

Revista trimestral
TECNOLOGÍA
en marcha

ISSN 0379-3982 Vol. 28 N°4 octubre-diciembre 2015

Contenido

Los sistemas SCADA en la automatización industrial SCADA systems in the industrial automation <i>Esteban Pérez-López</i>	3
Efecto de la aplicación de bioactivadores y del raleo manual de frutos sobre el rendimiento y la calidad de melón (<i>Cucumis melo L.</i>) bajo cultivo protegido en Costa Rica Effect of bio activators' application and manual fruit thinning on yield and quality of melon (<i>Cucumis melo L.</i>) grown under protected cultivation in Costa Rica <i>Tania Alvarado-Sánchez, José Eladio Monge-Pérez</i>	15
Estudio de la influencia de los parámetros de corte en la integridad superficial y las desviaciones durante el fresado del acero AISI 1010 Study of influences of cutting variables on superficial integrity and deflections in milling of AISI 1010 steel <i>Luis Wilfredo Hernández-González, Roberto Pérez-Rodríguez, Luminita Dumitrescu, Romilio Montero-Sarmiento</i>	26
Comparación del contenido de carotenoides en productos nutraceuticos elaborados a partir de dos variedades de camote y yuca Carotenoids in nutraceutical products comparison derived from two varieties of sweet potato and cassava <i>Patricia Arguedas-Gamboa, Jesús Mora-Molina, Junior Sanabria Mora</i>	42
Estudio de remoción de arsénico en agua potable a nivel domiciliario mediante oxidación solar y coagulación-floculación Study of arsenic removal in drinking water at household level using solar oxidation and coagulation-flocculation techniques <i>Paola Rojas, María J. Vargas, Andrés Araya, Johnny Valverde, Luis G. Romero-Esquivel</i>	54

Emisión de compuestos tóxicos del aire de fuentes móviles en la Gran Área Metropolitana de Costa Rica en 2007

Emissions of Air Toxic Compounds in Mobile Source for the Greater Metropolitan Area of Costa Rica in 2007

Javier E. Rodríguez-Yáñez 66

Evaluación preliminar. Tratamiento del mercurio de fluorescentes y bombillas del alumbrado público

Preliminary assessment. Treatment of mercury from fluorescent light bulbs and street lighting

Juan Carlos Salas-Jiménez, William Benavides-Ramírez 78

Evaluación de técnicas de cuantificación de nitratos en agua potable para análisis en línea

Evaluation of nitrate quantification techniques for in-line analysis in drinking water

Laura Hernández-Alpízar, Ricardo Coy-Herrera 86

Evaluación integral financiera, económica, social, ambiental y de productividad del uso de bagazo de caña y combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica en Nicaragua

Integral assessment (financial, economic, social, environmental and productivity) of using bagasse and fossil fuels in power generation in Nicaragua

Napoleón Vicente Blanco-Orozco, Eduardo Arce-Díaz, Carlos Zúñiga-González 94

Uso de tecnología en la educación: las habilidades básicas del maestro de primaria en la clase de matemática

Employ of technology in education: the primary teacher and their basics skill in technology in mathematics classroom

Yuri Morales-López 108

Los sistemas SCADA en la automatización industrial

SCADA systems in the industrial automation

Esteban Pérez-López¹

Fecha de recepción: 26 de noviembre del 2014

Fecha de aprobación: 27 de febrero del 2015

Pérez-López, E. Los sistemas SCADA en la automatización industrial. *Tecnología en Marcha*. Vol. 28, N° 4, Octubre-Diciembre. Pág 3-14.

¹ Máster en Sistemas Modernos de Manufactura y Bach. en Laboratorista Químico. Profesor Universidad de Costa Rica, Recinto Grecia. Costa Rica. Correo electrónico: estebanperezlopez@gmail.com

Palabras clave

SCADA; supervisión; control; procesos; manufactura; automatización; industria.

Resumen

El presente artículo se enfoca en la importancia de los sistemas de supervisión, control y adquisición de datos, conocidos como SCADA (por las siglas en inglés de Supervisory Control And Data Adquisition), como un aspecto fundamental de la automatización de los procesos de manufactura en la industria actual.

Se destacan aspectos técnicos y funcionales de la implementación de sistemas SCADA, que le permiten al ser humano interactuar con los procesos en los diferentes tipos de industrias sin necesidad de asumir riesgos en la planta, ya que facilitan el control y toma de decisiones de manera remota desde una cabina de mando.

Este tipo de *software* constituye un avance de gran impacto en la automatización industrial, ya que permite ilustrar gráficamente los procesos productivos en pantalla y crear alarmas y advertencias en tiempo real, para el manejo confiado y pleno del proceso que se desea controlar. Se presentan los ejemplos de dos industrias que han aplicado SCADA con el fin de mejorar sus procesos, obteniendo muy buenos resultados.

Keywords

SCADA; supervisory control; process; manufacturing; automation; industry.

Abstract

This article focuses on the importance of monitoring systems, control and data acquisition, known as SCADA (for its acronym in English Supervisory Control And Data Acquisition), as a key aspect in the automation of manufacturing processes in the industry today.

Technical and functional aspects of the implementation of SCADA systems are reflected, which enable humans interact with the processes in different industries without taking risks on the ground, allowing the control and decision making remotely from a control room.

These systems or software, represent a huge impact on advancing industrial automation because, let graphically illustrate the production process on the display, create alarms and warnings in real-time and fully committed to the process to be controlled handling.

Is mentioned the example of two industries that have implemented SCADA software, in order to provide improvements to their processes, achieving great results with the same.

Introducción

La automatización industrial consiste en gobernar la actividad y la evolución de los procesos sin la intervención continua de un operador humano. En los últimos años, se ha estado desarrollado el sistema denominado SCADA (siglas en inglés de Supervisory Control And Data Adquisition), por medio del cual se pueden supervisar y controlar las distintas variables que se presentan en un proceso o planta. Para ello se deben utilizar diversos periféricos, *software* de aplicación, unidades remotas, sistemas de comunicación, etc., que le permiten al operador tener acceso completo al proceso mediante su visualización en una pantalla de computador.

El primer tipo de SCADA se utilizó en aplicaciones tales como tuberías de gas y líquidos, la transmisión y distribución de energía eléctrica y en los sistemas de distribución de agua, para su control y monitoreo automático (Shaw, 2006).

Hoy en día existen varios sistemas que permiten controlar y supervisar, tales como PLC, DCS y ahora SCADA, que se pueden integrar y comunicar entre sí mediante una red *ethernet* con el fin de que el operador pueda mejorar la interfaz en tiempo real.

Esto permite no solo supervisar el proceso sino tener acceso al historial de las alarmas y variables de control con mayor claridad, combinar bases de datos relacionadas, presentar en un simple computador, por ejemplo, una plantilla Excel, un documento Word, todo en ambiente Windows, con lo que todo el sistema resulta más amigable.

Descripción general de un SCADA

Los sistemas SCADA se conocen en español como Control Supervisor y Adquisición de Datos. Según Rodríguez (2007), el SCADA permite la gestión y control de cualquier sistema local o remoto gracias a una interfaz gráfica que comunica al usuario con el sistema.

Un sistema SCADA es una aplicación o conjunto de aplicaciones de *software* especialmente diseñadas para funcionar sobre ordenadores de control de producción, con acceso a la planta mediante la comunicación digital con instrumentos y actuadores, e interfaz gráfica de alto nivel para el operador (pantallas táctiles, ratones o cursores, lápices ópticos, etc.).

Aunque inicialmente solo era un programa que permitía la supervisión y adquisición de datos en procesos de control, en los últimos tiempos ha surgido una serie de productos de *hardware* y buses especialmente diseñados o adaptados para este tipo de sistemas. La interconexión de los sistemas SCADA también es propia, y se realiza mediante una interfaz del PC a la planta centralizada, cerrando el lazo sobre el ordenador principal de supervisión.

El sistema permite comunicarse con los dispositivos de campo (controladores autónomos, autómatas programables, sistemas de dosificación, etc.) para controlar el proceso en forma automática desde la pantalla del ordenador, que es configurada por el usuario y puede ser modificada con facilidad. Además, provee a diversos usuarios de toda la información que se genera en el proceso productivo.

Los SCADA se utilizan en el control de oleoductos, sistemas de transmisión de energía eléctrica, yacimientos de gas y petróleo, redes de distribución de gas natural y generación energética (convencional y nuclear).

Características de un Sistema SCADA

Bailey y Wright (2003) mencionan que un SCADA abarca la recolección de la información y la transferencia de datos al sitio central, llevando a cabo el análisis y el control necesario, para luego mostrar la información sobre una serie de pantallas de operador y de esta manera permitir la interacción, cuando las acciones de control requeridas se transportan de nuevo al proceso.

Según Gómez, Reyes y Guzmán del Río (2008), en su función de sistemas de control, los SCADA ofrecen una nueva característica de automatización que realmente pocos sistemas tienen: la de supervisión.

Existen muchos y muy variados sistemas de control y todos, si se aplican bien, ofrecen soluciones óptimas en entornos industriales. Lo que hace de los sistemas SCADA una herramienta diferenciada es la característica de control supervisado. De hecho, la parte de

control está definida y supeditada por el proceso que se desea controlar y, en última instancia, por el *hardware* e instrumental de control (PLC, controladores lógicos, armarios de control) o los algoritmos lógicos de control aplicados sobre la planta, que pueden existir previamente a la implantación del SCADA, que se instalará sobre y en función de estos sistemas de control.

En consecuencia, el operador supervisa el control de la planta y no solo monitorea las variables que en un momento determinado están actuando sobre la planta; esto significa que puede actuar y modificar las variables de control en tiempo real, algo que pocos sistemas permiten con la facilidad intuitiva que ofrecen los sistemas SCADA.

Se puede definir la palabra *supervisar* como ejercer la inspección superior en determinados casos, ver con atención o cuidado y someter una cosa a un nuevo examen para corregirla o repararla permitiendo una acción sobre la cosa supervisada. La labor del supervisor representa una tarea delicada y esencial desde el punto de vista normativo y operativo. De esta acción depende en gran medida el poder garantizar la calidad y eficiencia del proceso que se desarrolla. En el supervisor descansa la responsabilidad de orientar o corregir las acciones que se desarrollan. Por lo tanto, la toma de decisiones sobre las acciones de control está en manos del supervisor, que en el caso de SCADA es el operario.

Esto diferencia notablemente a SCADA de los sistemas clásicos de automatización, en los que las variables de control están distribuidas sobre los controladores electrónicos de la planta. Eso dificulta mucho las variaciones en el proceso, ya que una vez implementados, estos sistemas no permiten un control óptimo en tiempo real.

La función de monitoreo de estos sistemas se realiza sobre un computador industrial, ofreciendo una visión de los parámetros de control sobre la pantalla de ordenador, lo que se denomina un HMI (Human Machine Interface), como en SCADA, pero solo ofrecen una función complementaria de monitorización: observar mediante aparatos especiales el curso de uno o varios parámetros fisiológicos o de otra naturaleza para detectar posibles anomalías. Es decir, los sistemas de automatización de interfaz gráfica tipo HMI básicos ofrecen una gestión de alarmas básica, mediante las cuales la única opción que le queda al operario es realizar una parada de emergencia, reparar o compensar la anomalía y hacer un *reset*. Los sistemas SCADA utilizan un HMI interactivo que permite detectar alarmas y a través de la pantalla solucionar el problema mediante las acciones adecuadas en tiempo real. Esto les otorga una gran flexibilidad. En definitiva, el modo supervisor del HMI de un SCADA no solo señala los problemas sino que, lo más importante, orienta en cuanto a los procedimientos para solucionarlos.

A menudo, las palabras SCADA y HMI inducen a cierta confusión. Ciertamente es que todos los sistemas SCADA ofrecen una interfaz gráfica PC-Operario tipo HMI, pero no todos los sistemas de automatización que tienen HMI son SCADA. La diferencia radica en la función de supervisión que pueden realizar estos últimos a través del HMI.

Según Gómez et al. (2008), las características principales de un SCADA son las siguientes:

- Adquisición y almacenamiento de datos para recoger, procesar y almacenar la información recibida en forma continua y confiable.
- Representación gráfica y animada de variables de proceso y su monitorización por medio de alarmas
- Ejecutar acciones de control para modificar la evolución del proceso, actuando ya sea sobre los reguladores autónomos básicos (consignas, alarmas, menús, etc.) o directamente sobre el proceso mediante las salidas conectadas.
- Arquitectura abierta y flexible con capacidad de ampliación y adaptación.
- Conectividad con otras aplicaciones y bases de datos, locales o distribuidas en redes de

comunicación.

- Supervisión, para observar desde un monitor la evolución de las variables de control.
- Transmisión de información con dispositivos de campo y otros PC.
- Base de datos, gestión de datos con bajos tiempos de acceso.
- Presentación, representación gráfica de los datos. Interfaz del Operador o HMI.
- Explotación de los datos adquiridos para gestión de la calidad, control estadístico, gestión de la producción y gestión administrativa y financiera.
- Alertar al operador sobre cambios detectados en la planta, tanto aquellos que no se consideren normales (alarmas) como los que se produzcan en su operación diaria (eventos). Estos cambios son almacenados en el sistema para su posterior análisis.

Prestaciones de un SCADA

El paquete SCADA, en su vertiente de herramienta de interfaz hombre-máquina, comprende una serie de funciones y utilidades encaminadas a establecer una comunicación lo más clara posible entre el proceso y el operador (Rodríguez, 2007).

Según Cerrada (2011), el clásico supervisor soportado por un SCADA es un sistema de control que integra las tareas de detección y diagnóstico de fallas, como una actividad previa que permite incorporar de manera natural el control de fallas.

Las prestaciones que ofrece un sistema SCADA eran impensables hace una década y son las siguientes:

- Posibilidad de crear paneles de alarma, que exigen la presencia del ordenador para reconocer una parada o situación de alarma, con registro de incidencias.
- Generación de datos históricos de señal de planta, que pueden ser incorporados para su proceso sobre una hoja de cálculo.
- Creación de informes, avisos y documentación en general.
- Ejecución de programas que modifican la ley de control o incluso el programa total sobre el autómatas (bajo ciertas condiciones).
- Posibilidad de programación numérica, que permite realizar cálculos aritméticos de elevada resolución sobre la CPU del ordenador y no sobre la del autómatas, menos especializado, etc.

Con ellas, se pueden desarrollar aplicaciones basadas en el PC, con captura de datos, análisis de señales, presentaciones en pantalla, envío de resultados a disco o impresora, control de actuadores, etc. (Gómez et al., 2008).

Requisitos de un SCADA

Estos son algunos de los requisitos que debe tener un sistema SCADA para sacarle el máximo provecho:

- Deben ser sistemas de arquitecturas abiertas, capaces de crecer o adaptarse según las necesidades cambiantes de la empresa.
- Deben comunicarse con total facilidad y de forma transparente para el usuario con el

equipo de planta (*drivers*) y con el resto de la empresa (acceso a redes locales y de gestión).

- Los programas deben ser sencillos de instalar, sin excesivas exigencias, y fáciles de utilizar, con interfaces amables con el usuario (sonido, imágenes, pantallas táctiles, etc.).

Componentes de Hardware

Para Gómez et al. (2008), un sistema SCADA, como aplicación de *software* industrial específica, necesita ciertos componentes inherentes de *hardware* en su sistema para poder tratar y gestionar la información captada, que se describen a continuación.

Ordenador Central o MTU (Master Terminal Unit):

Se trata del ordenador principal del sistema, el cual supervisa y recoge la información del resto de las subestaciones, ya sean otros ordenadores conectados (en sistemas complejos) a los instrumentos de campo o directamente sobre dichos instrumentos. Este ordenador suele ser un PC que soporta el HMI.

De esto se deriva que el sistema SCADA más sencillo es el compuesto por un único ordenador, que es el MTU que supervisa toda la estación.

Las funciones principales del MTU son las siguientes:

- Interroga en forma periódica a las RTU y les transmite consignas; siguiendo usualmente un esquema maestro-esclavo.
- Actúa como interfaz del operador, incluyendo la presentación de información de variables en tiempo real, la administración de alarmas y la recolección y presentación de información "historizada".
- Puede ejecutar *software* especializado que cumple funciones específicas asociadas al proceso supervisado por el SCADA. Por ejemplo, *software* para detección de pérdidas en un oleoducto.

Ordenadores Remotos o RTU (Remote Terminal Unit):

Estos ordenadores están situados en los nodos estratégicos del sistema gestionando y controlando las subestaciones; reciben las señales de los sensores de campo y comandan los elementos finales de control ejecutando el *software* de la aplicación SCADA.

Se encuentran en el nivel intermedio o de automatización; a un nivel superior está el MTU y a un nivel inferior los distintos instrumentos de campo que son los que ejercen la automatización física del sistema, control y adquisición de datos.

Estos ordenadores no tienen que ser PC, ya que la necesidad de soportar un HMI no es tan grande a este nivel, por lo tanto, suelen ser ordenadores industriales tipo armarios de control, aunque en sistemas muy complejos puede haber subestaciones intermedias en formato HMI.

Una tendencia actual es dotar a los controladores lógicos programables (PLC) con la capacidad de funcionar como RTU gracias a un nivel de integración mayor y CPU con mayor potencia de cálculo. Esta solución minimiza costos en sistemas en los que las subestaciones no sean muy complejas, sustituyendo el ordenador industrial mucho más costoso. Un ejemplo de esto son los nuevos PLC (adaptables a su sistema SCADA Experion PKS o Power Knowledge System) de Honeywell o los de Motorola MOSCAD, de implementación mucho más genérica.

Red de comunicación:

Este es el nivel que gestiona la información que los instrumentos de campo envían a la red de ordenadores desde el sistema. El tipo de BUS utilizado en las comunicaciones puede ser muy variado según las necesidades del sistema y del *software* escogido para implementar el sistema SCADA, ya que no todos los *software* (ni los instrumentos de campo como PLC) pueden trabajar con todos los tipos de BUS.

