarrollar estrategias de gestión de residuos integradas y adaptadas a las necesidades de los ciudadanos, tomando en consideración su capacidad de pago por los servicios.
5. Las universidades, los centros de investigación y los centros de excelencia juegan un papel muy importante en la preparación de profesionales y técnicos en los campos ambientales, incluyendo la gestión de residuos. Algunos países en desarrollo ya han visto los efectos positivos de invertir en educación e investigación, al tener ciudades más limpias, ciudadanos que asumen sus responsabilidades y un grupo de trabajadores de residuos sólidos con estatus más alto.
6. El cuestionario elaborado para estructurar y recoger información permitió desarrollar una fotografía instantánea o información de línea base sobre lo que está ocurriendo en la ciudad (Apéndice A). Es relativamente fácil de usar, se puede aplicar en entornos urbanos y rurales y puede ser implementado por personas con diferentes niveles de educación.
7. La información suministrada sobre los factores que afectan los sistemas de gestión de residuos sólidos es muy útil para cualquier individuo u organización interesada en la planificación, cambio o implementación de un sistema de gestión de residuos en una ciudad.

Agradecimientos

Agradecemos a todos los revisores por sus comentarios inspiradores y constructivos sobre el trabajo. A colegas, amigos, miembros de las municipalidades y organizaciones alrededor del mundo que han contribuido con valiosa información. Gracias a: P. Dorji (Bután), A.K.M. Shirajul Islam (Bangladesh), Xiaochong Shi (China); V. Rudín, D. Guevara, K. Abarca, J. Pérez (Costa Rica); A. Rosario (India), S. Syamsiah, M. Iyanto, J. Latuny, I. Mindelwill, R. Pattipawaey (Indonesia); P. Mwanzia (Kenia), T. Mnolo (Malawi), H. Delgado (Nicaragua), O. Espinoza (Perú), L. Cardenas (Filipinas), K. E. Masindi, D. Steyn (Sudáfrica), B. Chandrasekara, M. A. Nimal Premathilake (Sri Lanka), A. J. Shayo (Tanzania), C. Visvanathan (Tailandia), C. Carsiray, P. Celik, O. Faruk, H. Ozen, H. Ibrahim, N. Kiris (Turquía) y R. Lifuka (Zambia). La interpretación y las conclusiones expresadas son la absoluta responsabilidad del primer autor.

Esta investigación recibió financiamiento parcial del Instituto Tecnológico de Costa Rica, los asesores de WASTE en ambiente y desarrollo urbano de los Países Bajos y de Ingeniería de Rendimiento para el Programa de Ambientes Construidos de la Universidad Tecnológica de Eindhoven, Países Bajos.

Apéndice A. Características de las prácticas de gestión de residuos

Descripción	Respuestas
Fecha	
País de la investigación	
Mortalidad perinatal	
Mortalidad adulta	
Expectativa de vida al nacer	
Expectativa de vida saludable al nacer	
Producto Interno Bruto/cápita	
Huella ecológica/cápita	
Emisiones CO ₂ /cápita	
Personas/km ²	
% población urbana	
Provincia de la investigación	
Ciudad, municipio, pueblo de la investigación	
Número total de habitantes de la ciudad	
Nombre completo de la persona que brinda la información o el número de participantes	
Los actores sociales involucrados en la gestión de residuos sólidos presentes en la ciudad	
Tipo de residuos traídos al sitio oficial de disposición final de la comunidad	1= viviendas; 2= institucional; 3= construcción, 4= hospitalarios; 5= agricultura; 6= industria; 7= comercial
Comunidad urbana o rural	

Descripción	Respuestas
Índice de generación de residuos (kg/cápita/día) ciudad/país	
Presupuesto de la municipalidad para los servicios de gestión de residuos por año	
¿Hasta qué punto se da la separación de residuos en las casas?	1 = ninguno; 2 = algo; 3 = la mitad; 4 = la mayoría; 5 = todos
¿Hasta qué punto se da la separación de residuos en el comercio?	1 = ninguno; 2 = algo; 3 = la mitad; 4 = la mayoría; 5 = todos
¿Hasta qué punto se da la separación de plástico a nivel municipal?	1 = ninguno; 2 = algo; 3 = la mitad; 4 = la mayoría; 5 = todos
¿Hasta qué punto se da la separación de papel a nivel municipal?	1 = ninguno; 2 = algo; 3 = la mitad; 4 = la mayoría; 5 = todos
¿Hasta qué punto se da la separación de metal a nivel municipal?	1 = ninguno; 2 = algo; 3 = la mitad; 4 = la mayoría; 5 = todos
¿Hasta qué punto se da la separación de vidrio a nivel municipal?	1 = ninguno; 2 = algo; 3 = la mitad; 4 = la mayoría; 5 = todos
¿Hasta qué punto se da la separación de residuos orgánicos a nivel municipal?	1 = ninguno; 2 = algo; 3 = la mitad; 4 = la mayoría; 5 = todos
¿Hasta qué punto se da la separación de baterías a nivel municipal?	1 = ninguno; 2 = algo; 3 = la mitad; 4 = la mayoría; 5 = todos
¿Hasta qué punto se da la separación de residuos hospitalarios en los centros de salud?	1 = ninguno; 2 = algo; 3 = la mitad; 4 = la mayoría; 5 = todos
¿Hasta qué punto se da la separación de residuos eléctricos y electrónicos a nivel municipal?	1 = ninguno; 2 = algo; 3 = la mitad; 4 = la mayoría; 5 = todos
¿Hasta qué punto hay residuos dispersos en la ciudad?	1 = ninguno; 2 = algo; 3 = la mitad; 4 = la mayoría; 5 = todos
La recolección de residuos se hace mediante: (puede escribir más de uno)	1 = municipalidad; 2 = sector privado; 3 = recolectores informales; 4 = niños; 5 = alianza público-privada; 6 = punto de transferencia (estación); 7 = otro
¿Con qué frecuencia se recolecta en los sitios comerciales? Veces por semana	
¿Con qué frecuencia se recolecta en el centro de la ciudad? Veces por semana	
¿Con qué frecuencia se recolecta en las zonas rurales? Veces por semana	
¿Qué tipo de vehículo(s) se utiliza(n) para recolectar los residuos? (Puede escribir más de uno)	1 = carro tirado por una persona; 2 = carrito; 3 = camión; 4 = tractor; 5 = compactador; 6 = animal; 7 = triciclo; 8 = motocicleta; 9 = carrito de mano; 10 = otro
Precio o tarifa por el servicio de recolección (escríbalo en su propia moneda(año)	
Horario de recolección adecuado a las necesidades de los usuarios	1 = nunca; 2 = a veces; 3 = a menudo; 4 = muy seguido; 5 = siempre
Estación(es) de transferencia de residuos en la ciudad	1 = Sí; 2 = No