Hoy en día, gracias a la estandarización de las comunicaciones con los dispositivos de campo, se puede implementar un sistema SCADA sobre prácticamente cualquier tipo de BUS. Se encuentran SCADA sobre formatos estándares como los RS-232, RS-422 y RS-485 a partir de los cuales, y mediante un protocolo TCP/IP, se puede conectar el sistema sobre un bus en configuración DMS ya existente; pasando por todo tipo de buses de campo industriales hasta formas más modernas de comunicación como Bluetooth (Bus de Radio), microondas, satélite, cable.

A parte del tipo de BUS, existen interfaces de comunicación especiales para la comunicación en un sistema SCADA, como pueden ser módems para estos sistemas que soportan los protocolos de comunicación SCADA y facilitan la implementación de la aplicación.

Otra característica de SCADA es que la mayoría se implementa sobre sistemas WAN de comunicaciones, es decir, los distintos terminales RTU pueden estar deslocalizados geográficamente.

Instrumentos de Campo:

Son todos aquellos que permiten realizar tanto la automatización o control del sistema (PLC, controladores de procesos industriales y actuadores en general) como los que se encargan de la captación de información del sistema (sensores y alarmas).

Una característica de los SCADA es que sus componentes son diseñados por distintos proveedores, sin coordinación entre sí. De manera que se tienen diferentes proveedores para las RTU (incluso es posible que un sistema utilice RTU de más de un proveedor), módems, radios, minicomputadores, *software* de supervisión e interfaz con el operador, de detección de pérdidas, etc.

Estructura y componentes de un software SCADA

Para Gómez et al. (2008), los módulos o bloques de *software* que permiten las actividades de adquisición, supervisión y control son los siguientes:

1. **Configuración:** permite definir el entorno de trabajo de la aplicación según la disposición de pantallas requerida y los niveles de acceso para los distintos usuarios. En este módulo, el usuario define las pantallas gráficas o de texto que va a utilizar, importándolas desde otra aplicación o generándolas en el propio SCADA. Para ello, se incorpora un editor gráfico que permite dibujar a nivel de píxel (punto de pantalla) o utilizar elementos estándar disponibles, líneas, círculos, textos o figuras, con funciones de edición típicas como copiar, mover, borrar, etc. Durante la configuración también se seleccionan los *drivers* de comunicación que permitirán el enlace con los elementos de campo y la conexión o no en red de estos últimos; se selecciona el puerto de comunicación sobre el ordenador y sus parámetros, etc. En algunos sistemas también es en la configuración donde se indican las variables que se van a visualizar, procesar o controlar, en forma de lista o tabla en la que éstas pueden definirse y facilitar la programación posterior.

2. **Interfaz gráfica del operador:** proporciona al operador las funciones de control y supervisión de la planta. El proceso que se supervisará se representa mediante sinópticos gráficos almacenados en el ordenador y generados desde el editor incorporado en el SCADA o importados desde otra aplicación de uso general (Paintbrush, DrawPerfect, AutoCAD, etc.) durante la configuración del paquete. Los sinópticos están formados por un fondo fijo y varias zonas activas que cambian dinámicamente de formas y colores, según los valores leídos en la planta o en respuesta a las acciones del operador. Deben tenerse en cuenta las siguientes consideraciones a la hora de diseñar las pantallas:

- Las pantallas deben tener apariencia consistente, con zonas diferenciadas para mostrar la planta (sinópticos), las botoneras y entradas de mando (control) y las salidas de mensajes del sistema (estados, alarmas).
- La representación del proceso se realizará preferentemente mediante sinópticos que se desarrollan de izquierda a derecha.
- La información presentada aparecerá sobre el elemento gráfico que la genera o soporta, y las señales de control estarán agrupadas por funciones.
- La clasificación por colores ayuda a la comprensión rápida de la información.
- Los colores deben usarse de forma consistente en toda la aplicación: si *rojo* significa peligro o alarma y *verde* indica normalidad, estos serán sus significados en cualquier parte de la aplicación.

Previendo dificultades en la observación del color, debe añadirse alguna forma de redundancia, sobre todo en los mensajes de alarma y atención: textos adicionales, símbolos gráficos dinámicos, intermitencias u otros. La redundancia como un componente de seguridad SCADA consiste en lograr respaldos de información, duplicar (cuando un elemento asume la función de otro), contar con centros de control separados geográficamente que proporcionen redundancia y, por tanto, protección contra los ataques humanos y desastres naturales. Este elemento permite seguir operando aunque el sistema primario esté desactivado, funcionando incluso de manera remota (Kruz, 2006).

3. **Módulo de proceso:** ejecuta las acciones de mando preprogramadas a partir de los valores actuales de variables leídas. Sobre cada pantalla se pueden programar relaciones entre variables del ordenador o del autómatas que se ejecutan continuamente mientras esté activa. La programación se realiza por medio de bloques de programa en lenguaje de alto nivel (C, Basic, etc.). Es muy frecuente que el sistema SCADA confíe a los dispositivos de campo, principalmente autómatas, el trabajo de control directo de la planta, reservándose para sí las operaciones propias de la supervisión, como el control del proceso, análisis de tendencias, generación de históricos, etc. Las relaciones entre variables que constituyen el programa de mando que el SCADA ejecuta de forma automática pueden ser de varios tipos:

- Acciones de mando automáticas preprogramadas que dependen de valores de señales de entrada, salida o combinaciones de éstas.
- Maniobras o secuencias de acciones de mando.
- Animación de figuras y dibujos, asociando su forma, color, tamaño, etc., al valor actual de las variables.
- Gestión de recetas, que modifican los parámetros de producción (consignas de tiempo o de conteo, estados de variables, etc.) de forma preprogramada en el tiempo o dinámicamente según la evolución de la planta.

4. **Gestión y archivo de datos:** se encarga del almacenamiento y procesado ordenado de los datos, según formatos inteligibles para elementos periféricos de *hardware* (impresoras, registradores) o *software* (bases de datos, hojas de cálculo) del sistema, de forma que otra aplicación o dispositivo pueda tener acceso a ellos. Pueden seleccionarse datos de planta para ser capturados a intervalos periódicos y almacenados como un registro histórico de actividad, o para ser procesados inmediatamente por alguna aplicación de *software* para presentaciones estadísticas, análisis de calidad o mantenimiento. Esto último se consigue con un intercambio de datos dinámico entre el SCADA y el resto de aplicaciones que corren bajo el mismo sistema operativo. Por ejemplo, el protocolo DDE de Windows permite el intercambio de datos en tiempo real. Para ello, el SCADA actúa como un servidor DDE que carga variables de planta y las deja en la memoria para su uso por otras aplicaciones Windows, o las lee en memoria para su propio uso después de haber sido escritas por otras aplicaciones. Una vez procesados, los datos se presentan en forma de gráficas analógicas, histogramas, representación tridimensional, etc., que permiten analizar la evolución global del proceso.

Ejemplos de implementación SCADA en la industria

Uso de sistemas de Foxboro en Kimberly Clark Costa Rica, planta Belén

Kimberly Clark Costa Rica, en su planta de Belén, es una empresa dedicada a la elaboración de productos de papel utilizando como base papel de reciclaje. Los procesos de fabricación de papel son complejos y delicados y por esa razón la firma decidió automatizar algunos de los principales, utilizando productos de la línea de Foxboro. Al momento de este trabajo se cuenta con automatización en una planta recicladora (incluyendo el proceso de blanqueo), dos máquinas de papel y la planta de tratamiento de aguas.

En Kimberly Clark se ha llegado con ellos hasta el nivel de uso del SCADA, conocido para Foxboro como DCS; este sistema es una interfaz que le permite al operador no solo observar distintas variables sino hacerlas interactuar con el proceso introduciendo ajustes desde el computador en su cuarto de control. El sistema DCS ha permitido a los operadores tener un mayor control de su operación y llevar gráficos de tendencias, los cuales son actualizados constantemente, permitiendo la toma de datos y decisiones oportunas.

Otra de las grandes ganancias de la implementación de este sistema son los ahorros que se generan al tener una mejor visión de los flujos de aplicación de químicos, así como mejoras en la calidad del papel producido al tenerse una mejor visión de las distintas fases del proceso.

Dado que se utilizan productos químicos, el proceso también se ha favorecido mucho pues se ha disminuido al mínimo el contacto con estas sustancias, protegiendo al personal involucrado.

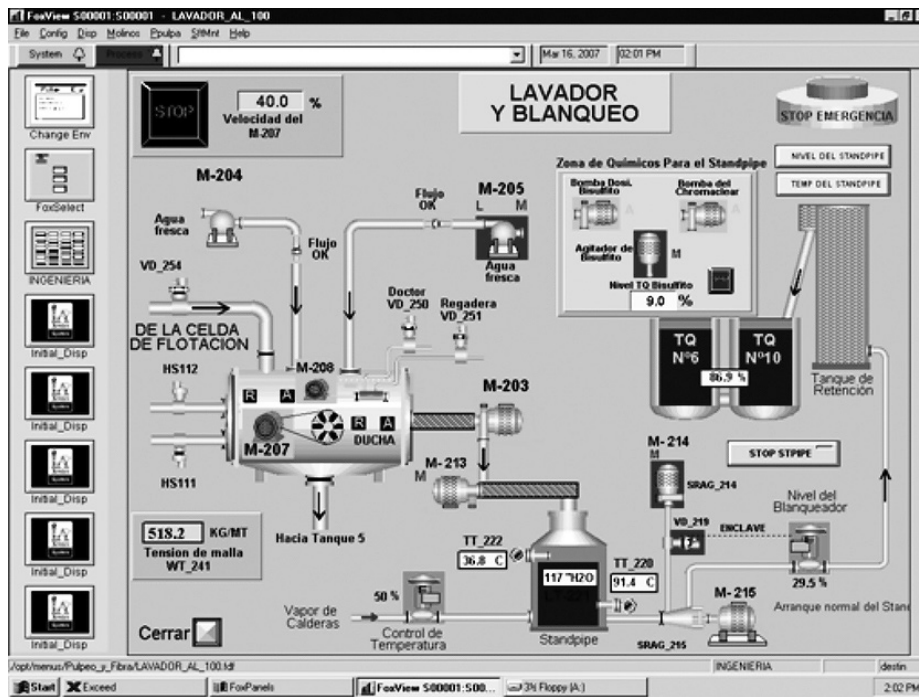


Figura 1. Pantalla de un SCADA en Kimberly Clark Costa Rica.

Uso del sistema de *software* Wonderware en Pepsi Garner, Carolina del Norte (EUA)

La planta de la empresa Pepsi ubicada en Garner, Carolina del Norte, se dedica a la elaboración de productos de consumo masivo en el área de los refrescos. Pepsi Bottling Ventures (PBV) es reconocida como la planta embotelladora número uno en América del Norte. PBV ha crecido hasta convertirse en el tercer mayor fabricante y distribuidor de Pepsi-Cola en América del Norte, opera 27 plantas de embotellamiento y distribución en seis estados (EUA). PBV fabrica y distribuye más de 100 diferentes sabores y marcas.

Crecimiento, calidad y desafíos

Construida en 2002, PBV Garner ha pasado a producir y distribuir 189 productos diferentes a más de 500 hoy. Los cambios de botella y a envases secundarios suceden a diario en la planta, y tener la capacidad para adaptarse a estos cambios requiere un nivel único de flexibilidad en la manufactura, atención al detalle y acceso a los datos de producción.

Antes, los resultados se basaban exclusivamente en los datos introducidos de forma manual. Dependiendo de la carga de trabajo del operador y la capacidad para medir con precisión el rendimiento de la máquina, estos datos serían subjetivos e inconsistentes. Una vez que los datos se entregaban a la gestión de la planta, la información generaba más preguntas que respuestas.

Con cuatro líneas de producción existentes en el lugar, PBV ha añadido un “nuevo relleno de golpe directo” (DBF) para la línea de Aquafina y otros productos no carbonatados. Esta línea no solo llena las botellas con agua purificada sino que, en realidad, también hace las botellas.

Como las necesidades de producción crecieron y la tecnología avanzaba, PBV buscó una solución de *software* para medir el rendimiento, el tiempo de inactividad y efectividad total del

equipo (OEE). El reto consistía en encontrar una solución que pudiera funcionar tanto con líneas de legado como con la nueva línea de DBF.

Después de muchas investigaciones y el examen de varios sistemas diferentes, PBV optó por una solución de rendimiento basado en el *software* de Wonderware Invensys, de Gestión de Operaciones. La legendaria flexibilidad de Wonderware fue un poderoso factor en dicha selección. El *software* Wonderware habilita a los ingenieros de PBV para agregar funcionalidad desde la casa, mientras que expande y soluciona problemas del sistema con su personal interno.

Trabajar con el distribuidor de Wonderware suroeste, sistema integrado Barry-Wehmiller Design Group, proporciona una evaluación detallada de las necesidades de PBV y presenta la solución que identifica las causas detalladas de todos los tiempos de inactividad de los centros principales de las máquinas. PBV no solo quería analizar los datos desde el nivel central de la máquina sino de todo el camino hasta el nivel de línea. Mediante la implementación de un algoritmo que permitía la propagación de códigos de tiempo de inactividad de los centros de la máquina, hasta el final a la línea. La solución de Wonderware resultó ser una fuerte propuesta de valor para PBV, para analizar con precisión sus datos y ver lo que realmente afecta la producción.

Las mejoras de las operaciones críticas en la planta fueron: la solución con Wonderware System Platform, Wonderware Performance Software, Wonderware InTouch HMI y Wonderware Active Factory and Historian, que fueron instalados en las cinco líneas de la planta de Garner.

Estos son ejemplos típicos de las facilidades y ventajas que brindan los sistemas SCADA en la automatización industrial, como medio para solventar necesidades en eficiencia y efectividad en la supervisión y control de los procesos de manufactura.

Las tendencias SCADA

La madurez de los productos de *software* para la adquisición y registro de datos en tiempo real y la supervisión y control de procesos ofrece una evolución en los siguientes ámbitos:

Su integración en entornos completos para la gestión del negocio disponiendo de información de planta en tiempo real, control y tratamiento de datos y supervisión y gestión global de la empresa. La existencia de aplicaciones MES, los servidores de datos y los servidores de *web* son una prueba de ello.

En el tratamiento de los datos adquiridos en planta por parte de sistemas expertos que ofrecen funcionalidades de detección y diagnóstico de fallos. Son evidentes las ventajas que supone disponer de un sistema experto que, a partir de los datos adquiridos de planta tanto en proceso continuo como discontinuo, pueda aplicar un conjunto de reglas que ayude al personal de operación en planta a detectar los fallos o situaciones delicadas y tener un diagnóstico de las causas que los provocan y saber qué se debe hacer para corregirlos.

La mejora de las interfaces con el usuario con el empleo de entornos gráficos de alta calidad, la incorporación de elementos multimedia de audio y vídeo, la mejora de los sistemas operativos para incrementar las velocidades de respuesta, el uso de *software* orientado a objeto, con diálogos conversacionales con programador y usuario, etc., todo ello soportado por un *hardware* cada vez más compacto, fiable, potente, de mayor ancho de bus y más rápido.

Conclusiones

En definitiva, los sistemas SCADA ofrecen una perspectiva integrada de todos los recursos de control e información de la planta. De esta manera, los ingenieros, supervisores, gerentes y operadores pueden visualizar e interactuar con los procesos mediante sus representaciones gráficas.

Una premisa fundamental en la automatización industrial es que las máquinas o *software* hagan lo que les corresponde, y que el ser humano no haga lo que una máquina, *software* o robot puede realizar mecánicamente. De esta forma, el ser humano dedicará su tiempo a las tareas que demandan “pensar” y no a trabajos repetitivos que fácilmente una máquina o un *software* pueden realizar o supervisar.

Además, es de vital importancia mantener la salud y la seguridad ocupacional en las diferentes tareas que se realizan en todo proceso productivo, lo que se ve favorecido por la automatización mediante los sistemas SCADA mencionados y otras formas de automatización existentes.

Los trabajos de actualización tecnológica y automatización implican riesgos que pueden evitarse o mitigarse por medio de una cuidadosa planificación de las actividades, adoptando la tecnología que mejor se ajusta en cada caso y realizando una ingeniería detallada y un exhaustivo conjunto de pruebas para cada sistema a implementar.

El avance y la complejidad de los nuevos procesos industriales ha obligado a las empresas a buscar soluciones de integración de distintas tecnologías. En este proceso muchas firmas dedicadas a brindar asesorías y equipamiento han jugado un papel fundamental en la simplificación de los sistemas de automatización y, por ende, en la integración con otras tecnologías.

Bibliografía

- Agüero, J., García, M., Monge, I., Pérez, E. & Solano, J. (2010). *Foxboro Automation System*. Curso Taller de Manufactura. TEC.
- Bailey D. & Wright E. (2003). *Practical SCADA for Industry*. IDC Technologies.
- Cerrada, M. (2011). Diagnóstico de fallas basado en modelos: Una solución factible para el desarrollo de aplicaciones SCADA en tiempo real. *Revista Ciencia e Ingeniería*, 32(3), 163-172.
- Foxboro's New Automation System. (2003). Recuperado de <http://www.ferret.com.au/c/foxboro/foxboro-s-new-automation-system-n692986>
- Gómez, J., Reyes, R. & Guzmán del Río, D. (2008). *Temas especiales de instrumentación y control*. Cuba: Editorial Félix Varela.
- Krutz, R. (2006). *Securing SCADA Systems*. Indiana: Wiley Publishing Inc.
- Pérez, E. & Rangel, R. (2010). *Sistemas SCADA*. Curso Sistemas Flexibles de Manufactura. TEC.
- Rodríguez, A. (2008). *Sistemas SCADA*. 2 ed. Barcelona: Editorial Marcombo.
- Romagosa, J., Gallego, D. & Pacheco, R. (2004). *Automatización Industrial*. Recuperado de http://formacion.plcmadrid.es/descargas/docs/proyecto_automatizacion.pdf
- Shaw, W. (2006). *Cybersecurity for SCADA Systems*. Oklahoma: PennWell Corporation.
- Sistema Automático de Telemetría. Recuperado de http://www.tecmes.com/pdf/TP600_SAT.pdf
- Sistemas SCADA. (2006). Recuperado de <http://www.automatas.org/redes/SCADAs.htm>
- Wiebe, M. (1999). *A Guide to Utility Automation: AMR, SCADA, and IT Systems*. Oklahoma: PennWell.