Descripción	Respuestas
Calles utilizadas como estaciones de transferencia	1 = Sí; 2 = No
Se cumple con el horario de recolección de residuos en la(s) estación(es) de transferencia	1 = nunca; 2 = a veces; 3 = a menudo; 4 = muy seguido; 5 = siempre
Residuos peligrosos se colocan en las calles	1 = nunca; 2 = a veces; 3 = a menudo; 4 = muy seguido; 5 = siempre
Residuos regados en el camino durante el transporte	1 = nunca; 2 = a veces; 3 = a menudo; 4 = muy seguido; 5 = siempre
Residuos tratados antes de la disposición final	1 = nunca; 2 = a veces; 3 = a menudo; 4 = muy seguido; 5 = siempre
Tratamiento de residuos peligrosos	1 = nunca; 2 = a veces; 3 = a menudo; 4 = muy seguido; 5 = siempre
Presencia de botaderos ilegales en la ciudad	1 = Sí; 2 = No
Presencia de un sitio de disposición final oficial	1 = Sí; 2 = No
Presencia de un sitio de disposición final bien diseñado	1 = Sí; 2 = No
Desempeño del relleno sanitario	1 = muy malo; 2 = malo; 3 = bueno; 4 = muy bueno; 5 = excelente; 6 = NA
Distancia hasta el sitio de disposición final (km)	
Residuos cubiertos en el (los) sitio(s) de disposición final ilegal(es)	1 = nunca; 2 = a veces; 3 = a menudo; 4 = muy seguido; 5 = siempre
Residuos cubiertos en el sitio de disposición final formal	1 = nunca; 2 = a veces; 3 = a menudo; 4 = muy seguido; 5 = siempre
Control del tratamiento de residuos hospitalarios y disposición final	1 = nunca; 2 = a veces; 3 = a menudo; 4 = muy seguido; 5 = siempre
Nivel de compostaje realizado por los hogares, el sector privado o la municipalidad	1 = Ninguno; 2 = algo; 3 = la mitad; 4 = la mayoría; 5 = todos
Compost producido por la municipalidad	1 = Sí; 2 = No
Calidad controlada del compost	1 = Sí; 2 = No
Mercado para el compost	1 = Sí; 2 = No
Práctica de producción de biogás con los residuos HH	1 = Sí; 2 = No
Nivel de quema doméstica de residuos a nivel de los hogares	1 = ninguno; 2 = algo; 3 = la mitad; 4 = la mayoría; 5 = todos
Práctica de uso de bolsas para compras reciclables	1 = nunca; 2 = a veces; 3 = a menudo; 4 = muy seguido; 5 = siempre
Residuos de restaurantes utilizados para alimentar animales	1 = nunca; 2 = a veces; 3 = a menudo; 4 = muy seguido; 5 = siempre
Papel reciclado dentro de la municipalidad	1 = nunca; 2 = a veces; 3 = a menudo; 4 = muy seguido; 5 = siempre
Botellas de vidrio recicladas dentro de la municipalidad	1 = nunca; 2 = a veces; 3 = a menudo; 4 = muy seguido; 5 = siempre
Chatarra metálica utilizada en la municipalidad	1 = nunca; 2 = a veces; 3 = a menudo; 4 = muy seguido; 5 = siempre
Bienes reciclables recogidos por recolectores informales	1 = nunca; 2 = a veces; 3 = a menudo; 4 = muy seguido; 5 = siempre

Descripción	Respuestas
Recolectores informales pagan una tarifa por los reciclables que recogen	1 = nunca; 2 = a veces; 3 = a menudo; 4 = muy seguido; 5 = siempre
Recolectores informales penalizados	1 = nunca; 2 = a veces; 3 = a menudo; 4 = muy seguido; 5 = siempre
Compañías que compran bienes reciclables en los alrededores de la ciudad	1 = Ninguna; 2 = pocas; 3 = algunas; 4 = bastantes; 5 muchas
Compañías recicladoras en los alrededores de la ciudad	1 = Ninguna; 2 = pocas; 3 = algunas; 4 = bastantes; 5 muchas
Presencia de estrategias de reducción de residuos en la ciudad	1 = Sí; 2 = No
ONG responsables de campañas de reducción de residuos	1 = nunca; 2 = a veces; 3 = a menudo; 4 = muy seguido; 5 = siempre
Campañas de reducción realizadas en las escuelas	1 = nunca; 2 = a veces; 3 = a menudo; 4 = muy seguido; 5 = siempre
Campañas de sensibilización sobre el reciclaje apoyadas por la municipalidad	1 = nunca; 2 = a veces; 3 = a menudo; 4 = muy seguido; 5 = siempre
Conocimiento de las autoridades municipales sobre la situación de los residuos en la ciudad	1 = ninguno; 2 = muy poco; 3 = poco; 4 = suficiente; 5 = extenso
La municipalidad tiene un plan de gestión de residuos sólidos	1 = Sí; 2 = No
La municipalidad tiene estándares para el sistema de gestión de residuos sólidos	1 = Sí; 2 = No
Monitoreo de estándares de gestión de residuos sólidos	1 = Sí; 2 = No; 3 = NA
Sistema estructurado de recolección de residuos sólidos disponible en la comunidad	1 = Sí; 2 = No
Eficiencia del sistema de recolección de residuos sólidos (en términos de lo que se ofrece de parte del proveedor y lo que reciben los usuarios)	1 = muy mala; 2 = mala; 3 = buena; 4 = muy buena; 5 = excelente
Instalaciones de transporte disponibles para la recolección de residuos sólidos	1 = ninguna; 2 = muy pocas; 3 = pocas; 4 = suficientes; 5 = extensas
Cantidad de equipo disponible para la gestión de residuos sólidos	1 = ninguno; 2 = muy poco; 3 = poco; 4 = suficiente; 5 = extenso
Idoneidad de la infraestructura para la gestión de residuos sólidos	1 = muy mala; 2 = mala; 3 = buena; 4 = muy buena; 5 = excelente
Calidad de la(s) carretera(s) para la recolección de residuos sólidos	1 = muy mala; 2 = mala; 3 = buena; 4 = muy buena; 5 = excelente
Residuos considerados por las autoridades municipales como un recurso	1 = Sí; 2 = No
Conocimiento de los trabajadores municipales sobre tecnologías para la gestión de residuos sólidos	1 = muy mala; 2 = mala; 3 = buena; 4 = muy buena; 5 = excelente
Conocimiento de los trabajadores municipales sobre buenas prácticas para la gestión de residuos sólidos	1 = muy mala; 2 = mala; 3 = buena; 4 = muy buena; 5 = excelente
Los ciudadanos participan en los procesos de toma de decisiones para la gestión de residuos sólidos	1 = ninguno; 2 = algo; 3 = la mitad; 4 = la mayoría; 5 = todos