Efecto de la aplicación de bioactivadores y del raleo manual de frutos sobre el rendimiento y la calidad de melón (*Cucumis melo L.*) bajo cultivo protegido en Costa Rica*

Effect of bio activators' application and manual fruit thinning on yield and quality of melon (*Cucumis melo L.*) grown under protected cultivation in Costa Rica*

Tania Alvarado-Sánchez¹, José Eladio Monge-Pérez²

Fecha de recepción: 15 de enero del 2015

Fecha de aprobación: 7 de abril del 2015

Alvarado-Sánchez, T; Monge-Pérez, J. Efecto de la aplicación de bioactivadores y del raleo manual de frutos sobre el rendimiento y la calidad de melón (*Cucumis melo L.*) bajo cultivo protegido en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 28, N° 4, Octubre-Diciembre. Pág 15-25.

* Este trabajo forma parte de la tesis de licenciatura en Agronomía de la primera autora. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Santa Clara, San Carlos, Costa Rica.

1 Costarricense, ingeniera agrónoma. Teléfono: (506)8864-1286. Correo electrónico: talvasan@hotmail.com

2 Costarricense, ingeniero agrónomo. Teléfono: (506)2289-5969 y (506)8819-3526. Correo electrónico: melonescr@yahoo.com.mx, Apdo. 665-4050, Estación Experimental Fabio Baudrit, Universidad de Costa Rica. Costa Rica.

Palabras clave

Bioactivadores; raleo manual de frutos; *Cucumis melo*; cultivo protegido; rendimiento.

Resumen

Se evaluó el efecto del raleo manual de frutos y de la aplicación de los bioactivadores Algamix y Engordone sobre el rendimiento y la calidad del melón amarillo var. JMX-902. No se encontraron diferencias significativas con respecto a la firmeza del fruto, concentración de sólidos solubles totales, peso del fruto, rendimiento total, peso del fruto comercializable, rendimiento comercializable, y rendimiento por planta. Se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos para el número de frutos por planta; las plantas tratadas con solo Engordone y solo Algamix presentaron mayor número de frutos por planta con respecto a otros tratamientos, pero estos resultados no fueron distintos de los del Testigo. Se encontraron diferencias significativas al distribuir la producción según distintas categorías de peso; el rendimiento de frutos de melón con un peso de entre 601-800 gramos fue superior en plantas tratadas con solo Algamix respecto a los demás tratamientos; el rendimiento de frutos de melón con un peso de entre 801-1000 gramos fue superior en plantas tratadas con solo Engordone respecto a los demás tratamientos.

Keywords

Bio activators; manual fruit thinning; *Cucumis melo*; protected cultivation; yield.

Abstract

The effects of manual fruit thinning and of applying the bio activators Algamix and Engordone on the yield and quality of yellow honey dew melon var. JMX-902, were evaluated. Significant differences were not found with respect to fruit firmness, total soluble solids concentration, fruit weight, total yield, marketable fruit weight, marketable yield, and yield per plant. Significant differences between treatments were found for the number of fruits per plant: Plants treated with Engordone alone and Algamix alone showed higher number of fruits per plant compared to other treatments, but these results were not different from the Control. Significant differences were also observed by distributing the output per weight categories: With respect to the other treatments, the yield of melon fruits weighting between 601-800 grams was higher in plants treated with Algamix alone, and the yield of melon fruits weighting between 801-1000 grams was higher in plants treated with Engordone alone.

Introducción

El cultivo de melón ha adquirido gran importancia a nivel mundial y en los últimos 20 años se ha convertido en uno de los principales productos hortícolas en Europa y Estados Unidos, debido al alto consumo de las nuevas variedades y a las estrategias tecnológicas del comercio (Torres y Miquel, 2003). En Costa Rica, los principales tipos de melón que se producen para exportación son Harper, Cantaloupe, Amarillo, Honey Dew, Galia, Piel de Sapo y Charentais. Durante el año 2009, el 85% de las exportaciones a Estados Unidos correspondió a melón tipo Harper y Cantaloupe y el 15% restante a Honey Dew, mientras que las exportaciones a Europa estuvieron encabezadas por el melón tipo Amarillo (58%), seguido de Harper y Cantaloupe (39%) y Galia (3%) (CANAPEMS, 2009, citado por Monge-Pérez, 2014b).

La producción de melón se reduce notablemente durante el período de invierno en la Unión Europea y Norteamérica, lo que le permite a Costa Rica aprovechar esa época para realizar exportaciones y así favorecer su economía mediante la generación de divisas. Este cultivo requiere de elevadas temperaturas (25-30 °C) para su desarrollo, pero su producción en campo abierto se dificulta en la época lluviosa debido a la alta incidencia de enfermedades favorecidas por la humedad. Por esta razón, se ha intentado implementar la siembra de melón bajo cultivo protegido, con el propósito de suplir la demanda de los mercados internacionales y también el nacional.

En los últimos años, en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno (EEAFBM), ubicada en Alajuela, Costa Rica, se han producido diferentes tipos de melón en invernadero, pero se han obtenido frutos de menor tamaño en comparación con los producidos en las provincias de Guanacaste y Puntarenas en condiciones de campo abierto, a menos de 100 msnm (J. E. Monge, datos sin publicar). Esto probablemente se debe a diferencias de temperatura (es menor en Alajuela, especialmente durante la noche), al tipo de cultivo en hidroponía (en vez de suelo), a diferencias en luminosidad (hay más horas luz en Guanacaste y Puntarenas) o a la ausencia de aplicación de reguladores de crecimiento (que sí se hace en algunas fincas), aunque podría deberse a otros factores. Sin embargo, para lograr buenos rendimientos con el melón en invernadero es imprescindible alcanzar frutos de tamaño adecuado, que sean más comerciales y permitan obtener una alta rentabilidad. Por esa razón se planteó este trabajo de investigación, con el fin de intentar un aumento en el tamaño del fruto de melón producido en invernadero en Alajuela. El objetivo fue evaluar el efecto de la aplicación de bioactivadores y del raleo manual de frutos sobre el rendimiento y calidad del melón bajo cultivo protegido.

Materiales y métodos

La investigación fue desarrollada en la EEAFBM, localizada en el distrito San José de Alajuela, a una altitud de 840 msnm; la precipitación anual promedio es de 1940 mm, distribuida de mayo a noviembre, y la temperatura promedio anual es de 22 °C. El período de estudio comprendió desde la primera semana de enero hasta la primera semana de mayo de 2014. Se sembró semilla de melón Amarillo JMX-902 F-1 en almácigo utilizando bandejas de 128 celdas; 15 días después se realizó el trasplante de las plántulas en sacos plásticos de 1 m de longitud, 20 cm de ancho y 15 cm de altura, que contenían aproximadamente 30 litros de fibra de coco. La distancia entre hileras fue de 1,54 m y la distancia entre plantas de 25 cm, para una densidad de 2,6 plantas/m². Las plantas dispusieron de tutorado, que consistió en una malla plástica color verde, con una altura de 2,0 m. Se empleó un sistema de riego por goteo, con una descarga de 2 l/h por gotero. Se utilizó un diseño completamente al azar, con ocho tratamientos y cinco repeticiones. En el cuadro 1 se detallan los tratamientos utilizados en esta investigación.

El tratamiento Testigo consistió en plantas de libre crecimiento y desarrollo de frutos, sin aplicación de productos bioactivadores ni la práctica de raleo manual. El tratamiento de raleo manual consistió en dejar solo dos frutos por planta; se seleccionaron los dos frutos que presentaron un mayor tamaño, uniformidad y sanidad; esta práctica se realizó en tres momentos distintos (41, 50 y 57 ddt). El tratamiento de aplicación de solo Algamix se realizó vía radical, a una dosis de 3 litros/ha, y se ejecutó cada 14 días en siete momentos distintos (13, 27, 41, 55, 69, 83 y 97 ddt). El tratamiento de aplicación de solo Engordone se realizó también vía radical, a una dosis de 400 gramos/ha, y se ejecutó cada 14 días en seis momentos distintos (34, 48, 62, 76, 90 y 104 ddt). En condiciones de invernadero, la empresa fabricante de ambos productos recomienda tanto la aplicación vía foliar como vía radical, y se escogió la vía radical por su mayor facilidad de aplicación. Además, se aplicaron los siguientes tratamientos combinados: Algamix más raleo manual, Engordone más raleo manual, Algamix más Engordone, y Algamix más Engordone más raleo manual.

Cuadro 1. Descripción de tratamientos utilizados

Número	Tratamiento	Dosis	Frecuencia (número de veces)	Intervalo	Período (ddt)
1	Testigo	-	-	-	-
2	Raleo Manual	-	3	1 semana	41, 50, 57
3	Algamix	3 l/ha	7	14 días	13, 27, 41, 55, 69, 83, 97
4	Engordone	400 g/ha	6	14 días	34, 48, 62, 76, 90, 104
5	Algamix+R aleo Manual	3 l/ha	7	14 días	13, 27, 41, 55, 69, 83, 97
6	Engordone+Raleo Manual	400 g/ha	6	14 días	34, 48, 62, 76, 90, 104
7	Algamix+Engordone	A → 3 l/ha	7	14 días	13, 27, 41, 55, 69, 83, 97
		E → 400 g/ha	6	14 días	34, 48, 62, 76, 90, 104
8	Algamix+Engordone+Raleo Manual	A → 3 l/ha	7	14 días	13, 27, 41, 55, 69, 83, 97
		E → 400 g/ha	6	14 días	34, 48, 62, 76, 90, 104

El Engordone y el Algamix son productos bioactivadores del crecimiento y desarrollo en las plantas. El Algamix está compuesto principalmente por un extracto al 60% del alga *Aschophyllum nodosum*; además contiene citoquininas, ácido indolacético, giberelinas, betaínas, proteínas (1,8-2,4%), ácido alginico (3,0-6,0%), manitol (1,2-2,1%), materia orgánica (15,0-16,5%), carbohidratos (10,5-15,0%), micronutrientes tales como boro (24-30 ppm), molibdeno (0,26%), cobalto (0,3-0,6 ppm), cobre (9-13 ppm), hierro (46-78 ppm), manganeso (7,5-12,0 ppm) y zinc (3-6 ppm), y macronutrientes como nitrógeno (0,42-0,54%), potasio (16,0%), fósforo (0,009-0,021%), azufre (0,3-0,6%), calcio (0,30-0,35%), magnesio (0,09-0,18%) y sodio (0,04-0,06%) (Lida Plant Research, 2010a). El Engordone es una fuente bioestimulante del crecimiento y división celular de las plantas, compuesto por fósforo (25,0%), potasio (32,0%), boro (0,2%), manganeso (0,1%), molibdeno (0,4%) y zinc (0,1%); también contiene reguladores de crecimiento como auxinas, giberelinas y citoquininas, y proteínas, carbohidratos, vitaminas (A, B1, B6 y B12) y antioxidantes naturales (Lida Plant Research, 2010b).

Para llevar a cabo la recolección de los frutos, se usó el color amarillo “yema de huevo” de la cáscara de melón como indicador de cosecha. Se evaluaron todos los frutos cosechados en la parcela útil de cada tratamiento, dos veces por semana durante ocho semanas, para un total de 16 evaluaciones. Para determinar el peso de los frutos se utilizó una balanza marca Ocony, modelo TH-I-EK, de 5000,0 ± 0,1 gramos de capacidad. Una vez obtenido el peso de todos los frutos cosechados, se distribuyeron en distintas categorías de peso: frutos no comercializables (menos de 400 g), frutos de segunda calidad (401-600 g) y frutos comercializables, el cual comprendió aquellos con un peso de entre 601-800 g, frutos de entre 801-1000 g y frutos de más de 1001 g. Además, se agregó una sexta categoría que incluye los frutos que presentaron un peso de entre 801 a más de 1001 g. A partir de estos datos, se obtuvo el peso promedio del fruto comercializable. El rendimiento se calculó en toneladas por hectárea y se obtuvo

con base en la producción total, que incluyó todos los frutos cosechados en la parcela útil. El rendimiento comercializable también se calculó en toneladas por hectárea y se obtuvo a partir de la producción de todos los frutos cosechados con un peso superior a 600 g. El rendimiento por planta se determinó a partir de la producción obtenida (kg/ha) y de la densidad de siembra (plantas/ha). Para calcular el número de frutos por planta, se realizó una sumatoria de todos los frutos cosechados por tratamiento y se dividió entre el número de plantas.

Para la determinación de los sólidos solubles se procedió a cortar el fruto transversalmente en dos porciones; a una de ellas se le cortó un trozo de pulpa y se descartó el área cercana a las semillas; luego el trozo se exprimió manualmente y se depositaron cinco gotas de jugo sobre la superficie del refractómetro (marca Atago, modelo N-1a, escala de 0,0-32,0 \pm 0,2%). Para la determinación de la firmeza de la pulpa se tomó la otra porción del corte transversal y se colocó sobre una superficie plana y rígida, luego con una mano se sostuvo la porción del fruto y con la otra mano se tomó el penetrómetro (marca Effegi, modelo FT-327, capacidad de 12,5 \pm 0,1 kg/cm²) para introducirlo en cinco sitios diferentes de la pulpa, manteniendo una presión constante y considerando que los sitios no se encontraran cerca del borde (cáscara) ni cerca de la placenta; se utilizó el puntero del penetrómetro cuya base mide 7,5 mm de diámetro. Finalmente, se calculó un promedio a partir de las cinco lecturas obtenidas.

Para todas las variables se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) con el programa estadístico Infostat versión 2014e. Se usó la prueba de Tukey para comparar las medias de cada tratamiento, y para todas las variables se utilizó una significancia del 5% ($p \leq 0,05$).

Resultados y discusión

En el cuadro 2 se muestran los resultados obtenidos para las variables de rendimiento. No se encontraron diferencias estadísticamente significativas con respecto al peso del fruto, peso del fruto comercializable, rendimiento total, rendimiento comercializable y rendimiento por planta. A pesar de lo anterior, es interesante anotar que el mayor peso del fruto se presentó en las plantas tratadas con solo Algamix (801,76 g). Taha y Salih (2014) obtuvieron un incremento en el peso de los frutos de pepino cuando realizaron aplicaciones de extracto de algas sobre las plantas. Zamani et al. (2013) explican que una posible causa del aumento del tamaño de los frutos cuando se aplica extracto de algas es la presencia de citoquininas y betaínas; estas sustancias promueven la división de las células en las etapas iniciales de crecimiento, además de favorecer la formación floral.

Por otra parte, el menor peso del fruto se presentó en las plantas tratadas solo con Engordone (732,44 g), pero esto puede estar relacionado con el hecho de que este tratamiento también fue el que presentó el mayor número de frutos por planta; una respuesta similar se observó en mango en Costa Rica (J. E. Monge, datos sin publicar). También se conoce que la aplicación foliar de Engordone en melón a campo abierto en Costa Rica favoreció la producción de frutos de mayor tamaño (J. E. Monge, datos sin publicar).

Torres (2013) reporta que la respuesta de la planta a un bioactivador está sujeta en gran medida a su composición, y por lo general ésta es muy variable. El Algamix, a diferencia del Engordone, tiene en su composición betaínas, ácido algínico y manitol; estas dos últimas sustancias favorecen la absorción y traslocación de nutrientes, ya que actúan como agentes quelatantes, mientras que las betaínas aumentan la tasa fotosintética debido a que retrasan la degradación de la clorofila (Senn, 1987). El mayor peso del fruto obtenido en las plantas tratadas con solo Algamix, con respecto a las plantas tratadas con solo Engordone, puede estar relacionado con la presencia de estas sustancias.

Cuadro 2. Variables de rendimiento evaluadas

Tratamiento	Peso del fruto (g)	Peso del fruto comercializable (g)	Rendimiento total (ton/ha)	Rendimiento comercializable (ton/ha)	Rendimiento/planta (kg)	Número de frutos/planta
Testigo	763,24 ± 40,09 a	849,64 ± 44,65 a	47,24 ± 12,13 a	38,81 ± 11,07 a	1,82 ± 0,47 a	2,50 ± 0,17 ab
Raleo Manual	767,26 ± 105,18 a	854,26 ± 104,88 a	42,14 ± 4,75 a	32,86 ± 2,29 a	1,62 ± 0,18 a	2,28 ± 0,23 ab
AlgamiX	801,76 ± 127,74 a	879,18 ± 140,78 a	51,80 ± 17,52 a	44,60 ± 15,66 a	1,99 ± 0,67 a	2,74 ± 0,24 b
Engordone	732,44 ± 40,87 a	844,54 ± 25,42 a	50,51 ± 12,93 a	39,74 ± 12,80 a	1,93 ± 0,50 a	2,76 ± 0,40 b
AlgamiX+R aleo Manual	763,74 ± 54,72 a	860,04 ± 54,15 a	40,40 ± 13,86 a	32,66 ± 11,86 a	1,55 ± 0,54 a	2,16 ± 0,30 a
Engordone+Raleo Manual	747,56 ± 99,35 a	870,16 ± 65,59 a	38,46 ± 14,87 a	28,47 ± 10,29 a	1,48 ± 0,57 a	2,12 ± 0,22 a
AlgamiX+Engordone	739,70 ± 61,91 a	862,34 ± 39,61 a	42,45 ± 18,56 a	32,88 ± 16,64 a	1,67 ± 0,71 a	2,24 ± 0,26 ab
AlgamiX+Engordone+Raleo Manual	779,62 ± 55,72 a	838,08 ± 85,11 a	40,12 ± 16,76 a	32,10 ± 12,40 a	1,54 ± 0,65 a	2,12 ± 0,29 a

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$).