Descripción	Respuestas
Las autoridades municipales perciben como alto el costo de las tecnologías alternativas para la gestión de residuos sólidos	1 = ninguno; 2 = algo; 3 = la mitad; 4 = la mayoría; 5 = todos
Tecnologías de bajo costo disponibles para la gestión de residuos sólidos	1 = ninguna; 2 = muy pocas; 3 = pocas; 4 = suficientes; 5 = extensas
Profesionales locales en el campo de la gestión de residuos sólidos que trabajen para la municipalidad	1 = ninguno; 2 = muy pocos; 3 = pocos; 4 = suficientes; 5 = extensos
La municipalidad cuenta con personal capacitado	1 = nunca; 2 = a veces; 3 = a menudo; 4 = muy seguido; 5 = siempre
Presencia de campañas de salud en la comunidad	1 = nunca; 2 = a veces; 3 = a menudo; 4 = muy seguido; 5 = siempre
Presencia de campañas de sensibilización ambiental en la ciudad	1 = Nunca; 2 = a veces; 3 = a menudo; 4 = muy seguido; 5 = siempre
El servicio de residuos sólidos se brinda gratuitamente	1 = Sí; 2 = No
Recuperación de los costos por los servicios de residuos sólidos	1 = ninguno; 2 = algo; 3 = la mitad; 4 = la mayoría; 5 = todos
La comunidad está dispuesta a pagar por la recolección de residuos	1 = ninguno; 2 = algo; 3 = la mitad; 4 = la mayoría; 5 = todos
Opciones para la implementación de tarifas según el ingreso de los generadores de residuos	1 = Sí; 2 = No
Sistema de costeo disponible en la municipalidad	1 = Sí; 2 = No
Recursos financieros limitados en los departamentos municipales	1 = nunca; 2 = a veces; 3 = a menudo; 4 = muy seguido; 5 = siempre
Dependencia de las finanzas que se originan de la cooperación para el desarrollo	1 = ninguna; 2 = algo; 3 = la mitad; 4 = la mayoría; 5 = todas
Apoyo financiero del gobierno nacional para la municipalidad	1 = nunca; 2 = a veces; 3 = a menudo; 4 = muy seguido; 5 = siempre
Apoyo financiero del gobierno nacional para otros temas diferentes de las finanzas	1 = nunca; 2 = a veces; 3 = a menudo; 4 = muy seguido; 5 = siempre
Presencia de instrumentos económicos (tarifas, subsidios, impuestos)	1 = Sí; 2 = No
El sector privado participa en los servicios de gestión de residuos	1 = Sí; 2 = No
El sector privado participa en los servicios de gestión de residuos distintos a la recolección	1 = Sí; 2 = No
Campañas de sensibilización pública disponibles sobre la gestión de residuos en la comunidad	1 = nunca; 2 = a veces; 3 = a menudo; 4 = muy seguido; 5 = siempre
Los actores sociales involucrados están dispuestos a participar en las soluciones de gestión de residuos	1 = ninguno; 2 = algo; 3 = la mitad; 4 = la mayoría; 5 = todos
La colaboración entre los actores sociales involucrados	1 = muy mala; 2 = mala; 3 = buena; 4 = muy buena; 5 = excelente
Presencia en la comunidad de plataformas públicas activas	1 = ninguna; 2 = pocas; 3 = algunas; 4 = bastantes; 5 = muchas
Interés de los líderes municipales en temas ambientales	1 = ninguno; 2 = poco; 3 = alguno; 4 = bastante; 5 = mucho

Descripción	Respuestas
Inconsistencias entre las diferentes agencias gubernamentales con respecto a la gestión de residuos	1 = ninguna; 2 = pocas; 3 = algunas; 4 = bastantes; 5 muchas
Su percepción de la organización de la municipalidad	1 = muy mala; 2 = mala; 3 = buena; 4 = muy buena; 5 = excelente
Disposición de los trabajadores municipales para cambiar su manera de trabajar	1 = ninguna; 2 = poca; 3 = alguna; 4 = bastante; 5 mucha
Las autoridades municipales tienen prioridades para otros temas urgentes diferentes de la gestión de residuos sólidos	1 = nunca; 2 = a veces; 3 = a menudo; 4 = muy seguido; 5 = siempre
Nivel de interés de las autoridades políticas sobre temas de gestión de residuos	1 = muy malo; 2 = malo; 3 = bueno; 4 = muy bueno; 5 = excelente
Nivel de motivación de los trabajadores municipales	1 = muy malo; 2 = malo; 3 = bueno; 4 = muy bueno; 5 = excelente
Nivel de corrupción dentro de la municipalidad	1 = ninguno; 2 = bajo; 3 = promedio; 4 = alto; 5 = muy alto
Nivel de coordinación y cooperación entre los usuarios del servicio y los proveedores del servicio	1 = muy malo; 2 = malo; 3 = bueno; 4 = muy bueno; 5 = excelente
Alcance hasta donde se comparten las metas y objetivos de los usuarios del servicio y los proveedores del servicio	1 = ninguno; 2 = algo; 3 = la mitad; 4 = la mayoría; 5 = todos
Idoneidad de la política y marco legal para la gestión de residuos sólidos	1 = muy mala; 2 = mala; 3 = buena; 4 = muy buena; 5 = excelente
Legislación ambiental vigente	1 = Sí; 2 = No
Práctica de hacer cumplir la ley	1 = muy mala; 2 = mala; 3 = buena; 4 = muy buena; 5 = excelente
Clara implementación de las leyes de los países por las municipalidades	1 = muy mala; 2 = mala; 3 = buena; 4 = muy buena; 5 = excelente