Independientemente del tratamiento aplicado, el peso promedio del fruto obtenido en el presente estudio (762,0 g) superó al obtenido por Koetz et al. (2006) en otra variedad de melón tipo Amarillo en cultivo protegido (724,33 g). No obstante, este peso fue inferior al obtenido por Dias et al. (2006) con una tercera variedad de melón Amarillo (1500 g). Evidentemente, el peso del fruto es una variable que depende mucho del genotipo de melón utilizado. Sin embargo, es muy importante mencionar que el peso promedio de los frutos aumentó notablemente en este estudio con respecto a otros ensayos realizados anteriormente en la EEAFCM con el melón JMX-902, donde el peso promedio fue de 537,0 g (cosecha del 9 de enero al 6 de marzo 2012) y de 502,9 g (cosecha del 17 de diciembre 2012 al 20 de febrero 2013)², y de 572,5 g (cosecha del 30 de setiembre al 22 de noviembre 2013) (Monge-Pérez, 2014a). Esto indica un aumento en el peso del fruto para este híbrido de entre 33,1 y 55,5% con respecto a dichos estudios anteriores; la principal razón que puede explicar este resultado es que la incidencia de plagas (mosca blanca, ácaros, trips) y enfermedades (mildíu polvoso) fue menor en el presente estudio gracias a un mejor manejo fitosanitario.

Con respecto al peso del fruto comercializable, las plantas tratadas con solo AlgamiX presentaron los frutos con mayor peso (879,18 g), mientras que el menor peso se presentó en el tratamiento Raleo Manual más AlgamiX más Engordone (838,08 g).

Las plantas sometidas a aplicaciones de solo AlgamiX produjeron una respuesta importante en el rendimiento total, pues presentaron el valor más alto (51,80 ton/ha). Este resultado es menor al mencionado por Reche (2009) en España para melón tipo Amarillo bajo invernadero (60 ton/

2 Monge-Pérez, J.E. 2014. Melón Amarillo JMX-902 en cultivo protegido (datos sin publicar). La Garita de Alajuela, Costa Rica. Estación Experimental Agrícola Fab Baudrit Moreno. Correo electrónico: melonescr@yahoo.com.mx

ha). Sin embargo, los rendimientos obtenidos en este trabajo superan al obtenido por Monge-Pérez (2014a) con el melón JMX-902, bajo las mismas condiciones de producción (cultivo protegido en la EEAFBM), de 34,8 ton/ha, y también superan a los obtenidos en cultivo protegido por Koetz et al. (2006) (34,12 ton/ha) y por Dias et al. (2006) (26,10 ton/ha) y al rendimiento promedio obtenido por Miguel et al. (2008) entre nueve variedades de melón Amarillo a campo abierto (28,07 ton/ha).

Con respecto al rendimiento comercializable, las plantas tratadas con solo Algamix también produjeron el mejor resultado (44,60 ton/ha). Este efecto positivo puede estar asociado a lo reportado por Crouch et al. (1990), quienes explican que las aplicaciones de extracto de algas contribuyen a mejorar la absorción de nutrientes por medio de las raíces, además de mejorar el aprovechamiento del agua, favoreciendo el crecimiento y desarrollo de la planta. El extracto de algas administrado a bajas concentraciones en el sistema radical beneficia el contenido de clorofila en las hojas (Blunden et al., 1997). Lo anterior coincide con investigaciones realizadas en tomate y pepino, en las que se registró un aumento de los niveles de clorofila en las hojas, posiblemente debido a la acción de las betaínas, que son capaces de inhibir la degradación de la clorofila, retrasando así el declive de la actividad fotosintética. Al incrementarse los contenidos de clorofila, es muy probable que se presente una mayor absorción de hierro y éste funciona como catalizador de la biosíntesis de la clorofila; su mayor absorción también puede estar asociada con el efecto directo de las betaínas. Entonces, si hay mayor contenido de clorofila, se da una mayor tasa fotosintética (Genaro et al., 1991, citados por Khan et al., 2009; Whapham et al., 1993). Lo reportado por tales autores coincide con el resultado del análisis foliar realizado en las plantas de melón en este estudio, el cual mostró un nivel de 139 ppm de hierro, mientras que los valores normales están entre 60 y 120 ppm; evidentemente sí hubo una mayor absorción de este elemento. Algunos investigadores indican que los altos rendimientos en cultivos sometidos a aplicaciones de extracto de algas están relacionados con el efecto de las citoquininas; este fitorregulador actúa sobre distintas características de crecimiento mediante el aumento de la división celular, produciendo un mayor tamaño y homogeneidad en los frutos, y consecuentemente un mayor rendimiento (Taiz y Zeiger 2006).

Aunque no se observaron diferencias significativas entre tratamientos para el rendimiento por planta, el mejor resultado se dio cuando se aplicó solo Algamix (1,99 kg/planta) y solo Engordone (1,93 kg/planta). Estos mismos efectos positivos se obtuvieron en pepino cuando se realizaron aplicaciones de extractos de algas, donde el rendimiento fue de 6,04 kg/planta, mientras que en el Testigo fue de 5,49 kg/planta (Taha y Salih, 2014).

El mayor número de frutos por planta se obtuvo en las plantas tratadas con solo Engordone y solo Algamix (2,76 y 2,74 frutos/planta, respectivamente), y estos resultados fueron estadísticamente diferentes con respecto a los tratamientos Algamix más Raleo Manual, Engordone más Raleo Manual, y Algamix más Engordone más Raleo Manual; sin embargo, no fueron estadísticamente diferentes del Testigo (2,50 frutos/planta). Los resultados de la aplicación de solo Algamix sobre plantas de melón obtenidos en el presente estudio concuerdan con la investigación de Crouch y Staden (1992), quienes encontraron en tomate un aumento de un 10,0% en el número de frutos cosechados cuando se agregó extracto de algas al cultivo con respecto al número de frutos obtenido en el Testigo. Asimismo, Taha y Salih (2014) obtuvieron en el cultivo de pepino un incremento en el número de frutos cosechados cuando aplicaron extracto de algas.

En el presente estudio, al realizar aplicaciones de solo Algamix en las plantas, el número de frutos por planta se incrementó en un 9,6% respecto al Testigo. Se conoce que la aplicación foliar de Algamix en melón a campo abierto en Costa Rica favorece un mayor número de frutos por planta; esta misma respuesta se obtuvo al aplicar Engordone vía foliar en mango (J. E. Monge, datos sin publicar). Monteiro y Mexia (1988) señalan que lo esperado en una producción de melón bajo cultivo protegido, con sistema de tutorado y poda, es dos frutos por

planta, considerando el aborto floral que se da normalmente. Farías et al. (1988), citados por Purquerio et al. (2003), concuerdan con lo mencionado anteriormente e informan que se pueden conseguir de dos a tres frutos por planta en el cultivo de melón en invernadero, manejado verticalmente. Por lo tanto, los resultados obtenidos en este estudio están dentro de lo esperado.

Con respecto al rendimiento según la categoría de peso de los frutos (cuadro 3), las plantas tratadas con solo Algamix produjeron el mayor rendimiento en frutos de 601 a 800 g, y de más de 1001 g (16,68 ton/ha y 11,13 ton/ha, respectivamente); en el caso del rendimiento de frutos de 601-800 g, el resultado obtenido con solo Algamix es estadísticamente superior al logrado por los demás tratamientos. Además, las plantas a las que se les aplicó solo Algamix presentaron un menor rendimiento en frutos no comercializables (<400 g) y en frutos de segunda calidad (401-600 g), con 0,64 y 6,56 ton/ha, respectivamente. Las plantas a las que se les aplicó Raleo Manual más Engordone produjeron el mayor rendimiento en frutos no aceptables para comercializar (2,52 ton/ha), y esto fue estadísticamente diferente de los demás tratamientos. Las plantas a las que se le aplicó solo Engordone mostraron un rendimiento de 23,22 ton/ha en la categoría de frutos con un peso de 801-1000 g, y este resultado es estadísticamente superior al obtenido por los demás tratamientos; además, ese mismo tratamiento presentó el menor rendimiento en la categoría de frutos con un peso superior a 1001 g (6,87 ton/ha).

Cabe mencionar que en el rango de peso de 801 a más de 1001 g se destacó el rendimiento de las plantas tratadas con solo Engordone (30,09 ton/ha), seguido por el de las plantas tratadas con solo Algamix (27,92 ton/ha); ambos tratamientos favorecieron una mayor producción de frutos con peso comercializable, aunque no fueron estadísticamente diferentes del Testigo. Existen varios criterios para definir el peso óptimo de los frutos en el mercado del melón; generalmente en el mercado nacional en Costa Rica se prefieren frutos con un peso cercano o mayor a 1000 g, aunque esto depende del tipo de melón y del precio del producto (J. E. Monge, datos sin publicar). En todo caso, los resultados sugieren que el uso de Algamix solo o Engordone solo, al producir un mayor rendimiento en ciertas categorías comercializables de peso del fruto, podría significar una herramienta importante de producción para el agricultor.

Con respecto a la concentración de sólidos solubles, no se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos. Sin embargo, es importante anotar que el valor promedio obtenido para todos los tratamientos fue superior a 13,0 °Brix, lo cual indica que ésta es una característica genética de alta calidad de este híbrido, dado que un melón con 10,0 °Brix ya se considera de calidad aceptable; Filgueiras et al. (2000) mencionan que el melón Amarillo debe tener mínimo 9,0 °Brix para que sea considerado un fruto de calidad. El porcentaje de sólidos solubles obtenido en la presente investigación supera al obtenido en un estudio realizado por Monge-Pérez (2014a) (12,0 °Brix como promedio), en el que se evaluó la calidad y el rendimiento de melón amarillo JMX-902 bajo las mismas condiciones de producción del presente trabajo; sin embargo, hay que tomar en cuenta que dicho estudio se realizó durante la época lluviosa.

En cuanto a la firmeza del fruto, tampoco se presentaron diferencias significativas entre tratamientos. Ciertamente en Costa Rica aún no se ha determinado el nivel mínimo de firmeza aceptable en frutos de melón, pero en el ámbito de exportación se tiene establecido un valor mínimo recomendable de 1,9 kg/cm² (Monge-Pérez 2011), el cual coincide con el valor promedio de firmeza de la pulpa obtenido en el presente estudio (1,9 kg/cm²), por lo que se considera un resultado satisfactorio. No obstante, en Brasil, Filgueiras et al. (2000) indican que para melón tipo Amarillo la firmeza mínima aceptable es de 2,4 kg/cm². Según Menezes *et al.* (1998), citados por Gomes et al. (2001), la firmeza es un componente importante en la calidad de los frutos y una característica intrínseca a la resistencia contra el deterioro físico y mecánico durante su acarreo y mercadeo. Neibauer y Maynard (2002) informan que la firmeza de la pulpa es una característica ligada a la genética y que muchas veces puede ser un indicador del estado de madurez del fruto.

Cuadro 3. Rendimiento de melón (ton/ha) según categoría de peso del fruto

Tratamiento	CATEGORÍA POR RANGOS DE PESO DEL FRUTO					
	< 400 g	401 - 600 g	601 - 800 g	801 - 1000 g	> 1001 g	Σ 801 - > 1001 g
Testigo	0,64 a	7,81 bc	14,18 c	15,92 bc	8,71 ab	24,63 abc
Raleo Manual	1,26 b	8,03 bc	11,79 bc	12,55 ab	8,52 ab	21,07 a
AlgamiX	0,64 a	6,56 a	16,68 d	16,79 c	11,13 b	27,92 bc
Engordone	1,94 c	8,84 c	9,64 b	23,22 d	6,87 a	30,09 c
AlgamiX+R aleo Manual	1,49 b	6,25 a	11,51 bc	13,92 abc	7,23 a	21,15 a
Engordone+Raleo Manual	2,52 d	7,47 abc	7,17 a	14,12 abc	7,18 a	21,30 a
AlgamiX+Engordone	1,64 bc	8,01 bc	9,30 ab	16,10 c	7,40 a	23,50 ab
AlgamiX+Engordone+Raleo Manual	0,70 a	7,32 abc	12,06 bc	11,98 a	8,06 ab	20,04 a

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$).

Conclusiones y recomendaciones

No se encontraron diferencias estadísticamente significativas respecto a la firmeza del fruto, concentración de sólidos solubles totales, peso promedio, peso comercializable, rendimiento total, rendimiento comercializable y rendimiento por planta en melón, al realizar aplicaciones de productos bioactivadores (AlgamiX y Engordone) y la práctica de raleo manual de frutos. Se presentaron diferencias significativas para el número de frutos por planta de melón, el cual se favoreció al aplicar a las plantas solo Engordone (2,76 frutos/planta) y solo AlgamiX (2,74 frutos/planta) con respecto a otros tratamientos, aunque estos resultados no fueron estadísticamente diferentes del Testigo. Se presentaron diferencias estadísticamente significativas en la distribución de peso categorizado de los frutos. La producción de frutos de melón con un peso de entre 601-800 g fue estadísticamente superior en plantas tratadas con solo AlgamiX (16,68 ton/ha) respecto a los demás tratamientos. La producción de frutos de melón con un peso de entre 801-1000 g fue estadísticamente superior en plantas tratadas con solo Engordone (23,22 ton/ha) respecto a los demás tratamientos.

Se recomienda evaluar la aplicación foliar de los bioactivadores, en vez de la aplicación radicular, así como la utilización de diferentes tipos de híbridos de melón y distintas dosis y momentos de aplicación de AlgamiX y Engordone, con el fin de ampliar el conocimiento sobre el efecto de estas sustancias en el rendimiento y la calidad del melón producido en cultivo protegido. No se recomienda el uso del raleo manual de frutos como práctica en la producción de melón en cultivo protegido, pues no produjo absolutamente ningún resultado positivo sobre el rendimiento o la calidad, además de que es una actividad que demanda mucha mano de obra, lo que representa costos importantes para el productor.

Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración de Julio Vega y Andrés Oviedo en el trabajo de campo. Asimismo, agradecen el financiamiento recibido por parte de la Universidad de Costa Rica para la realización de este trabajo.

Bibliografía

- Blunden, G., Jenkins, T. & Liu, Y. (1997). Enhanced leaf chlorophyll levels in plants treated with seaweed extract. *Journal of Applied Physiology*, 8, 535-543.
- Crouch, I., Beckett, R. & Staden, J.V. (1990). Effect of seaweed concentrate on the growth and mineral nutrition of nutrient stressed lettuce. *Journal of Applied Physiology*, 2, 269-272.
- Crouch, I. & Staden, J.V. (1992). Effect of seaweed concentrate on the establishment and yield of greenhouse tomato plants. *Journal of Applied Physiology*, 4(4), 291-296.
- Dias, R., Silva, C., Costa, N., De Faria, C., De Lima, M., Dos Santos, M., Soares, J., Haji, F., De Assis, J., De Paiva, L., Barboza, G. & De Medeiros, K. (2006). *Desempenho de melão tipo amarelo em diferentes coberturas de solo e sob cultivo temporariamente protegido no Vale do São Francisco*. XLVI Congresso Brasileiro de Olericultura. Resúmenes. Goiânia, Brasil.
- Filgueiras, H.A.C., Menezes, J.B., Alves, R.E., Costa, F.V., Pereira, L.S.E. & Júnior, J.G. (2000). *Colheita e manuseio pós-colheita*. En: R.E. Alves (Org.). Melão: pós-colheita. Série Frutas do Brasil, 10. Brasília, Embrapa. Obtenido de http://www.ceinfo.cnpat.embrapa.br/arquivos/artigo_1471.pdf
- Gomes, J., Menezes, J., Nunes, G., Costa, F. & Souza, P. (2001). Qualidade pós-colheita de melão tipo cantaloupe, colhido em dois estádios de maturação. *Horticultura Brasileira*, 19(3), 356-360.
- Khan, W., Rayirath, U., Subramanian, S., Jithesh, M., Rayorath, P., Hodges, D., Critchley, A., Craigie, J., Norrie, J. & Prithviraj, B. (2009). Seaweed extracts as biostimulants of plant growth and development. *Journal of Plant Growth Regulation*, 28, 386-399.
- Koetz, M., Coelho, G., Carvalho, J., De Souza, R. & Da Silva, R. (2006). Produção do meloeiro em ambiente protegido irrigado com diferentes lâminas de água. *Revista Irriga*, 11(4), 500-506.
- LIDA PLANT RESEARCH. (2010a). *Algamix, bioactivador a base de algas marinas*. Ficha técnica. Valencia, España.
- LIDA PLANT RESEARCH. (2010b). *Engordone, crecimiento energético para el crecimiento del fruto*. Ficha técnica. Valencia, España.
- Miguel, A.A., Pinho, J.N.D., Crisóstomo, J. & Melo, R.F.D. (2008). Comportamento produtivo e características pós-colheita de híbridos comerciais de melão amarelo, cultivados nas condições do Litoral do Ceará. *Ciência e Agrotecnologia*, 32(3), 756-761.
- Monge-Pérez, J.E. (2011). *Aspectos de calidad en la producción de melón*. En: Taller de producción de melón en invernadero, realizado el 15 de julio de 2011. Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Universidad de Costa Rica.
- Monge-Pérez, J.E. (2014a). *Metodología para la selección de genotipos de melón (Cucumis melo), destinado a producción bajo ambiente protegido en Alajuela, Costa Rica*. Informe de proyecto de investigación. Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno. Universidad de Costa Rica.
- Monge-Pérez, J.E. (2014b). Producción y exportación de melón (*Cucumis melo*) en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 27(1), 93-103.
- Monteiro, A. & Mexia, J. (1988). Influência da poda e do número de frutos por planta na qualidade dos frutos e produtividade do melão. *Horticultura Brasileira*, 6(1), 9-12.
- Neibauer, J. & Maynard, E. (2002). *Información poscosecha: normas de calidad del USDA*. Universidad de California en Davis. Obtenido de http://www.hort.purdue.edu/prod_quality/commodities/muskmelon.html
- Purquerio, L., Cecílio, A. & Barbosa, J. (2003). Efeito da concentração de nitrogênio na solução nutritiva e do número de frutos por planta sobre a produção do meloeiro. *Horticultura Brasileira*, 21(2), 185-190.
- Reche, J. (2009). *Cultivo del melón en invernadero*. Junta de Andalucía, Consejería de Agricultura y Pesca. Obtenido de http://www.juntadeandalucia.es/opencms/opencms/system/bodies/contenidos/publicaciones/pubcap/2008/pubcap_2541/melon_baja.pdf

- Senn, T.L. (1987). *Crecimiento de alga y planta*. California del Sur, Estados Unidos.
- Taha, S. & Salih, I. (2014). Effect of low temperature and seaweed extracts on flowering and yield of two cucumber cultivars (*Cucumis sativus* L.). *International Journal of Agricultural and Food Research*, 3(1), 41-54.
- Taiz, L. & Zeiger, M. (2006). Citoquininas: Reguladores de la división celular. En: *Fisiología Vegetal*. Capítulo 21. 3 ed. Universitat Jaume I. Vol. 2.
- Torres, J. & Miquel, M. (2003). La geografía del comercio del melón. *Horticultura Internacional*, 40, 16-25.
- Torres, M. (2013). *Evaluación de frecuencia y dos concentraciones de aplicación de bioestimulante (BIOZYME®) en la floración de berenjenas (Solanum melongena L.) para reducir los costos del cultivo*. Tesis para optar por el grado de Licenciatura, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. Santiago.
- Whapham, C., Blunden, G., Jenkins, T. & Hankins, S. (1993). Significance of betaines in the increase of chlorophyll content of plants treated with seaweed extract. *Journal of Applied Physiology*, 5, 231-234.
- Zamani, A., Khorasaninejad, S. & Kashefi, B. (2013). The importance role of seaweeds of some characters of plant. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 5(16), 1789-1793.