Bibliografía

- Alagoz, A. Z. & Kocasoy, G. (2008). Improvement and modification of the routing system for the health-care waste collection and transportation in Istanbul. *Journal of Waste Management*, 28, 1461-1471.
- Anschütz, J., Ijgosse, J. & Scheinberg, A. (2004). *Putting ISWM to Practice*. Gouda, the Netherlands: WASTE.
- Asase, M., Yanful, E. K., Mensah, M., Stanford, J. & Amponsah, S. (2009). Comparison of municipal solid waste management systems in Canada and Ghana: A case study of the cities of London, Ontario, and Kumasi, Ghana. *Journal of Waste Management*, 29, 2779-2786.
- Burntley, S. J. (2007). A review of municipal solid waste composition in the United Kingdom. *Journal of Waste Management*, 27(10), 1274-1285.
- Chung, S. & Lo, C. (2008). Local waste management constraints and waste administrators in China. *Journal of Waste Management*, 28, 272-281.
- CIA (Central Intelligence Agency) (2010). *The world factbook 2010*. Washington, D.C. Obtenido de <https://http://cia.gov/library/publications/the-world-factbook>
- Ekere, W., Mugisha, J. & Drake, L. (2009). Factors influencing waste separation and utilization among households in the Lake Victoria crescent, Uganda. *Journal of Waste Management* 29, 3047-3051.

- Faccio, M., Persona, A. & Zanin, G. (2011). Waste collection multi objective model with real time traceability data. *Journal of Waste Management*, 31, 2391-2405.
- Field, A. P. (2009). *Discovering statistics using SPSS*. 3 ed. London: Sage.
- Geng, Y., Zhu, Q., Doberstein, B. & Fujita, T. (2009). Implementing China's circular economy concept at the regional level: A review of progress in Dalian, China. *Journal of Waste Management* 29, 996-1002.
- Giusti, L. (2009). A review of waste management practices and their impact on human health. *Journal of Waste Management* 29, 2227-2239.
- Global Footprint Network. (2010). *Footprint Science: Data and results*. Oakland, California. Obtenido de <http://footprintnetwork.org/en/index.php.GFN.page.glossary>
- Gonzalez-Torre, P. L. & Adenso-Diaz, B. (2005). Influence of distance on the motivation and frequency of household recycling. *Journal of Waste Management* 25, 15-23.
- Hazra, T. & Goel, S. (2009). Solid waste management in Kolkata, India: Practices and challenges. *Journal of Waste Management*, 29, 470-478.
- Henry, R. K., Yongsheng, Z. & Jun, D. (2006). Municipal solid waste management challenges in developing countries – Kenyan case study. *Journal of Waste Management* 26, 92-100.
- ISSOWAMA Consortium. (2009). *Integrated Sustainable Solid Waste Management in Asia*. Seventh Framework Programme. European Commission.
- Manaf, L. A., Samah, M. A. A. & Zukki, N. I. M. (2009). Municipal solid waste management in Malaysia: Practices and challenges. *Journal of Waste Management* 29, 2902-2906.
- Matell, M. S. & Jacoby, J. (1971). Is there an optimal number of alternatives for Likert scale items? Reliability and validity. *Educational and Psychological Measurement* 31, 657-674.
- Matete, N. & Trois, C. (2008). Towards Zero Waste in emerging countries – A South African experience. *Journal of Waste Management*, 28, 1480-1492.
- Minghua, Z., Xiumin, F., Rovetta, A., Qichang, H., Vicentini, F., Bingkai, L., Giusti, A. & Yi, L. (2009). Municipal solid waste management in Pudong New Area, China. *Journal of Waste Management* 29, 1227-1233.
- Moghadam, M. R. A., Mokhtarani, N. & Mokhtarani, B. (2009). Municipal solid waste management in Rasht City, Iran. *Journal of Waste Management* 29, 485-489.
- Mrayyan, B. & Hamdi, M. R. (2006). Management approaches to integrated solid waste in industrialized zones in Jordan: A case of Zarqa City. *Journal of Waste Management* 26, 195-205.
- Müller, M. S., Iyer, A., Keita, M., Sacko, B. & Traore D. (2002). Different interpretations of community participation in Waste Management in Bamako and Bangalore: some methodological considerations. *Environment and Urbanization* 14, 241-258.
- Müller, M. S. & Scheinberg, A. (2002). Gender linked livelihoods from modernising the waste management recycling sector: a framework for analysis and decision making. *Gender and waste economy*. Vietnamese and international experiences. CIDA funded project.
- Nissim, I., Shohat, T. & Inbar, Y. (2005). From dumping to sanitary landfills – solid waste management in Israel. *Journal of Waste Management* 25, 323-327.
- Pokhrel, D. & Viraraghavan, T. (2005). Municipal solid waste management in Nepal: practices and challenges. *Journal of Waste Management* 25, 555-562.
- Scheinberg, A., Spies, S., Simpson, M. H. & Mol, A. P. J. (2010a). Assessing urban recycling in low-and-middle income countries: Building on modernised mixtures. *Habitat International*. En prensa.
- Scheinberg, A., Wilson, D. C. & Rodic, L. (2010b). *Solid waste management in the World's Cities*. UN-Habitat's Third Global Report on the State of Water and Sanitation in the World's Cities. Newcastle-upon-Tyne, UK: EarthScan.
- Scheinberg, A. (2011). *Value added: Modes of sustainable recycling in the modernisation of waste management systems*. Ph.D. Wageningen University, Netherlands.
- Seng, B., Kaneko, H., Hirayama, K. & Katayama-Hirayama, K. (2010). Municipal solid waste management in Phnom Penh, capital city of Cambodia. *Waste Management & Research* 29, 491-500.
- Sharholly, M., Ahmad, K., Vaishya, R. C. & Gupta, R. D. (2007). Municipal solid waste characteristics and management in Allahabad, India. *Journal of Waste Management* 27, 490-496.

- Sharholly, M., Ahmad, K., Mahmood, G. & Trivedi, R. C. (2008). Municipal solid waste management in Indian cities. A review. *Journal of Waste Management* 28, 459-467.
- Shekdar, A. (2009). Sustainable solid waste management: An integrated approach for Asian countries. *Journal of Waste Management* 29, 1438-1448.
- Sujauddin, M., Huda, M. S. & Rafiqul Hoque, A. T. M. (2008). Household solid waste characteristics and management in Chittagong, Bangladesh. *Journal of Waste Management* 28, 1688-1695.
- Tadesse, T., Ruijs, A. & Hagos, F. (2008). Household waste disposal in Mekelle city, Northern Ethiopia. *Journal of Waste Management* 28, 2003-2012.
- Tai, J., Zhang, W., Che, Y. & Feng, D. (2011). Municipal solid waste source-separated collection in China: A comparative analysis. *Journal of Waste Management* 31, 1673-1682.
- UN (United Nations). (2007). *UN data: A world of information*. Data CO₂ emissions. New York. Obtenido de <http://data.un.org/Data.aspx?q=CO2+emissions&d=MDG&f=seriesRowID%3a751>
- USEPA (USA Environmental Protection Agency). (2010). *Wastes - hazardous waste*. Washington, D.C. Obtenido de <http://www.epa.gov/osw/hazard>
- Vidanaarachchi, C. K., Yuen, S. T. S. & Pilapitiya, S. (2006). Municipal solid waste management in the Southern Province of Sri Lanka: Problems, issues and challenges. *Journal of Waste Management* 26, 920-930.
- WASTE. (2004). *Integrated Sustainable Waste Management*. Obtenido de <http://waste.nl>, click on ISWM under "Approaches".
- WB (World Bank). (2010). *Data Catalogue*. Washington, D.C. Obtenido de <http://data.worldbank.org/indicators>
- WHO (World Health Organisation). (2010a). *World Health Statistics. Indicator Compendium, Interim Report*. Obtenido de <http://www.who.int/healthinfo/statistics/indneonatalmortality.en>
- WHO (World Health Organisation). (2010b). *Health topics. Life expectancy*. Washington, D.C. Obtenido de http://www.who.int/topics/life_expectancy.en
- WHO (World Health Organisation). (2010c). *Health care waste management*. Washington, D.C. Obtenido de http://healthcarewaste.org/en/115_overview.html (revisado 01.10.10)
- WHO (World Health Organisation). (2010d). *Neonatal and perinatal mortality. Country, regional and country estimates*. Washington, D.C. Obtenido de http://whqlibdoc.who.int/publications/2006/9241563206_eng.pdf
- Wilson, D. C., Araba, A., Chinwah, K. & Cheeseman, C. R. (2009). Building recycling rates through the informal sector. *Journal of Waste Management* 29, 629-635.
- Zhuang, Y., Wu, S. W., Wang, Y. L., Wu, W. Z. & Chen, Y. X. (2008). Source separation of household waste: A case study in China. *Journal of Waste Management* 28, 2022-2030.
- Zuilen, L. F. (2006). *Planning of an integrated solid waste management system in Suriname: A case study in Greater Paramaribo with focus on households*. PhD Thesis, Ghent University, Belgium.
- Zurbrügg, C. Drescher, S., Rytz, I., Sinha, M. & Enayetullah, I. (2005). Decentralised composting in Bangladesh, a win-win situation for all stakeholders. *Resources, Conservation and Recycling* 43, 281-292.

Diagnóstico agroecológico de la microcuenca periurbana Río Platanitos, Guatemala

Solid waste management challenges for cities in developing countries

Miguel Ángel Morales-Cayax¹, Eddi Alejandro Vanegas-Chacón², Francisco Bautista-Zúñiga³

Fecha de recepción: 14 de agosto del 2014
Fecha de aprobación: 10 de octubre del 2014

Morales-Cayax, M; Vanegas-Chacón, E; Bautista-Zúñiga, F. Diagnóstico agroecológico de la microcuenca periurbana Río Platanitos, Guatemala. *Tecnología en Marcha*. Vol. 28, N° 2, Abril-Junio. Pág 169-178.

- 1 Estudiante DOCINADE, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Profesor, Ingeniero Agrónomo, MSc. Teléfono: (502) 57087326; Facultad de Agronomía, USAC. Guatemala. Correo electrónico: miguelm612@hotmail.com.
- 2 Profesor, Ingeniero Agrónomo, PhD. Teléfono: (502) 47686833, (502) 41133130; Facultad de Agronomía, USAC. Guatemala. Correo electrónico: vanegaseddi@yahoo.com.br.
- 3 Investigador, PhD. Teléfono: (443) 3223869; Centro de Investigación en Geografía Ambiental (CIGA), UNAM. México. Correo electrónico: leptosol@yahoo.com

Palabras clave

Ordenamiento ecológico territorial; disección vertical; geopedología; cobertura y uso del suelo; unidades de paisaje.

Resumen

El objetivo del presente estudio fue identificar las áreas geográficas de la microcuenca periurbana Río Platanitos, Guatemala, que por su condición, relevancia o importancia cultural requieren ser protegidas, conservadas o restauradas, utilizando para ello mapas interpretativos. La regionalización ecológica o ecoregionalización consiste en delimitar espacios geográficos relativamente homogéneos en función del medio físico y biológico, de tal manera que se pueda establecer una adecuada vinculación con el uso y apropiación del territorio por parte de la sociedad. La caracterización física se realizó sobre tres aspectos importantes: relieve, clima y suelos.

El mapa de las unidades morfométricas del relieve es la base y se obtuvo de forma semiautomatizada a partir de un modelo de elevación digital y un *shape* de curvas. El Mapa de Zonas Agroecológicas es producto del cruce del mapa de unidades geomorfopedológicas (relieve + suelos) con el mapa de climas. El Mapa Cobertura Vegetal y Uso del Suelo se elaboró a partir de imágenes de satélite, realizando una clasificación supervisada, por medio de firmas espectrales. El Mapa de Paisajes es el resultado del cruce del mapa de Zonas Agroecológicas con el Cobertura Vegetal y Uso del suelo.

Se observa que, por su extensión, los paisajes más importantes en la microcuenca del Río Platanitos son los siguientes:

- a. Planicie/Alfisoles/CB' con Urbanización 20,49%
- b. Montaña/Andisoles/BB'2 con Bosque mixto 17,23%
- c. Planicie/Alfisoles/CB' con Agricultura anual 8,66%
- d. Montaña/Andisoles/BB'2 con Agricultura permanente 8,13%

En la parte alta de la cuenca hay prevalencia de bosque mixto y agricultura permanente, mientras que en la parte media y baja se presenta mayor área de urbanización y agricultura anual.

Keywords

Ecological territorial management; vertical dissection; geomorphopedology; cover and land use; landscape units.