Estudio de la influencia de los parámetros de corte en la integridad superficial y las desviaciones durante el fresado del acero AISI 1010

Study of influences of cutting variables on superficial integrity and deflections in milling of AISI 1010 steel

Luis Wilfredo Hernández-González ¹, Roberto Pérez-Rodríguez ²,
Luminita Dumitrescu³, Romilio Montero-Sarmiento⁴

Fecha de recepción: 25 de marzo del 2015
Fecha de aprobación: 3 de junio del 2015

Hernández, González, L; Pérez-Rodríguez, R; Dumitrescu, L; Montero-Sarmiento, R. Estudio de la influencia de los parámetros de corte en la integridad superficial y las desviaciones durante el fresado del acero AISI 1010. *Tecnología en Marcha*. Vol. 28, N° 4, Octubre-Diciembre. Pág 26-41.

-
- ¹ PhD, Profesor Titular. Universidad de Holguín. Cuba. Correo electrónico: wilfredo@facing.uho.edu.cu
 - ² PhD, Profesor Titular. Director del Centro de Estudios CAD/CAM. Universidad de Holguín. Cuba. Correo electrónico: roberto.perez@facing.uho.edu.cu
 - ³ M.Sc. Profesora Auxiliar. Profesora Principal de Ciencias de los Materiales. Universidad de Holguín. Cuba. Correo electrónico: dumitrescul@facing.uho.edu.cu
 - ⁴ Ingeniero Mecánico, Profesor Asistente. Correo electrónico: romilio@facing.uho.edu.cu. Universidad de Holguín. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Mecánica. Avenida XX Aniversario s/n. Piedra Blanca. Holguín. GP 57. CP 80100. Cuba.

Palabras clave

Parámetros de corte; integridad superficial; desviaciones; fresado; acero AISI 1010.

Resumen

Este trabajo presenta un estudio experimental de la influencia de la velocidad de corte y el avance en el fresado en seco de una superficie plana de acero AISI 1010, utilizando una fresa cilíndrica de acero de corte rápido, sobre la microestructura, el tamaño del grano, la dureza, la rugosidad superficial y las desviaciones de la pieza maquinada. Los resultados muestran que, para las condiciones de corte establecidas, el fresado no provocó cambios en la microestructura del acero, mientras que aumentaron el tamaño del grano y la dureza de la pieza maquinada con relación a la pieza inicial. Los valores registrados de rugosidad superficial fueron apropiados, el efecto del avance fue variable, mientras que el menor valor de rugosidad se registró para el mayor valor de velocidad de corte. Las desviaciones de la pieza maquinada aumentaron con el incremento de los parámetros de corte, siendo la velocidad de corte la que mostró un mayor efecto. Finalmente, se seleccionaron las condiciones de corte más adecuadas, teniendo en cuenta los resultados obtenidos y las recomendaciones tecnológicas.

Keywords

Cutting variables; superficial integrity; deflections; milling; AISI 1010 steel.

Abstract

This work presents the experimental study of influence of cutting speed and feed in dry plain milling of AISI 1010 steel, with a cylindrical milling cutter of high speed steel, in microstructure, grain size, hardness, surface roughness, as well as workpiece deflections. The results showed for cutting conditions that, milling did not cause changes in steel microstructure, while grain size and hardness grew up, with relation to original workpiece data. The measured values of surface roughness were acceptable; the feed effect was irregular, though the roughness lowest value for highest cutting speed was recorded. The increase of machining conditions caused an increase of workpiece deflections; while cutting speed produced a higher effect. Finally, the most suitable cutting conditions were chosen, in view of the presented results and technological recommendations.

Introducción

El corte de metales es un proceso complejo que involucra un conjunto de variables, tales como deformaciones elásticas y plásticas del material que se mecaniza, generación de calor, endurecimiento de la superficie maquinada, contracción de la viruta, formación de bordes recocidos y aparición de las fuerzas de resistencia al corte, entre otras. El grado de endurecimiento de la superficie maquinada, de la viruta y de su superficie de corte es una característica, junto con la contracción de la viruta, del grado de deformación plástica del metal en el proceso de corte.

Las operaciones de maquinado tienen un gran impacto en importantes variables del corte de metales, entre las que se destacan las siguientes: el desgaste de la herramienta, las fuerzas de corte y la integridad superficial de la pieza maquinada.

Los requerimientos de integridad superficial se pueden catalogar como: integridad superficial geométrica (rugosidad superficial, exactitud dimensional) e integridad superficial física (tensiones residuales, cambios de microestructura, dureza) (Karpát, 2007).

El desempeño funcional de un componente fabricado es altamente afectado por la calidad y la fiabilidad de la superficie elaborada en términos de topografía, así como en el estado metalúrgico y mecánico de la capa subsuperficial. En las últimas décadas, varias investigaciones han indagado en la relación entre los parámetros del proceso de maquinado, la naturaleza de las alteraciones producidas en la superficie y sus efectos en el desempeño funcional del producto. La tendencia ha estado enfocada en satisfacer la creciente demanda en el desempeño, fiabilidad y durabilidad del artículo, lo que estimula el desarrollo de materiales con resistencia mejorada ante condiciones severas de trabajo y ambientes agresivos, junto con el desarrollo de nuevos métodos de fabricación (M'Saoubi, Outeiro, Chandrasekaran, Dillon & Jawahir, 2008).

Existen dos tipos fundamentales de elaboraciones en el maquinado, el desbaste y el acabado. En la pasada de desbaste, se pretende eliminar la máxima cantidad de material y acercarse a la forma final, sin que interese de manera considerable la rugosidad superficial ni las tolerancias. Mientras que en la pasada de acabado, el objetivo es lograr la máxima precisión y la rugosidad superficial establecida en el proceso de diseño.

Entre las operaciones de maquinado, el fresado es ampliamente utilizado en la mayoría de las industrias de fabricación, debido a la posibilidad de obtener superficies geométricas complejas con razonable exactitud y rugosidad superficial. A continuación, se muestra un resumen de los trabajos investigativos más relevantes en el fresado de aceros al carbono.

Análisis del estado del arte

Los principales estudios realizados en el fresado de aceros al carbono se muestran en el cuadro 1.

Cuadro 1. Principales estudios realizados en el fresado de aceros al carbono.

Autores y año	Fresa / condiciones	Acero a elaborar	Variables independientes	Variables dependientes
(Kumar & Venkateswara, 2005)	Carburo recubierta	AISI 1045	Velocidad de corte, avance, ángulo radial de ataque y radio de la punta	Rugosidad superficial
(Chang & Lu, 2006)	Acero de corte rápido recubierta	AISI 1045	Velocidad de corte, avance por diente, profundidad radial y axial de corte	Rugosidad superficial
(Palanisamy, Rajendran & Shanmugasundaram, 2007)	Acero de corte rápido	AISI 1060	Velocidad de corte, avance por diente, profundidad de corte	Rugosidad superficial, vida útil de la herramienta, tiempo de maquinado y fuerza de corte
(Öktem, 2009)	Recubierta / refrigerante	AISI 1040	Velocidad de corte, avance por diente, profundidad axial y radial de corte	Rugosidad superficial

Continúa...

... Continuación

Autores y año	Fresa / condiciones	Acero a elaborar	Variables independientes	Variables dependientes
(Saffar & Razfar, 2010)	Acero de corte rápido	AISI 1045	Avance, profundidad axial y radial	Fuerza de corte axial
(Nas & Demir, 2010)	Carburo cementado recubierto	AISI 1050	Número de insertos, velocidad de corte, avance por diente y profundidad de corte	Rugosidad superficial
(Patwari, Nurul & Faris, 2010)	Carburo	AISI 1045	Velocidad de corte, profundidad axial y avance por diente	Estabilidad de formación de la viruta
(Rodrigues, Matsumoto, Yamakami, Paulo & Assis, 2010)	Carburo cementado recubierto	De baja aleación	Velocidad de corte, profundidad y avance por diente	Dureza y rugosidad superficial
(Silva et al., 2011)	P40 recubierta / lubricación mínima, con fluidos y en seco	AISI 1047	Velocidad de corte y avance por revolución	Volumen de metal cortado, desgaste y rugosidad superficial
(Zailani, Hamidon, Hussin, Hamzas & Hadi, 2011)	Acero de corte rápido / refrigerante y refrigerante con lubricante sólido	Medio contenido de carbono	Velocidad de corte y avance	Desgaste y rugosidad superficial
(Choubey, Chaturvedi & Vimal, 2012)	Acero de corte rápido / refrigerante	Medio contenido de carbono	Velocidad, avance, profundidad y ancho de corte	Rugosidad superficial y volumen de metal cortado
(Braga, Neves, Silva & Parreiras, 2012)	-	AISI 1045	Número de dientes, ángulo de posición y velocidad de corte	Fuerzas y potencia de corte
(Rodrigues et al., 2012)	Carburo cementado recubierto	Bajo contenido de carbono, con tamaño de grano estándar y ultrafino	Avance por diente, velocidad y profundidad de corte	Microestructura y microdureza
(Thakre, 2013)	Carburo / refrigerante	AISI 1040	Cantidad de fluido, velocidad, avance, profundidad y ancho de corte	Rugosidad superficial
(Syahmi, Mat & Razlan, 2013)	- / lubricación mínima, refrigerante y en seco	AISI 1060	Avance por minuto, profundidad y velocidad de corte	Rugosidad superficial
(Badrinathan & Karunamoorthy, 2013, 2014).	Inserto WIDIA PA120 recubierto	AISI 1045	Avance (progresivo y normal), profundidad y velocidad de corte	Fuerza de corte
(Shaikh, Boubekri & Scharf, 2014).	Carburo / microlubricación	AISI 1018	Avance y velocidad de corte	Desgaste, volumen de metal cortado y microdureza

La revisión anterior muestra la inexistencia de estudios en los que se determine el efecto del avance y de la velocidad de corte en la dureza, el tamaño del grano, la rugosidad superficial y las desviaciones de la pieza maquinada, durante la operación de fresado de una superficie plana de acero al carbono con una fresa cilíndrica. Por tanto, el objetivo de la presente investigación es llenar ese vacío.

Desarrollo

A continuación, se expone el procedimiento experimental utilizado en este estudio, incluyendo la caracterización del material de la herramienta de corte y de la probeta. Además, se analiza el montaje experimental y el diseño de la investigación.

Procedimiento experimental

Material de la pieza

El acero AISI 1010 es el material seleccionado, que se obtuvo en los procesos de fundición y laminado en caliente, es de bajo porcentaje de carbono y límite de rotura, cuya propiedad más importante es su ductilidad. Este acero se utiliza en general para piezas que exigen alta plasticidad, como paneles de automóviles, clavos y alambres (Callister, 2007), además, en la fabricación de ruedas dentadas, árboles y ejes poco cargados. Es decir, para fabricar elementos de máquina que requieren ser fácilmente soldados, maquinados y conformados.

La composición química del acero AISI 1010 se determinó utilizando el método de cuantometría atómica. En el cuadro 2 se presentan los resultados obtenidos.

Cuadro 2. Resultados de la composición química del acero AISI 1010.

Elementos de aleación	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
Concentración (%)	balance	0,082	0,168	0,57	0,013	0,015	0,117	0,089	0,43

Las dimensiones de las probetas utilizadas para el mecanizado son las siguientes: 48 mm de largo, 33 mm de ancho y 20 mm de espesor.

Selección de la máquina herramienta

Se seleccionó la fresadora universal para utillaje modelo FUS 22, perteneciente al laboratorio de maquinado. Sus principales características son las siguientes: potencia del motor principal 1,4 kW, frecuencia de rotación del husillo del cabezal horizontal de 63 r/min a 1 250 r/min, valores de avance de 12,5 mm/min a 250 mm/min. Además presenta varios accesorios, tales como cabezal vertical, cabezal rápido y cabezal divisor.

Selección de la herramienta de corte

Como herramienta de corte se seleccionó una fresa cilíndrica de dientes helicoidales, fabricada con acero de corte rápido P18, cuya composición química se muestra en el cuadro 3.

Cuadro 3. Composición química del acero de corte rápido P18 (%) (Martínez & Gordon, 1985).

Fe	C	Cr	W	V	Mo	Mn	Si	Ni	P	S
Balance	0,7 - 0,8	3,8 - 4,4	17,5 - 19	1,0 - 1,4	0,2 - 0,3	0,4	0,4	0,4	0,03	0,03

La fresa presenta las características siguientes: ángulo de hélice de $\beta = 24^\circ$, diámetro exterior $D_e = 40$ mm, diámetro interior $D_i = 16$ mm, número de dientes $t = 10$, longitud $L_f = 50$ mm. Para su montaje, presenta un agujero cilíndrico con un chavetero.

Selección de las condiciones de corte

Para el experimento se seleccionaron tres valores de velocidad de corte (7,91; 31,4 y 79,13) m/min y tres de avance (12,5; 50 y 160) mm/min, manteniendo constante la profundidad de corte (1 mm), el fresado se realizó en seco. Estos parámetros de corte fueron seleccionados teniendo en cuenta los aspectos siguientes: los resultados de la revisión del estado del arte, las características de la fresadora, las dimensiones y material de las probetas, las dimensiones y material de la herramienta, así como la rigidez del sistema tecnológico (máquina herramienta - herramienta de corte - dispositivo - probeta).

Diseño y montaje experimental

A continuación, se explica el diseño y montaje experimental utilizado para determinar los efectos de la velocidad de corte (v , m/min) y del avance (f , mm/min), en el tamaño del grano (T_g , mm), microestructura, dureza (HB) y rugosidad superficial (R_a , μm) de la pieza fresada, así como las desviaciones de la pieza (D , mm), durante el fresado en seco de una pieza plana de acero al carbono AISI 1010 con una fresa cilíndrica.

Primero se cortaron e identificaron tres probetas con las dimensiones siguientes: 48 mm de largo, 33 mm de ancho y de espesor 20 mm. Después se realizó el fresado en orden aleatorio, utilizando tres valores de velocidad de corte y tres de avance, manteniendo constante la profundidad de corte. La matriz del experimento se presenta en el cuadro 4.

La probeta se fijó a la mesa de la máquina (ver figura1) por medio de una mordaza. El método de fresado utilizado fue el convencional, con un movimiento de avance longitudinal de la mesa.

Cuadro 4. Matriz del experimento.

Nr.	Orden del experimento	Variables independientes		Variables dependientes			
		v (m/min)	f (mm/min)	T_g (mm)	R_a (μm)	HB (kg/mm ²)	D (mm)
1	4	7,91	12,50	-			
2	9	7,91	50,00				
3	7	7,91	160,00	-			
4	1	31,40	12,50	-			
5	5	31,40	50,00				
6	3	31,40	160,00	-			
7	8	79,13	12,50	-			
8	2	79,13	50,00				
9	6	79,13	160,00	-			

El fresado se realizó con una fresa cilíndrica de acero de corte rápido. Para registrar las desviaciones de la pieza se utilizó un indicador de carátula, que se fijó sobre la columna horizontal, mientras que el palpador se colocó sobre la mesa de la máquina herramienta (figura1).

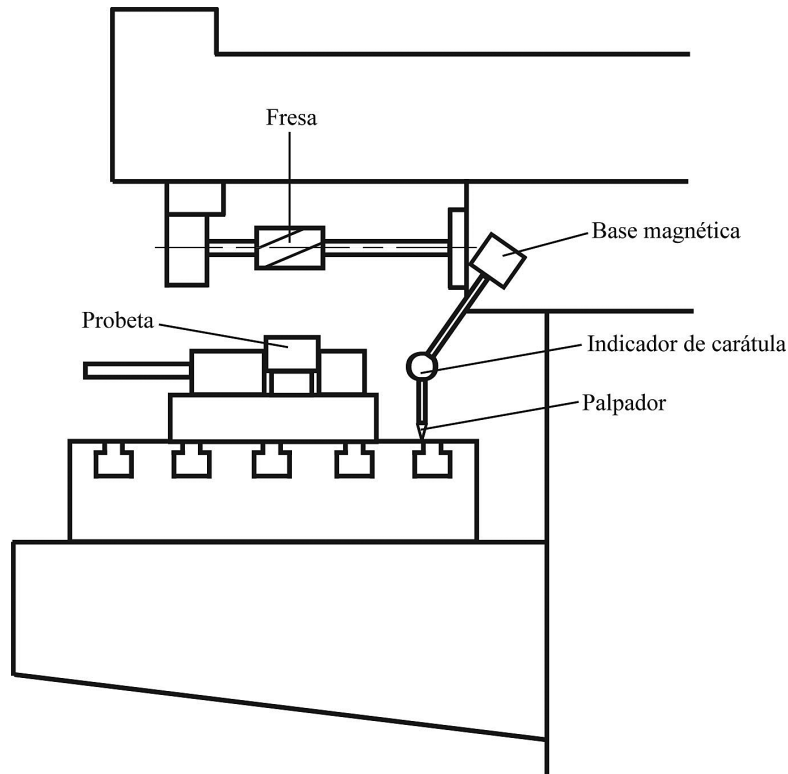


Figura 1. Montaje experimental.