Abstract

The target was raised to identify areas for their condition, significance or cultural significance need to be protected, preserved or restored. By performing an agroecological zoning and landscape. The ecological or eco-regionalization consists of defining relatively homogeneous geographic areas based on the physical and biological environment, so as to establish appropriate links with the use and appropriation of land by the society. Terrain, climate and soils: physical characterization of three important aspects was performed.

Map of morphometric relief units and is based on a semi-automated obtained from a digital elevation model and shape of curves. Agro-Ecological Zones Map is the product of crossing geomorphopedology map units (relief + soils) with the map of climates. The map Vegetation Cover and Land Use: prepared from satellite imagery, performing a supervised classification by means of spectral signatures. The Landscape Map: Crossing the Agro-Ecological Zones map of the Vegetation Cover and Land Use.

It is noted that the most important landscapes by extension in the watershed are:

- a. Plain / Alfisols / CB ' with 20.49% Construction
- b. Mountain / Andisols / BB '2 with 17.23% Mixed Forest
- c. Plain / Alfisols / CB 'with 8.66% Annual Agriculture
- d. Mountain / Andisols / BB '2 with Permanent Agriculture 8.13%

In the upper part of the basin has prevalence of mixed forest and permanent agriculture; while in the lower part has a greater area of urbanization and agriculture annual.

Introducción

La microcuenca periurbana Río Platanitos es una subcuenca que drena al lago de Amatitlán, en Guatemala, y presenta, al igual que las demás cuencas periurbanas, dinámicas de urbanización y agricultura similares. Por lo tanto, es importante generar información integral del uso del suelo para utilizarla como instrumento en la gestión del territorio con miras a la sostenibilidad.

En este estudio se planteó el objetivo identificar las áreas que por su condición, relevancia o importancia cultural requieren ser protegidas, conservadas o restauradas, utilizando para ello una zonificación agroecológica y paisajística.

Se ha abordado el tema de la sostenibilidad y el medioambiente desde la perspectiva de los grandes paisajes, pero es necesario realizar estudios a una escala más local que permitan obtener resultados de aplicación inmediata (Palacio et al., 2004). El diagnóstico de los paisajes es un primer paso en el establecimiento de un modelo de ordenación y gestión de estos, lo cual hace indispensable evaluar su evolución ante el acelerado desarrollo socioeconómico (Gutiérrez & Gancedo, 2007). Profundizar en el diagnóstico de los recursos ambientales de un país, región o cuenca, así como en el análisis de su grado de degradación, es en la actualidad una labor de vital importancia (Delgado et al., 2011).

La regionalización ecológica o eco-regionalización consiste en delimitar espacios geográficos relativamente homogéneos en función del medio físico y biológico, de tal manera que se pueda establecer una adecuada vinculación con el uso y apropiación del territorio por parte de la sociedad, (Priego et al, 2010). La regionalización ecológica del territorio es necesaria para diseñar la evaluación del estado del ambiente y para la planificación del aprovechamiento de los recursos naturales a varias escalas, es decir, es un insumo clave en el manejo y gestión del territorio (Bautista & Mendoza, 2011).

El ordenamiento territorial, instrumento esencial de la organización espacial y base para alcanzar el desarrollo sustentable de un territorio, se fundamenta aquí en la aplicación de la concepción holística y sistémica de la geoeología (Salinas & Quintela, 2001).

En esta tarea, el uso de un SIG es de gran ayuda, ya que permite contar con una serie de elementos, tanto para el almacenamiento, procesamiento y actualización de la información de los componentes del medio físico, así como la confección de una base cartográfica única para

cada uno de ellos, lo que da la posibilidad -mediante el análisis espacial- de integrar toda la información para la conformación de un mapa de paisajes (Ramón & Salinas, 2013).

Materiales y métodos

Localización geográfica

La microcuenca Río Platanitos se localiza entre las coordenadas de 90° 32' y 90° 40' longitud oeste y 14° 28' y 14° 34' latitud norte; comprende 5,354.70 hectáreas (ha), o sea 53.54 km², constituyendo aproximadamente el 14,70% de la extensión total de la cuenca del Lago de Amatitlán. Presenta una altura máxima de 2,300 metros sobre el nivel del mar (msnm) en la parte más alta y en su punto más bajo (punto de aforo) 1,300 msnm.

Información geomorfológica

Para la obtención del mapa de unidades de relieve de manera semiautomatizada, apoyado en el *software* ArcGIS, versión 9.3, se utilizaron los criterios establecidos por Priego (2010) y se definió el siguiente procedimiento:

- a. Descargar el modelo de elevación digital (DEM), formato *raster* del siguiente sitio: gdem.ersdac.jpacesystems.or.jp, que permite la descarga de imágenes GDEM.
- b. Obtención de un *shape* de curvas a nivel, a partir del mismo raster georreferenciado. Cálculo de la densidad de curvas de nivel (km/km²), para obtener una cobertura *raster* con resolución de 100 m, con los valores continuos de densidad de curvas de nivel por km².
- c. Elaboración del mapa de la disección vertical del terreno: a partir del DEM, con resolución 100 m; se calculó la disección vertical, consistente en la búsqueda espacial de los datos de las alturas máxima y mínima por km², obteniéndose la diferencia altimétrica por km², y finalmente la reclasificación de datos, a partir de los datos continuos de la disección vertical.
- d. Obtención del mapa de las unidades morfométricas del relieve: La superposición o cruce de los mapas de la morfografía del terreno con el de disección vertical; y un análisis del comportamiento de la disección vertical sobre los contornos morfográficos.
- e. Las categorías superiores de los tipos de relieve que se considerarán en este trabajo son las montañas, lomeríos, rampas de piedemonte, valles y planicies.

Cuadro 1. Geformas presentes en la microcuenca Río Platanitos.

Unidad geomorfológica	Área en ha	Área en porcentaje
Altiplanicie	163,08	3,04
Montañas	1889,80	35,29
Piedemonte	492,93	9,21
Lomeríos	481,34	8,99
Planicies	2327,55	43,47

Información edafológica

El mapa de suelos se obtuvo a partir de la comparación del mapa de clasificación taxonómica de los suelos de la República de Guatemala escala 1:250,000 (MAGA, 2000) con el mapa de relieve obtenido en este estudio, y observando perfiles en el área.

Cuadro 2.Tipos de suelos presentes en la microcuenca Río Platanitos.