Preparación, pulido, ataque químico y revelación de la microestructura de las probetas

Las dimensiones de las probetas fueron 10 mm x 10 mm x 10 mm, luego se encapsularon en baquelita. Posteriormente, se pulieron con varias lijas de carburo de silicio (SiC), utilizando varios números. Para obtener el acabado final, el pulido se realizó en un paño con partículas abrasivas de alúmina de 0,5 μm . Todas estas operaciones se realizaron utilizando agua.

Además, se seleccionaron tres probetas maquinadas para el análisis metalográfico, de acuerdo con el orden del experimento fueron los números 2, 5 y 8 (cuadro 4), para las tres velocidades de corte y avance constante (50 mm/min). El procedimiento antes descrito también se utilizó para pulir las probetas fresadas.

Para revelar los constituyentes estructurales de la superficie plana de la muestra, se utilizó un microscopio óptico modelo NJF-120A. El tamaño del grano se determinó por comparación, utilizando las diferentes muestras patrones de microestructuras, según la Norma Cubana NC 05-08 (Normalización, 1985).

Medición de la dureza

La dureza fue medida ocho veces en diferentes puntos de las probetas, utilizando un durómetro digital modelo HRS-150.

Análisis estadístico de los valores de dureza

Al realizar mediciones repetidas de un mismo parámetro o característica, pueden obtenerse valores individuales que a simple vista resultan extraños o sospechosos porque presentan una marcada diferencia con respecto a los demás valores obtenidos. En general, aplicando las propiedades de la curva de distribución normal, pueden detectarse y eliminarse los valores anormales procediendo de la siguiente forma:

1. Para el conjunto de los valores obtenidos en la medición, se calculan la media (\bar{x}) y la desviación típica (S).
2. Se establece el intervalo dado por: $\bar{x} \pm T \cdot S$, y se eliminan todos los valores que quedan fuera de dicho intervalo por considerarse anormales.
3. Se realizan nuevamente los cálculos necesarios para expresar el resultado elaborado o final, sin considerar los valores anormales.

Las expresiones para determinar \bar{x} y S son 1 y 2:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2)$$

Para un 95% de confianza, le corresponde un valor de $T = 1,96$ (Bernard, 1981).

Montaje experimental para medir desviaciones

En la figura 1 se observa el montaje para medir las desviaciones que ocurren durante el fresado. La base magnética del indicador de carátula se colocó en el cabezal y el palpador sobre la mesa de la fresadora.

Determinación de la rugosidad superficial

Varios especialistas de la empresa de la Oficina Territorial de Normalización de Holguín, Cuba determinaron la rugosidad superficial utilizando muestras patrón de comparación.

Resultados y discusión

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en la presente investigación, así como su discusión.

Microestructura

En la figura 2 se muestran las microestructuras del acero AISI 1010 de la probeta original (a) y de las fresadas con velocidades de corte $v = 7,91$ m/min (b), $v = 31,40$ m/min (c) y $v = 79,13$ m/min (d), utilizando un avance constante (50 mm/min), para una amplificación 100x. En ellas se aprecia una estructura de 90% de ferrita y 10% de perlita; se considera que no hubo un cambio sustancial de la microestructura del acero después de la operación de maquinado.

En la microestructura maquinada con velocidad de corte de 79,13 (figura 2d), la imagen se ve más oscura porque al parecer tuvo un mayor ataque químico. Se observa una mayor cantidad

de perlita a diferencia de las demás imágenes; esto puede estar relacionado con el proceso de rastreo realizado para la observación de la superficie de la probeta, cuya constitución no es homogénea. También se aprecia un incremento del tamaño del grano.

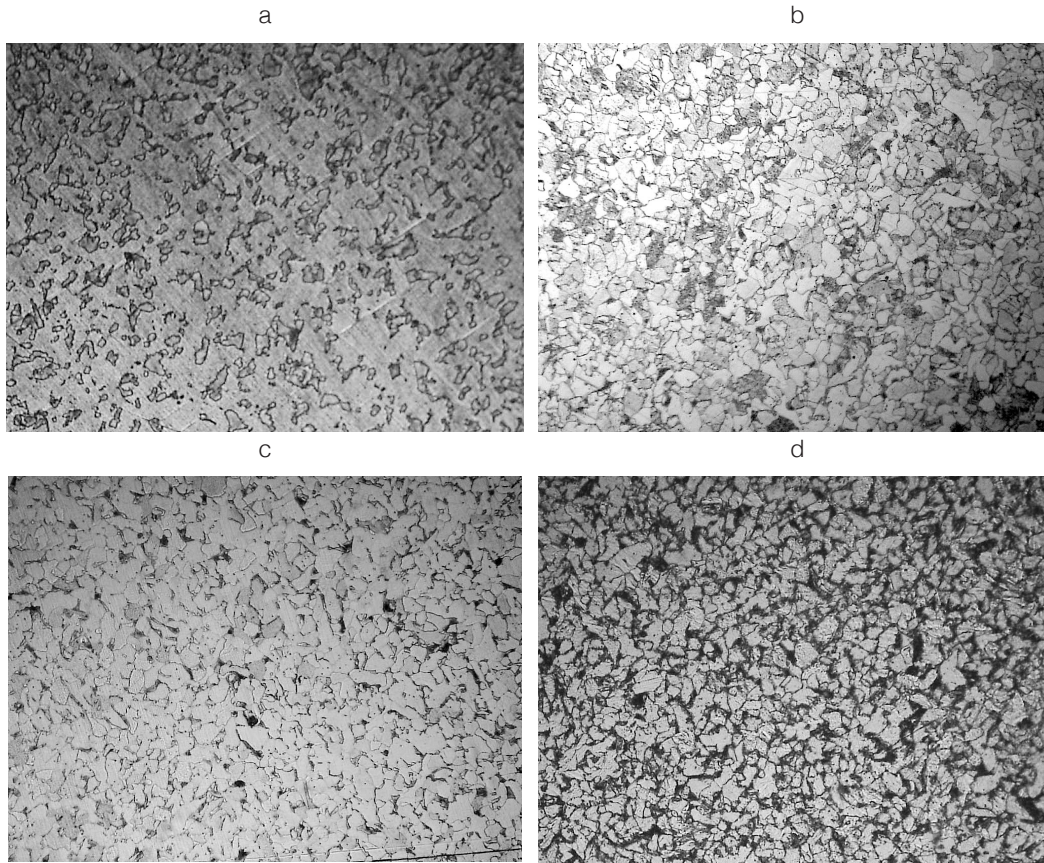


Figura 2. Microestructura del acero AISI 1010 para la probeta original (a), después de maquinada con $v = 7,91$ m/min (b), $v = 31,40$ m/min (c) y $v = 79,13$ m/min (d), para una ampliación $\times 100$.

Tamaño del grano

Según Rodrigues y colaboradores (2012), la microestructura de la superficie maquinada es más sensible para piezas con grano de mayor tamaño, y los parámetros de corte que mayor influencia tienen en la deformación del grano son la velocidad de corte y la profundidad.

En la figura 3 se muestra el efecto de la velocidad de corte en el tamaño del grano del acero AISI 1010 para un avance constante. Al utilizar la menor velocidad de corte (7,91 m/min), el tamaño del grano creció un 100% con respecto al tamaño inicial. Además, cuando se maquinó a las velocidades de corte intermedia y máxima, su tamaño aumentó un 184%, con respecto al original.

Durante el maquinado se producen deformaciones elástico-plásticas. La deformación plástica durante el corte de metales consiste en el desplazamiento de ciertas capas de metal respecto a otras a lo largo de los llamados planos de deslizamiento, los cuales coinciden en su mayor parte con la dirección de las fuerzas cortantes máximas.

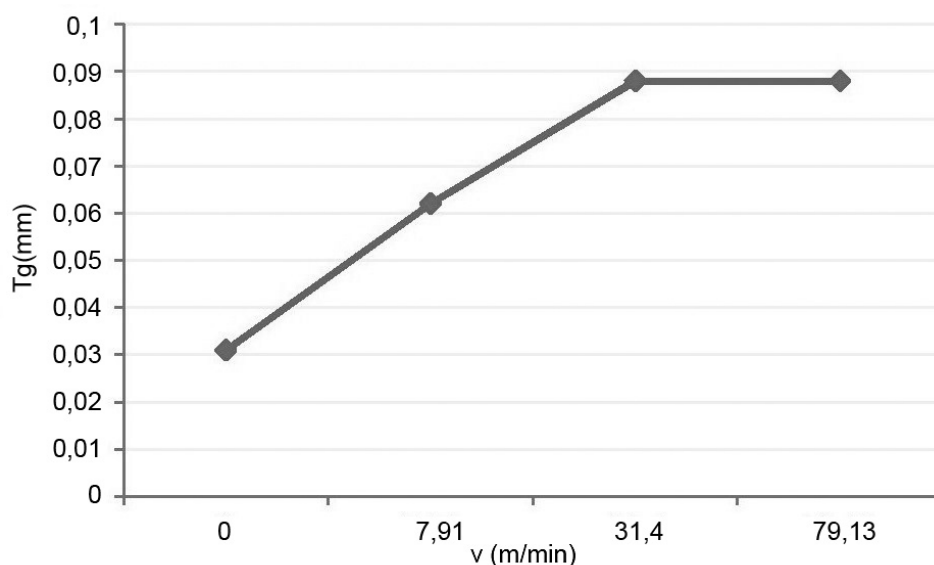


Figura 3. Efecto de la velocidad de corte en el tamaño del grano.

Como resultado de este desplazamiento, cambia la forma de las fibras, su tamaño y posiciones relativas. El proceso de deformación plástica está acompañado de una gran generación calor y cambio en las propiedades del metal. Uno de estos cambios es el crecimiento de su dureza, con el correspondiente incremento de su fragilidad (Arshinov & Alekseev, 1970). Por tanto, el aumento del tamaño del grano está relacionado con la deformación plástica del acero producida por el aumento de la velocidad de corte.

Dureza

La medición de la dureza se efectuó ocho veces en la probeta original y en las probetas maquinadas.

Los valores extraños de dureza HRB fueron los siguientes: para la probeta original (ninguno), para la medición número de orden 1 (77), para el 2 (78,8), para el 3 (79,9), para el 4 (91,8), para el 5 (ninguno), para el 6 (90,4), para el 7 (75,2), para el 8 (98,3) y para el 9 (60,1).

Después de que se eliminaron los valores extraños de dureza y se determinó el promedio, se convirtieron de HRB a HB, según ASM (1998).

La figura 4 muestra el efecto del avance (a) y de la velocidad de corte (b) en la dureza del acero elaborado. Se aprecia un incremento promedio de un 56% de la dureza de la pieza maquinada con respecto a la dureza original, lo que podría estar relacionado con el endurecimiento de la pieza resultante de la deformación plástica que se produce debido al corte.

También se observa una ligera disminución de la dureza de la pieza con el incremento del avance y la velocidad de corte, lo que coincide con el estudio de Rodrigues y colaboradores (2010); esto puede estar vinculado con el hecho de que el aumento del avance y de la velocidad de corte también incrementa la temperatura generada (Silva, 2007) y, por tanto, disminuye la resistencia del material.

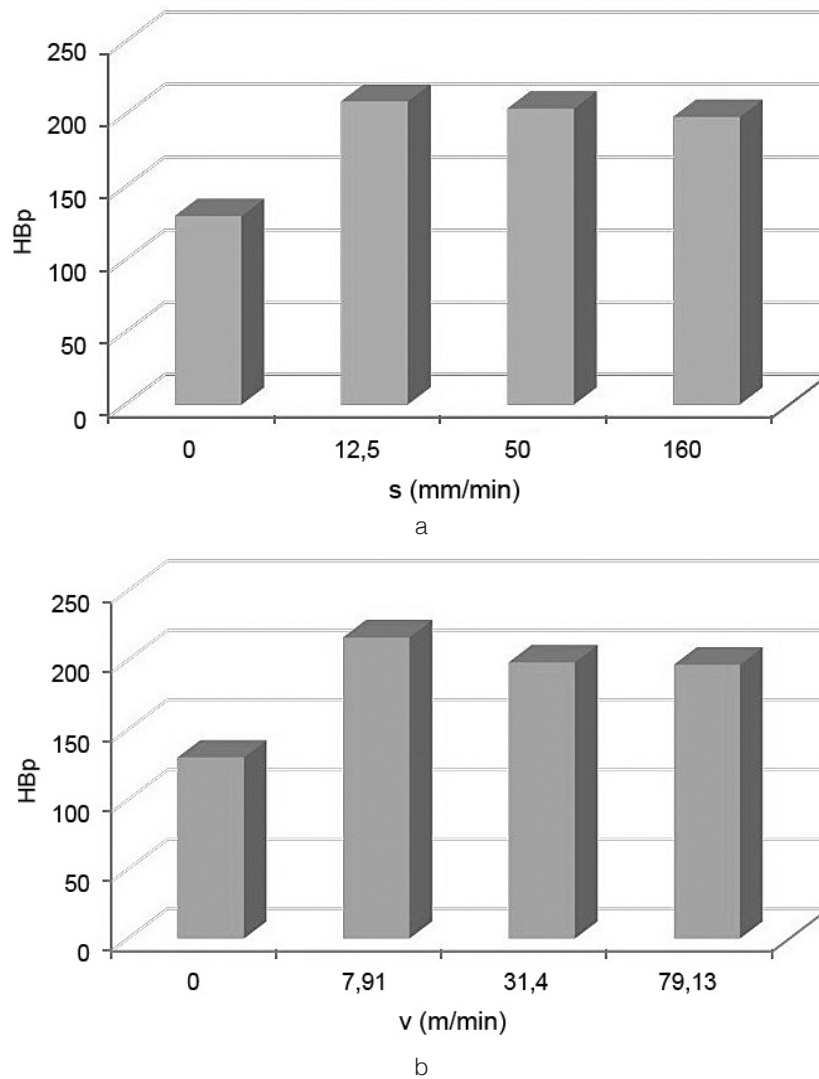


Figura 4. Efecto del avance (a) y la velocidad de corte (b) en la dureza promedio de la pieza.

Rugosidad superficial

En la figura 5 se observa el efecto del avance y de la velocidad de corte en la rugosidad superficial de la pieza maquinada. La rugosidad superficial registrada en las condiciones de elaboración varió entre $0,6 \mu\text{m}$ y $3,4 \mu\text{m}$, valores que se pueden considerar satisfactorios para una operación de fresado con fresa cilíndrica. En general, se obtuvieron mejores resultados después de maquinar a mayores valores de velocidad de corte y medio de avance.

El resultado de la velocidad de corte coincide con lo que generalmente es aceptado y con los estudios de Kumar y Venkateswara (2005), Nas y Demir (2010) y Choubey y colaboradores (2012).

En cuanto al avance, usualmente se admite que la rugosidad superficial aumenta con el aumento del avance, pero no en proporción lineal (Chang & Lu, 2006). En el presente estudio se obtuvo un mayor valor de rugosidad superficial a menor avance, coincidiendo con la investigación de Silva y colaboradores (2011). La causa probable es la formación del borde recrecido en la superficie de ataque de la herramienta.

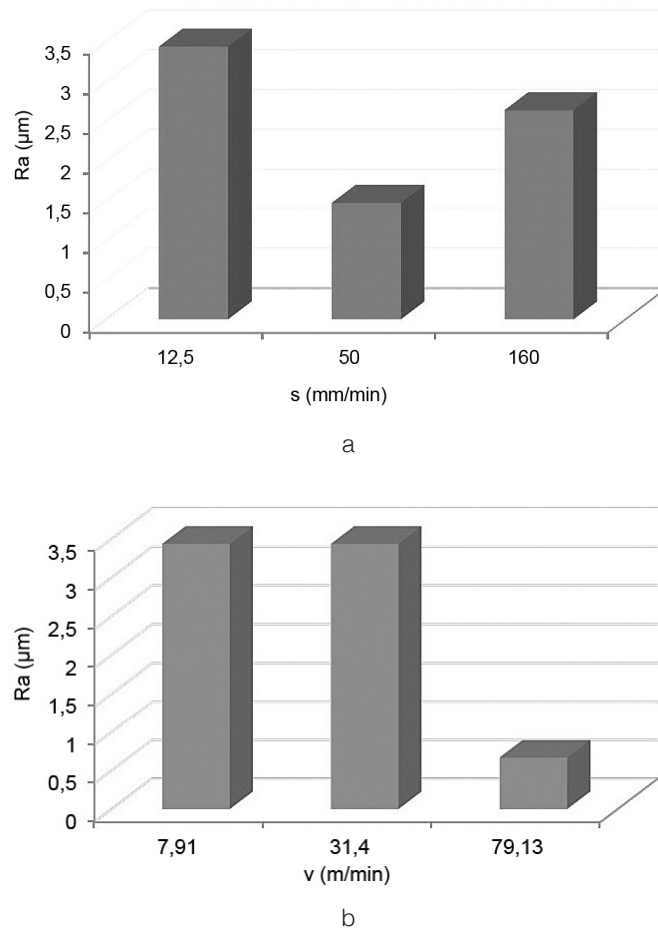


Figura 5. Efecto del avance (a) y de la velocidad de corte (b) en la rugosidad superficial de la pieza maquinada.

Desviaciones

En la figura 6 se observa el efecto del avance y de la velocidad de corte en las desviaciones de la pieza durante el fresado.

Para un incremento de la velocidad de corte de un 90% (de 7,91 m/min a 79,13 m/min), las desviaciones crecieron un 46,4% (de 0,143 mm a 0,267 mm). Por su parte, el aumento del avance en un 92,2% (de 12,5 mm/r a 160 mm/r) provocó un crecimiento de las desviaciones de un 18,1% (de 0,18 mm a 0,22 mm). Lo anterior permite apreciar que el incremento de la velocidad de corte mostró un mayor efecto en el aumento de las desviaciones de la pieza.

Este resultado puede estar vinculado a las particularidades de la operación de fresado, que es un corte discontinuo, es decir, a saltos, en el que cada diente participa en el corte un periodo de tiempo muy pequeño, provocando un aumento de las vibraciones y desviaciones, al aumentar la velocidad de corte y el avance.

El resultado podría considerarse similar al obtenido por Saffar y Razfar (2010), quienes observaron durante el fresado frontal que el aumento del avance incrementó la desviación de la herramienta de corte.

Por otro lado, para el fresado frontal, Patwari y colaboradores (2010) indican que un incremento del avance disminuye la inestabilidad (frecuencia de corte de la viruta), mientras que un incremento de la velocidad de corte aumenta la inestabilidad.

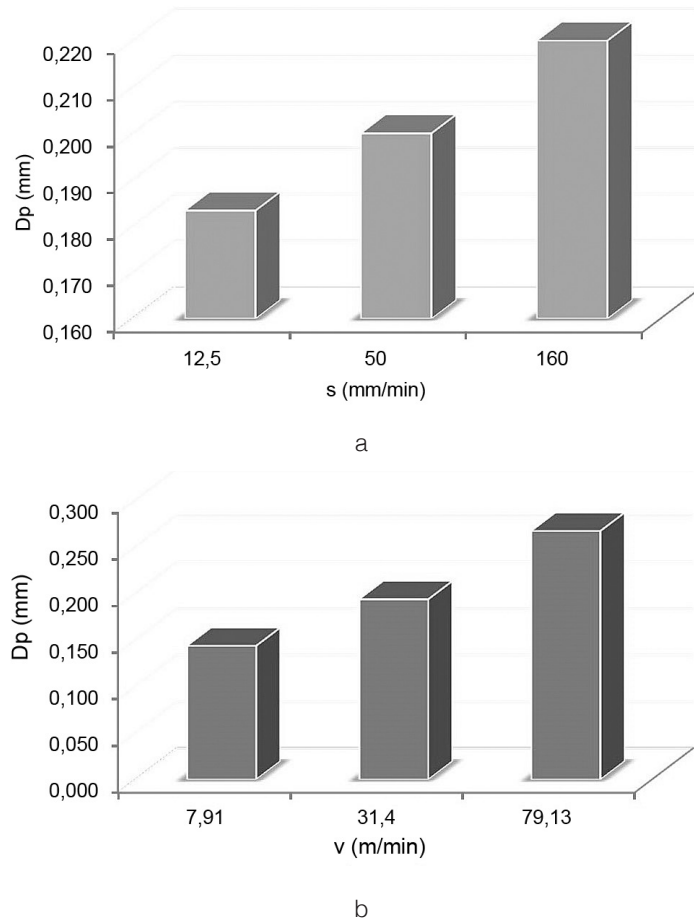


Figura 6. Efecto del avance (a) y la velocidad de corte (b) en las desviaciones de la pieza.

Selección de los parámetros de corte más adecuados

A continuación, se realiza una selección de los parámetros de corte más adecuados para las condiciones de maquinado establecidas, según el tipo de elaboración, es decir, desbaste o acabado (cuadro 5).

Según el tamaño del grano, a medida que este aumenta, crece la maquinabilidad del acero. Por ello, para la elaboración de desbaste se selecciona el valor de velocidad de corte que proporciona mayor T_g , mientras que para el acabado se considera el resultado opuesto.

Para la dureza de la pieza maquinada en la elaboración de desbaste, se seleccionan los valores de avance y velocidad de corte que menor dureza proporcionan, que coinciden con los valores máximos de estos parámetros y, por tanto, también garantizan una mayor productividad. Para el acabado se seleccionan los valores de parámetros de corte que mayor dureza revelaron, lo que podría ser favorable para el desempeño funcional de una pieza fabricada con este acero.

En cuanto a la rugosidad superficial, como en el desbaste no es un factor relevante, se seleccionaron los valores máximos de avance y velocidad de corte para lograr una mayor productividad. Para el acabado se seleccionaron los parámetros de corte que menor rugosidad superficial suministraron.

Finalmente, teniendo en cuenta las desviaciones registradas de la pieza durante el fresado, para el desbaste se seleccionaron los mayores parámetros de corte, puesto que para este tipo de elaboración no resultan trascendentales la exactitud ni la rugosidad superficial. Sin embargo, para el acabado se seleccionaron los valores de f y V que provocaron menores desviaciones.

Cuadro 5. Parámetros de corte más adecuados según el tipo de elaboración.

Tipo de elaboración	Tamaño del grano	Dureza HB	Rugosidad superficial (Ra)	Desviaciones
Desbaste		$f = 160$ mm/min	$f = 160$ mm/min	$f = 160$ mm/min
	$v = 79,13$ m/min	$v = 79,13$ m/min	$v = 79,13$ m/min	$v = 79,13$ m/min
Acabado		$f = 12,5$ mm/min	$f = 50$ mm/min	$f = 12,5$ mm/min
	$v = 7,91$ m/min	$v = 7,91$ m/min	$v = 79,13$ m/min	$v = 7,91$ m/min

Un análisis global de los resultados nos permite plantear que, para la elaboración de desbaste, los valores máximos de los parámetros de corte son los más adecuados.

Mientras que para el acabado, el avance mínimo fue preferente si se considera la dureza y las desviaciones de la pieza maquinada, el valor medio fue mejor para la rugosidad superficial. Además, la menor velocidad de corte fue destacada excepto para la rugosidad superficial, en la que la mayor velocidad resultó la de menor rugosidad superficial.

Conclusiones

Se realizó un estudio experimental de la influencia de la velocidad de corte y el avance, en el fresado en seco de una superficie plana de acero AISI 1010 con una fresa cilíndrica de acero de corte rápido, sobre la microestructura, el tamaño del grano, la dureza, la rugosidad superficial, así como las desviaciones de la pieza maquinada.

Los resultados muestran que, para las condiciones de corte establecidas, el fresado no provocó cambios en la microestructura del acero.

Al utilizar la menor velocidad de corte, el grano creció un 100% con respecto a su tamaño inicial, mientras que cuando se maquinó a velocidades de corte intermedia y máxima, se incrementó un 184%.

El aumento de la velocidad de corte y del avance provocan un incremento promedio del 56% de la dureza de la pieza maquinada con respecto a la dureza original, lo que puede estar relacionado con el endurecimiento de la pieza resultante de la deformación plástica que se produce debido al corte.

La rugosidad superficial varió entre $0,6 \mu\text{m}$ y $3,4 \mu\text{m}$, valores que se pueden considerar apropiados para esta operación. El efecto del avance fue variable, mostrando el menor valor de

rugosidad para el avance medio, mientras que el mejor valor de rugosidad se registró para la mayor velocidad de corte.

Las desviaciones de la pieza ascendieron 46,4% para un incremento del 90% de la velocidad de corte. Por su parte, el aumento del avance en un 92,2% provocó un crecimiento de las desviaciones del 18,1%. Esto permite apreciar que el incremento de la velocidad de corte mostró un mayor efecto en el aumento de las desviaciones de la pieza.

Finalmente, se seleccionaron las condiciones de corte más adecuadas, teniendo en cuenta los resultados obtenidos y las recomendaciones tecnológicas.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los profesores Ing. Frank Adrián Garcés Cedeño, Ing. David Verdecia Fruto y M.Sc. Raúl Reyes Camareno, por el apoyo brindado para realizar esta investigación.

Bibliografía

- Arshinov, V. & Alekseev, G. (1970). *Metal Cutting Theory and Cutting Tool Design*. Moscú: Mir.
- ASM (1998). *Metals Handbook Desk Edition*. New York: ASM International.
- Badrinathan, K. S. & Karunamoorthy, L. (2013-2014). Study of the effect of progressive feed rate on the cutting force in CNC end milling of AISI 1045 steel. *International Journal of Engineering and Technology*, 5(6), 4741-4751. Recuperado de www.inggjournals.com/ijet/docs/IJET13-05-06-231.pdf
- Bernard, O. (1981). *Estadística aplicada*. La Habana: Científico Técnico.
- Braga, D.U., Neves, F., Silva, A. & Parreiras, L. (2012). Evaluación experimental del desempeño del proceso de fresado frontal del acero ABNT 1045 para herramientas con diferentes números de aristas. *Información Tecnológica*, 23, 89-96. doi: 10.4067/S0718-07642012000400011.
- Callister, W.D. (2007). *Materials Science and Engineering*. Danvers: John Wiley & Sons, Inc.
- Chang, C.-K. & Lu, H.S. (2006). Study on the prediction model of surface roughness for side milling operations. *Int J Adv Manuf Technol*, 29, 867-878. doi: 10.1007/s00170-005-2604-2.
- Choubey, A., Chaturvedi, V. & Vimal, J. (2012). The implementation of Taguchi methodology for optimization of end milling process parameter of mild steel. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 4(07), 3261-3267. Recuperado de <http://www.ijest.info/docs/IJEST12-04-07-136.pdf>
- Kumar, N. S. & Venkateswara, P. (2005). Selection of optimum tool geometry and cutting conditions using a surface roughness prediction model for end milling. *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26, 1202-1210. doi: 10.1007/s00170-004-2110-y.
- Martínez, F. & Gordon, J. (1985). *Teoría y tecnología del tratamiento térmico*. La Habana: Pueblo y Educación.
- M'Saoubi, R., Outeiro, J.C., Chandrasekaran, H., Dillon, O.W. & Jawahir, I.S. (2008). A review of surface integrity in machining and its impact on functional performance and life of machined products. *Int. J. Sustainable Manufacturing*, 1(1/2), 203-236. Recuperado de <http://www.inderscience.com/info/inarticle.php?artid=19234>
- Nas, E. & Demir, H. (2010). The influence of number of inserts and cutting parameters on surface roughness in face milling. *Technology*, 13(1), 1-7. Recuperado de <http://jstech.karabuk.edu.tr/arsiv/2010-01/PDF/H.Demir-%20E.Nas%20,Volume13-1,1.pdf>
- NC05-08 1985. Método de Ensayo.
- Öktem, H. (2009). An integrated study of surface roughness for modelling and optimization of cutting parameters during end milling operation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 43, 852-861. doi: 10.1007/s00170-008-1763-3.
- Palanisamy, P., Rajendran, I. & Shanmugasundaram, S. (2007). Optimization of machining parameters using genetic algorithm and experimental validation for end-milling operations. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32, 644-655. doi: 10.1007/s00170-005-0384-3.

- Patwari, A., Nurul, A.K. & Faris, W. (2010). Identification of instabilities of the chip formation and its prediction model during end milling of medium carbon steel (S45C). *American J. of Engineering and Applied Sciences*, 3, 193-200. doi: 10.3844/ajeassp.2010.193.200.
- Rodrigues, A. et al. (2012). Surface integrity analysis when milling ultrafine-grained steels. *Materials Research*, 15, 125-130. doi: 10.1590/S1516-14392011005000094.
- Rodrigues, A., Matsumoto, H., Yamakami, W., Paulo, R.d.R. & Assis, C.F.d. (2010). Effects of milling condition on the surface integrity of hot forged steel. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 32(1), 37-43. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-58782010000100006>
- Saffar, R.J. & Razfar, M.R. (2010). Simulation of end milling operation for predicting cutting forces to minimize tool deflection by genetic algorithm. *Machining Science and Technology*, 14, 81-101. doi: 10.1080/10910340903586483.
- Shaikh, V., Boubekri, N. & Scharf, T. (2014). Analyzing the effectiveness of microlubrication using a vegetable oil-based metal working fluid during end milling AISI 1018 steel. *International Journal of Manufacturing Engineering*, 2014, 216-226. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.1155/2014/261349>
- Silva, R.B.D. et al. (2011). Tool wear analysis in milling of medium carbon steel with coated cemented carbide inserts using different machining lubrication/cooling systems. *Wear*, 271, 2459-2465. doi: 10.1016/j.wear.2010.12.046.
- Syahmi, M., Mat, N. & Razlan, A. (2013). Taguchi method approach on effect of lubrication condition on surface roughness in milling operation. *Procedia Engineering*, 53, 594-599. doi: 10.1016/j.proeng.2013.02.076.
- Thakre, A. (2013). Optimization of milling parameters for minimizing surface roughness using Taguchi's approach. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(6), 226-230. Recuperado de http://www.ijetae.com/files/Volume3Issue6/IJETAE_0613_39.pdf
- Zailani, Z.A., Hamidon, R., Hussin, M.S., Hamzas, M.F. & Hadi, H. (2011). The influence of solid lubricant in machining parameter of milling operation. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 3(6), 5221-5226. Recuperado de <http://www.ijest.info/docs/IJEST11-03-06-279.pdf>

Comparación del contenido de carotenoides en productos nutraceuticos elaborados a partir de dos variedades de camote y yuca

Carotenoids in nutraceutical products comparison derived from two varieties of sweet potato and cassava

Patricia Arguedas-Gamboa¹, Jesús Mora-Molina², Junior Sanabria-Mora³

Fecha de recepción: 8 de abril del 2015

Fecha de aprobación: 28 de julio del 2015

Arguedas-Gamboa, P; Mora-Molina, J; Sanabria-Mora, J. Comparación del contenido de carotenoides en productos nutraceuticos elaborados a partir de dos variedades de camote y yuca. *Tecnología en Marcha*. Vol. 28, N° 4, Octubre-Diciembre. Pág 42-53.

1 Investigadora del Centro de Investigación y Gestión Agroindustrial (CIGA), Escuela de Ingeniería en Agronegocios. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: parguedas@itcr.ac.cr

2 Investigador del Centro de Investigación en Protección Ambiental (CIPA), Escuela de Química. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: jmora@itcr.ac.cr

3 Estudiante-asistente, Escuela de Ingeniería en Agronegocios. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: jrsamora16@gmail.com

Palabras clave

Carotenoides; β caroteno; cultivos biofortificados; camote; yuca; alimentos nutraceuticos; licuados infantiles y *snacks*.

Resumen

La expectativa de vida en los países latinoamericanos es de 74 años y Costa Rica supera este valor. El Banco Mundial reconoció que Costa Rica y Chile son los países con mayor esperanza de vida en el continente. Costa Rica tiene un promedio de 80 años y Chile de 79 (Organización Panamericana de la Salud, 2014). Esta nueva población se interesa más por la salud, la longevidad y el bienestar, tendencias que obligan a los productores de alimentos a buscar nuevas alternativas, para adicionar beneficios nutricionales a sus productos. Las universidades y las instituciones públicas, como los ministerios de Salud y de Agricultura, deben constituirse en un motor en el logro de este objetivo.

El proyecto de investigación "Desarrollo de alimentos nutraceuticos a partir de cultivos biofortificados para combatir el efecto del cambio climático en la seguridad alimentaria de Costa Rica", ejecutado en el Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), liderado por la Escuela de Ingeniería en Agronegocios y con la participación de las escuelas de Química, Agronomía y Administración de Empresas, se ha iniciado con una visión etaria, es decir, se desarrollan los productos considerando las necesidades y características de tres poblaciones: niños menores de dos años, adolescentes y adultos mayores.

Para el desarrollo de estos productos se ha utilizado variedades de camote y de yuca biofortificadas con carotenos. Es necesario conocer la diferencia nutricional entre un producto elaborado con las variedades biofortificadas y uno elaborado con las variedades más comúnmente utilizadas por la población costarricense.

En este artículo se compara el contenido total de carotenoides en productos terminados elaborados a partir de dos variedades de camote y dos de yuca, una biofortificada y la otra no.

Para implementar la comparación, se trabajó en el desarrollo de un colado infantil y un snack para adolescentes. En la elaboración del colado infantil se utiliza camote, entre otros ingredientes, y para los snacks, tanto camote como yuca. Se realizaron tres corridas de cada uno de los productos, utilizando la misma materia prima, los mismos aditivos, la misma maquinaria y las mismas condiciones de proceso. En promedio se determinó que, usando variedades biofortificadas, la cantidad de carotenoides totales es diez veces mayor que cuando se utilizan variedades comunes. En los productos elaborados con variedades no fortificadas el promedio es de 300 μg - β caroteno/100 g. Este valor, en productos elaborados con cultivos biofortificados y utilizando exactamente las mismas técnicas de procesamiento, es de 4000 μg - β caroteno/100 g.

Keywords

Carotenoids; β -carotene; carotenoid bio fortified crops; manioc; sweet potatoes; nutraceutical food; home- made baby foods and baked snacks.

Abstract

Costa Rica's life expectation is the highest from Latin America. The average age for the whole continent is 74 years. The age for Costa Rica is 80 and for Chili is 79 (Organización Panamericana de la Salud, 2014). This situation is the result of an addition of variables, but it is obvious that

this little country has a population that is worried about factors as life style and nutrition. Food manufactory and food producers should offer new products, with a superior concentration of nutrients, instead of fats and processed carbohydrates (as sugars and starches). The government institutions, as public universities and ministries had to become a motor and support to achieve this objective.

A research group of the public university INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA, established a study project called “Desarrollo de alimentos nutraceuticos a partir de cultivos biofortificados para combatir el efecto del cambio climático en la seguridad alimentaria de Costa Rica”. The project is managed by a researcher of the Agrobusiness Department. Other Departments are collaborating too, as Chemistry, Business Management and Agricultural Engineering.

The new products development is focused in different age populations. The age groups selected are children from six to twenty-four months old, teenagers and finally elderly people. For the first group, it had been developed “home- made baby foods” and for the second one baked snacks. Researchers used carotenoid bio fortified crops, as manioc and sweet potatoes. Both crops are produced at the North side of Costa Rica.

To be sure that by using bio fortified crops is possible to obtain products with a higher concentration of nutrients, researchers made a comparison. They produced baby foods and nutraceutical snacks with biofortified crops and non-fortified crops. The total amount of carotenoid from the different samples was analyzed at the CITA (Centro Nacional de Investigación en Tecnología de Alimentos).

As a result, it was found that the total amount of carotenoids is ten times higher in products prepared with bio fortified crops than in products prepared with non bio fortified crops. It is important to take into account that the samples were prepared using the same procedures, equipment and ingredients. For the food products elaborated with non bio-fortified crops, the total carotenoids content is in average 300 µg/100 wet material. The same valor, using bio-fortified crops is 4000 µg/100 wet material.