Suelos	Área en ha	Área en porcentaje
Andisoles	2023,33	37,79
Andisoles y Alfisoles	492,90	9,21
Alfisoles	2556,20	47,74
Mollisoles	282,30	5,27

Información climatológica

El mapa de climas se obtuvo de la comparación del mapa de climas de Guatemala del Instituto Geográfico Nacional (IGN) (2006), el mapa de relieve obtenido en este estudio, recorridos en el área observando vegetación y los datos de temperatura y lluvia.

Cuadro 3. Clasificación climática de la microcuenca Río Platanitos

Subtipo climático	Clasificación internacional	Área en ha	Área en porcentaje
BB'2	Húmedo templado	2023,32	37,79
BB'	Húmedo semicálido	775,23	14,48
CB'	Semiseco semicálido	2556,16	47,74

Información de cobertura vegetal y uso del suelo

La obtención del mapa de cobertura vegetal y uso del suelo de forma automatizada se hizo de la siguiente forma: se descargó la imagen satelital del sitio *web* glcf.umiacs.umd, que permite la descarga de imágenes de satélite para diferentes fechas. Se realizó una clasificación supervisada, a partir de un *shape* de puntos con información de campo tomada con GPS, creando de esta forma las firmas espectrales, con una clasificación y eliminación de valores pequeños (Cuevas, 2008).

Cuadro 4. Cobertura vegetal y usos del suelo en la microcuenca Río Platanitos.

Uso del suelo	Área ha	Porcentaje
Urbano	1399,38	26,13
Agricultura anual	1014,91	18,95
Agricultura permanente	1134,96	21,20
Pastizales	449,57	8,40
Bosque mixto	1355,88	25,32

Resultados y discusión

Mapa de Zonas Agroecológicas

El cruce de los mapas de geomorfología y suelos permitió obtener el mapa geomorfopedológico (relieve+suelos), donde se presentan siete unidades geomorfopedológicas que integran la información espacial de la geoforma y el tipo de suelo presente. Luego el cruce del mapa de unidades geomorfopedológicas con el mapa de climas permite obtener el mapa de zonas agroecológicas (relieve+suelos+clima).

Cuadro 5. Unidades agroecológicas de la microcuenca Río Platanitos.

Unidades agroecológicas	Área ha	Porcentaje
Piedemonte/Andisoles y Alfisoles/ Húmedo y semicálido	492,9	9,21
Altiplanicie/Andisoles/Húmedo y templado	163,1	3,05
Montaña/Andisoles/Húmedo y templado	1860,2	34,74
Lomeríos/Mollisoles/Húmedo y semicálido	252,8	4,72
Montaña/Mollisoles/Húmedo y semicálido	29,6	.055
Lomeríos/Alfisoles/Semiseco y semicálido	228,6	4,27
Planicies/Alfisoles/Semiseco y semicálido	2327,6	43,47

Por su extensión, las principales unidades agroecológicas en la microcuenca son las siguientes:

- Planicies/Alfisoles/Semiseco y semicálido, 43,47%
- Montaña/Andisoles/Húmedo y templado, 34,74%
- Piedemontes/Andisoles y Alfisoles/Húmedo y semicálido, 9,21%
- Lomeríos/Alfisoles/Semiseco y semicálido, 4,72%

Mapa de Paisajes

El cruce del mapa de zonas agroecológicas con el de cobertura vegetal y uso del suelo nos permitió obtener el mapa de unidades de paisajes, que integra aspectos de relieve, suelos, clima y uso actual del suelo (Dame, 2008). Unidades de paisaje = (relieve+suelo+clima) + CBVUS.

Cuadro 6. Unidades de paisaje de la microcuenca Río Platanitos.

Unidad Agroecológica	Cobertura y uso	Área en ha	Porcentaje
Piedemonte/AndAlf/BB´	Agricultura anual	91,82	1,72
Piedemonte/AndAlf/BB´	Pastizales	83,70	1,57
Piedemonte/AndAlf/BB´	Agricultura permanente	200,94	3,76
Piedemonte/AndAlf/BB´	Urbano	110,25	2,06
Piedemonte/AndAlf/BB´	Bosque mixto	5,29	0,10
Altiplanicie/And/BB´2	Agricultura anual	49,94	0,94
Altiplanicie/And/BB´2	Pastizales	20,33	0,38
Altiplanicie/And/BB´2	Agricultura permanente	35,01	0,66
Altiplanicie/And/BB´2	Urbano	45,54	0,85
Altiplanicie/And/BB´2	Bosque mixto	12,25	0,23
Montaña/And/BB´2	Agricultura anual	319,67	5,99
Montaña/And/BB´2	Pastizales	132,15	2,48
Montaña/And/BB´2	Agricultura permanente	433,80	8,13
Montaña/And/BB´2	Urbano	48,50	0,91
Montaña/And/BB´2	Bosque mixto	919,39	17,23
Lomeríos/Moll/BB´	Agricultura anual	58,55	1,10
Lomeríos/Moll/BB´	Pastizales	10,57	0,20
Lomeríos/Moll/BB´	Agricultura permanente	50,26	0,94
Lomeríos/Moll/BB´	Urbano	22,21	0,42
Lomeríos/Moll/BB´	Bosque mixto	107,50	2,01
Montaña/Moll/BB´	Agricultura anual	0,86	0,02
Montaña/Moll/BB´	Pastizales	0,01	0,00
Montaña/Moll/BB´	Agricultura permanente	1,20	0,02
Montaña/Moll/BB´	Urbano	0,16	0,00
Montaña/Moll/BB´	Bosque mixto	26,50	0,50
Lomeríos/Alf/CB´	Agricultura anual	27,20	0,51
Lomeríos/Alf/CB´	Pastizales	18,10	0,34
Lomeríos/Alf/CB´	Agricultura permanente	42,16	0,79
Lomeríos/Alf/CB´	Urbano	75,48	1,41
Lomeríos/Alf/CB´	Bosque mixto	63,78	1,20
Planicie/Alf/CB´	Agricultura anual	461,99	8,66
Planicie/Alf/CB´	Pastizales	183,69	3,44
Planicie/Alf/CB´	Agricultura permanente	369,72	6,93
Planicie/Alf/CB´	Urbano	1093,11	20,49
Planicie/Alf/CB´	Bosque mixto	214,30	4,02

Se observa que los paisajes más importantes por su extensión en la microcuenca son los siguientes:

- Planicie/Alf/CB´ con Urbanización 20,49%
- Montaña/And/BB´2 con Bosque mixto 17,23%
- Planicie/Alf/CB´ con Agricultura anual 8,66%
- Montaña/And/BB´2 con Agricultura permanente 8,13%
- Planicie/Alf/CB´ con Agricultura permanente 6,93%
- Montaña/And/BB´2 con Agricultura anual 5,99%

Conclusiones

Las planicies tienen suelos alfisoles y clima semiseco semicálido; presentan urbanización, agricultura permanente y anual intensiva. Este crecimiento urbanístico desordenando ha abarcado zonas en la ribera del río con alto riesgo.

Las unidades de montañas tienen suelos andisoles con clima húmedo templado; presentan una cobertura de bosque mixto y agricultura permanente, lo cual está acorde con las propiedades físicas y mecánicas de este tipo de suelo.

Los piedemonte presentan una combinación de suelos andisoles y alfisoles, con clima húmedo y semicálido. Presentan usos más diversos, son ideales para la agricultura anual y permanente. Actualmente se observa un desarrollo urbanístico sin planificación.

En forma integral, debe pensarse en servicios ambientales en la parte alta de la cuenca, ya que los suelos andisoles son vulnerables al movimiento en masa cuando se elimina la cobertura vegetal; fomentar la agricultura permanente y anual en los Piedemonte. También es necesario hacer una planificación de la zona urbana en la planicie, con un enfoque de desarrollo sostenible. Se debe partir de que la parte alta y la parte media de la cuenca deben ser la fuente de agua y alimentos para la zona urbana.

Bibliografía

- Bautista, F. & Mendoza, M. (2011). *Ordenamiento ecológico del territorio: un enfoque basado en la evaluación de la aptitud del territorio a escala regional en Infiernillo, Michoacán*. México: Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente del Gobierno de Michoacán y Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental de la Universidad Nacional Autónoma de México.
- Cuevas, G. (2008). *Aplicación de un modelo espacial para la elaboración de escenarios de uso/cobertura del suelo en la Huacana, Michoacán*. (Tesis de maestría en Geografía). Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Filosofía y Letras. División de estudios de postgrado. Morelia, Michoacán, México. D.F.
- Dame, R. L. (2008). *Identificación y caracterización de las condiciones del paisaje que determinan el uso agrícola de la tierra en tres municipios del estado de Michoacán*. (Tesis de maestría en Geografía). Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Filosofía y Letras. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. Morelia, Michoacán, México. D.F.
- Delgado, J., Ruiz, J., Navarro, E., Cortes, R., Remond, R., Salinas, E., Fernández, J. & Acevedo, P. (2011). *La degradación ambiental de los paisajes en las cuencas tributarias de la ensenada de Sibarimar (Guanabo e Itabo, Cuba)*. *Cuadernos Geográficos*, 48. Obtenido de www.ugr.es/local/cuadgeo
- Gao, Y. (2008). *Comparación de distintos métodos de clasificación digital de imágenes de satélite*. Tesis Doctor en Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Filosofía y Letras. Postgrado en Geografía. Morelia, Michoacán, México. D.F.

- Gutiérrez, O. & Gancedo, N. (2007). *Estrategia de desarrollo del turismo en Cuba. Resultados, retos y perspectivas*. La Habana: Centro de Estudio de la Economía Cubana, Universidad de La Habana.
- MAGA (2000). *Mapa de Clasificación Taxonómica de los Suelos de la República de Guatemala, a escala 1:250,000*. Memoria Técnica. Unidad de Políticas e Información Estratégica (UPIE-MAGA), Programa de Emergencia por Desastres Naturales (MAGA-BID).
- IGN. (2006). *Mapa de Clasificación Climática de la República de Guatemala, a escala 1:50,000*. Guatemala: Instituto Geográfico Nacional.
- Palacio-Prieto, J., Sánchez, M., Casado, J., Propin, E., Delgado, J., Velásquez, A., Chias, L., Ortiz, M., González, J., Negrete, G., Gabriel, J. & Huitzil, R. (2004). *Indicadores para la caracterización y ordenamiento del territorio*. Secretaría de Desarrollo Social, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México. México. 161 pp.
- Priego, Á.; Bocco, G., Mendoza, M. & Garrido, A. (2010). *Propuesta para la generación semi-automatizada de unidades de paisaje, fundamentos y métodos*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos naturales. Instituto Nacional de Ecología, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. Primera Edición. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 108pp.
- Ramón, A. & Salinas, E. (2013) *Propuesta metodológica para la delimitación semiautomatizada de unidades de paisaje de nivel local*. Revista do Departamento de Geografía, 25, 3-19.
- Salinas, E. & Quintela, J. (2001). *Paisajes y Ordenamiento Territorial: Obtención del mapa de paisajes del estado de Hidalgo en México a escala media con el apoyo de los SIG*. Revista de Investigación del Bajo Segura, 2, 517-527.

Cronograma 2015

	Vol. 28-1	Vol. 28-2	Vol. 28-3	Vol. 28-4	Vol. 29-1	Vol. 29-2	Vol. 29-3
Recepción de artículos	Mayo - julio 2014	Agosto - octubre 2014	Noviembre 2014 - enero 2015	Febrero - abril 2015	Mayo - julio 2015	Agosto - octubre 2015	Noviembre 2015 - enero 2016
Evaluación de expertos y aprobación	Agosto – setiembre 2014	Noviembre – diciembre 2014	Febrero – marzo 2015	Mayo – Junio 2015	Agosto – setiembre 2015	Noviembre – diciembre 2015	Febrero – marzo 2016
Revisión de estilo y corrección	Octubre 2014	Febrero 2015	Abril 2015	Julio 2015	Octubre 2015	Enero 2016	Abril 2016
Diagramación y correcciones finales	Enero 2015	Marzo 2015	Mayo – junio 2015	Agosto – setiembre 2015	Noviembre – diciembre 2015	Febrero – marzo 2016	Mayo – junio 2016
Publicación del número	Febrero 2015	Mayo 2015	Julio 2015	Octubre 2015	Febrero 2016	Abril 2016	Julio 2016



Editorial Tecnológica
de Costa Rica

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 alfabéticamente por el apellido del autor y de acuerdo con el formato APA (American Psychological Association) edición 2010.
10. Los documentos deberán enviarse a las direcciones electrónicas editorial@itcr.ac.cr o alamirez@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

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 in alphabetical order based on the authors' names, and in keeping with the 2010 edition of the APA (American Psychological Association) 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.