Introducción

En los últimos años ha aumentado la tendencia a desarrollar productos alimentarios con alguna propiedad adicional, a la de dar placer sensorial y saciar el hambre del consumidor. El aspecto nutricional ha cobrado interés, y en la actualidad forma parte de la definición de “seguridad alimentaria”. Surgen así no solo las nuevas tendencias de producción y procesamiento de alimentos, sino una nomenclatura que a veces da lugar a una confusión de términos (Boucher, s.f.). Se habla de alimentos funcionales, alimentos nutraceuticos y cultivos biofortificados. El sector agroalimentario se ha enfocado en dar el máximo aprovechamiento a los diversos nutrientes y compuestos presentes en sus materias primas y en los residuos de las actividades de transformación. En este y otros trabajos, los autores hablarán de cultivos biofortificados para referirse a aquellos que tienen una alta densidad de nutrientes y se obtuvieron a través de las prácticas convencionales del mejoramiento genético vegetal, para producir mejores alimentos y combatir deficiencias de micronutrientes en el organismo humano. En otros casos, dichos cultivos pueden presentar carencia de elementos causantes de problemas de salud o intolerancias. Este es el caso de cultivos libres de gluten o de variedades de frijol con bajo contenido de inhibidores de tripsina. Con el reconocimiento creciente de los efectos devastadores de la desnutrición en la salud humana y en el bienestar socioeconómico, junto con la creciente inseguridad alimentaria en el mundo, la biofortificación se está convirtiendo en una estrategia nueva, sostenible, para mejorar la salud y el bienestar de las poblaciones más vulnerables (Ospina, 2012). Los alimentos funcionales y los nutraceuticos se considerarán

sinónimos. Se definen como alimentos similares en apariencia a los convencionales, pero han sido diseñados para cubrir un requerimiento nutricional específico o para impactar de manera positiva la salud de los consumidores.

Carotenoides. Estos compuestos se encuentran ampliamente difundidos en los vegetales, en forma de pigmentos rojos, naranjas y amarillos. El betacaroteno es el carotenoide más conocido y se puede encontrar en casi todas las frutas y hortalizas de color anaranjado, así como en los vegetales de hojas verdes. El betacaroteno es un precursor de la vitamina A.

Los carotenoides tienen la función de proteger las células vegetales de la oxidación y, por consiguiente, de la descomposición. Protegen las membranas celulares de la acción de los radicales libres. Los radicales libres son capaces de destruir las paredes celulares, inactivar enzimas, debilitar la capacidad defensiva y dañar el material genético-hereditario, lo que vuelve al organismo más propenso a la aparición del cáncer. Además, pueden ser causantes de otras enfermedades humanas crónicas no transmisibles como arteriosclerosis, trastornos del sistema nervioso central (Alzheimer y Parkinson), envejecimiento de la piel y cataratas, entre otras. Los estudios han demostrado que los carotenoides favorecen la producción de anticuerpos que actúan en forma específica contra las sustancias o elementos extraños que pueden afectar el organismo (Palencia, 2010).

El procesamiento de los alimentos tiene un papel decisivo en la preservación y la biodisponibilidad de estos compuestos antioxidantes. Muchas investigaciones han demostrado que los carotenoides, incluyendo las provitaminas A, están más concentrados en la cáscara que en la pulpa, por lo tanto, solo al pelar las frutas y vegetales se puede reducir considerablemente el contenido de provitamina A (Ayi Wong, 2008).

Los carotenoides son en su mayoría insolubles en agua, por lo tanto, las pérdidas por lixiviación durante el lavado y procesamiento son mínimas. No obstante, al ser compuestos altamente insaturados, son susceptibles a la isomerización y oxidación durante el procesamiento.

A pesar de su susceptibilidad a la descomposición, durante el procesamiento industrial se pueden retener los carotenoides si se siguen buenas prácticas tecnológicas.

Los tratamientos térmicos tienen efectos positivos y negativos sobre los carotenoides, debido a que promueven su oxidación pero también aumentan su biodisponibilidad. El calor siempre induce la isomerización cis-trans que se traduce en la formación de subproductos de los carotenoides (López, 2012).

Se recomienda el procesamiento a la temperatura más baja por el tiempo más breve posible, pero el procesamiento a alta temperatura y tiempo corto es una buena alternativa. El escaldado puede reducir el contenido de carotenoides en forma inicial pero evita mayores pérdidas posteriores durante el procesamiento (especialmente si es lento) y almacenamiento, por la inactivación de enzimas (Ayi Wong, 2008).

Los procesos de oxidación son estimulados por la pérdida de la integridad celular, de manera que los vegetales cortados y/o triturados ponen a sus células en contacto con sustancias que pueden modificar e incluso destruir los pigmentos. El grado de cambio en los carotenoides depende del tipo de vegetal, el método de cocción y las condiciones de tiempo y temperatura. El calor también provoca la inactivación de enzimas y la ruptura de estructuras del alimento, provocando un incremento en la biodisponibilidad (López, 2012).

Con lo anterior, se evidencia que la determinación de los carotenoides es un tanto compleja durante las diferentes etapas de los procesos productivos. La molécula se ve afectada por factores ambientales, de manejo y de proceso. Se debe evitar a toda costa la isomerización y oxidación de los carotenoides durante el análisis. Esto termina dando al método de muestreo

y de preparación de las muestras una importancia trascendental, pues si no se cuidan estos detalles, los resultados obtenidos serían poco confiables.

Según indica Rodríguez D. (1999), la provitamina A más importante es el β -caroteno tanto en términos de bioactividad como de amplia ocurrencia; también menciona que generalmente todas las muestras de alimentos carotenogénicos de plantas analizados hasta la fecha contienen β -caroteno como constituyente principal o menor. Estructuralmente, la vitamina A es esencialmente la mitad de la molécula de β -caroteno con una molécula adicional de agua en el extremo de la cadena lateral. Así, el β -caroteno es una potente provitamina A, a la que se le asigna un 100% de actividad.

Un problema serio de salud pública en los países en desarrollo es la deficiencia de vitamina A, ya que las fuentes dietarias de las provitaminas A continúan siendo la principal preocupación. Por tal razón, la incorporación de productos alimenticios ricos en carotenoides es de suma importancia para subsanar esta situación. Además, el enfoque en el mundo desarrollado ha girado en torno a los otros efectos que tienen los carotenoides en la promoción de la salud, tales como las propiedades nutracéuticas que presentan.

La importancia de determinar el contenido de provitamina A en los alimentos es fundamental. Sin embargo, debido a las dificultades inherentes a los análisis de los carotenoides, que a veces no son percibidas por los mismos analistas, todavía aparece como cuestionable la confiabilidad de una parte sustancial de la información existente. Por tal razón, es necesaria una buena comprensión de la naturaleza de los carotenoides para una buena realización del análisis y ayuda al investigador y así evitar las discrepancias en los resultados y la desinformación que persisten en la literatura (Rodríguez D., 1999).

Cualquiera sea el método escogido para el análisis de carotenoides, es esencial que se tomen las precauciones necesarias para evitar transformaciones y pérdidas cuantitativas durante este proceso. Estas incluyen principalmente (Davies 1976, Schiedt y Liaaen-Jensen 1995):

- Completar el análisis dentro del plazo más breve posible.
- Usar solventes de grado reactivo o destilados libres de impurezas nocivas, tales como éter etílico libre de peróxidos y tetrahidrofurano, o cloroformo libre de ácido.
- Proteger de la luz.
- Excluir oxígeno, por ejemplo, utilizando una atmósfera al vacío, de nitrógeno o de argón.
- Evitar altas temperaturas.

Generalidades del camote. Conocido por su nombre en latín como *Ipomoea batatas*, el camote es un cultivo de clima tropical que se ha utilizado desde tiempos ancestrales para la alimentación humana y animal. Se trata de una raíz reservante, originaria de la zona tropical (México y América Central) y que se caracteriza por tener un gran contenido de azúcares, almidón, betacaroteno y vitaminas, lo que lo hace una excelente opción para la elaboración de alimentos, extracción de almidón y alcohol. También se le conoce como batata o boniato y en inglés como *sweet potatoe*. En la actualidad, se cultiva en 82 países en desarrollo y destaca mundialmente por ser el séptimo cultivo alimentario más importante en términos de producción (ver figura 1). Es un cultivo que requiere pocos cuidados en materia agronómica, lo que implica un bajo costo de producción en comparación con otros. Al igual que en el caso de la yuca, el 96% de la producción mundial corresponde a países asiáticos y africanos, destacando China en el continente asiático y Uganda y Nigeria en África.

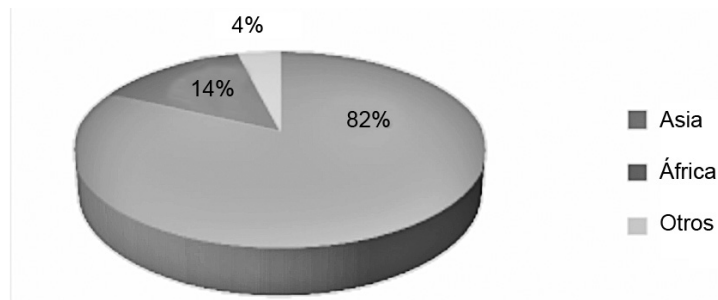


Figura 1. Participación en la producción mundial de camote, 2010. Fuente: (Medaglia, 2012)

En Costa Rica, el camote se siembra principalmente en las zonas de San Ramón, San Carlos y Los Chiles y en menor cantidad en Matina, Grecia y Upala.

Composición química y valor nutricional. El camote es un alimento que contiene altas cantidades de almidón, vitaminas, fibras (celulosa y pectinas) y minerales con valores próximos a los de otras hortalizas más comúnmente consumidas en Costa Rica. El contenido de carbohidratos del camote es superior al de la mayoría de las hortalizas, así como su contenido de fibra. Lo más sobresaliente de este cultivo quizás sea su alta concentración de provitamina A y carotenoides, por debajo solo de la zanahoria.

Variedades. Si bien los camotes que se encuentran más comúnmente en el mercado son de pulpa amarillenta o anaranjada, lo cierto es que también los hay de pulpa morada. Estas diferencias en llamativos colores se deben a la presencia de pigmentos carotenoides y antocianinas que se encuentran en diferentes proporciones, dependiendo de la variedad con que se trabaje. En camotes de pulpa amarillenta o anaranjada, la intensidad del color se asocia con un mayor contenido de betacaroteno. Por esta razón, las variedades de camote ricas en ese pigmento se utilizan para reducir la deficiencia de vitamina A en niños de muchos países de todo el mundo.

Según el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria de Argentina (Martí, 2011), existen variedades comerciales y experimentales de camote que, como se dijo antes, se diferencian en pulpa y cáscara principalmente por sus tonalidades. Actualmente, las variedades más comunes y de las que se originan la mayoría de las otras dispuestas en el mercado son:

Arapey: Variedad uruguaya, de alto rendimiento y ciclo corto.

Beauregard: Conocida también como Covington o Georgia Jet, es una variedad originaria de Estados Unidos, también de alto rendimiento y ciclo corto, con pulpa anaranjada apta para la exportación.

Usos frecuentes e industrialización. El camote se consume asado, al horno, hervido o frito. Su textura y sabor se adaptan a muchas recetas. En Costa Rica se consume en puré, pastel, en hojuelas y ampliamente en sopa. En otros países se pueden encontrar postres, helados y pan hechos con este producto, ya que también se puede obtener harina. La harina de camote tiene una característica que lo hace inconveniente para su uso en panificación: la carencia de gluten, que es un componente proteico responsable de la esponjosidad de los productos de panadería. No obstante, dicha característica lo hace atractivo en la elaboración de productos destinados a los celíacos, personas que presentan diferentes grados de intolerancia al gluten. Industrialmente, destaca la elaboración de hojuelas (*chips*) de camote, similares a las hechas con papa; y la producción de jugos, cervezas y colorantes para alimentos, a partir de variedades de pulpa morada y anaranjada. Así, por ejemplo, el soju es un aguardiente claro, tradicional en algunas regiones de Japón, que se prepara a partir de camote rico en antocianinas y carotenos que

le otorgan sabores frutales a la bebida. Actualmente se evalúa la posibilidad de usar residuos industriales de camote para producir aditivos de alimentos o suplementos nutricionales, ya que pueden ser fuente de fibras, compuestos antioxidantes y otras sustancias con efectos positivos sobre la salud (Martí, Corbino, & Chludil, 2011).

Generalidades de la yuca. La yuca (*Manihot sculenta* Crantz), también conocida como mandioca o cassava, es una especie vegetal de raíces amiláceas que se cultiva únicamente en los trópicos, generalmente en Suramérica. Es un cultivo de fácil adaptación, cuyos costos de producción son bajos, los rendimientos altos y que posee amplio uso en la industria alimentaria tanto humana como animal. (Dirección General de Investigación y Extensión Agrícola, 1991).

A pesar de que la yuca es uno de los cultivos alimentarios más importantes de los países tropicales, fuera de ellos es muy poco conocida; incluso en el trópico se le considera a menudo un cultivo de subsistencia de baja categoría. Las mayores zonas de producción a nivel mundial son África y Asia, sin embargo, América del Sur se ha convertido en un fuerte competidor, con Brasil y Colombia a la cabeza. (Cock, 1997).

En Costa Rica, las áreas de mayor producción de yuca son: la Zona Norte, principalmente el cantón de San Carlos, la Zona Atlántica, en Guácimo y Pococí y Alajuela, en Grecia, Atenas, San Ramón y Palmares. Se dice que cualquier zona del país cuya altitud sea menor a los 1000 msnm es apta para la siembra de este cultivo (Dirección General de Investigación y Extensión Agrícola, 1991).

Las exportaciones de yuca costarricense experimentaron una baja desde 2009 hasta 2011, cuando se alcanzó un repunte significativo. Incluso, según estimaciones del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) correspondientes a junio de 2009, durante el primer trimestre de este año las exportaciones habrían bajado un 4,83% (9,81 toneladas) con respecto al mismo período de 2008 (Abreu, 2010).

Composición química y valor nutricional. La yuca es la tercera fuente más importante de calorías en las regiones tropicales, después del arroz y el maíz. Millones de personas dependen de la mandioca en África, Asia y América Latina. Es por esto que se ha considerado de vital importancia para la seguridad alimentaria de sus productores.

La yuca solo es superada por el maíz como fuente de almidón, y algunas variedades recién desarrolladas contienen en sus raíces un almidón muy solicitado por la industria (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2008).

Tanto sus raíces como sus hojas son adecuadas para el consumo humano. Las primeras son fuente de carbohidratos y las segundas de proteínas, minerales y vitaminas, particularmente carotenos y vitamina C (Aristizábal & Sánchez, 2007).

Varietades. El Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) conserva en el banco de germoplasma in vitro, que constituye la mayor colección de yuca del mundo, 6073 clones discriminados en 5724 clones de *Manihot sculenta*, que incluyen cultivares primitivos, cultivares mejorados y material genético de especies silvestres (Aristizábal & Sánchez, 2007).

En Costa Rica, las variedades Valencia y Mangi son las más conocidas, aunque en experimentación la que ha dado mejor resultado es la Valencia. Asimismo, cabe mencionar que muchas de las variedades desarrolladas por el CIAT, que han producido altos rendimientos, se ponen a prueba actualmente en el país (Dirección General de Investigación y Extensión Agrícola, 1991).

Usos frecuentes e industrialización. Dependiendo del uso final de la yuca, esta puede ser clasificada como de calidad culinaria cuando se destina al consumo humano directo; como industrial cuando se usa para la producción de subproductos tales como harina, almidón,

trozos secos; o como doble propósito, es decir, fenotipos que podrían ser usados tanto para el consumo humano como industrial. Actualmente, los programas de mejoramiento genético están dirigidos a la búsqueda de variedades específicas para la industria, ya que las variedades de doble propósito resultan en algunos casos inadecuadas para consumo en fresco o para la industria (Aristizábal & Sánchez, 2007).

Tradicionalmente, en Costa Rica se produce yuca para consumo humano y no se ha logrado desarrollar un paquete tecnológico que ayude a los productores a aumentar su productividad, que ronda apenas las diez y doce toneladas por hectárea (Abreu, 2010).

Según un estudio del Servicio de Información e Inteligencia de Mercados (SIIM) del Consejo Nacional de Producción (CNP) en 2012, Costa Rica aporta el 89% de la yuca que importa Estados Unidos, siendo esta raíz exportada de dos maneras: congelada, de la que se vendieron 9.966 toneladas entre enero y julio de este año, y fresca o parafinada (cubierta con parafina), de la que se vendieron 22.176 toneladas en los primeros siete meses del año (Barquero, 2012).

Compuestos bioactivos. Las frutas y vegetales siempre han sido considerados fuente importante de vitaminas y minerales, sin embargo, cada día adquieren mayor relevancia desde el punto de vista nutritivo debido a su contenido de componentes biológicamente activos, sobre todo compuestos con propiedades antioxidantes. Estos se utilizan en diferentes áreas, tales como agroindustria, alimentación, farmacia y medicina. Estos compuestos son sustancias biológicamente activas presentes, fundamentalmente, en alimentos de origen vegetal. Algunos tienen efectos beneficiosos adicionales para la salud, más allá de las funciones fisiológicas normales, confiriendo un carácter funcional a los alimentos que los contienen (Palencia, 2010).

Colados infantiles. Papillas, compotas y colados han sido por naturaleza los sinónimos más utilizados para referirse de manera genérica a aquellos alimentos en cuyos ingredientes predominan una o varias frutas, verduras, legumbres o incluso carnes y además en su elaboración intermedia un proceso térmico o de cocción. Estos se destinan primordialmente a la nutrición de niños pequeños o personas mayores con problemas de digestión o masticación (Álvarez, Serna, & Villada, 2012).

Snack horneado. Se entiende por *snack* un producto alimentario que se puede consumir frío o caliente, líquido o sólido, que requiere de poca o ninguna preparación y se presenta en porciones pequeñas, que satisface el hambre ocasional y es, cada vez con mayor frecuencia, sustituto de las comidas formales (López, 2012).

Muchos productos entran dentro de esta categoría, como los tubérculos (fritos, extruidos o en *pellets*) y los productos de maíz (fritos, horneados, extruidos o tipo tortilla). Los consumidores se preocupan cada vez más por lo que comen y por los efectos que los alimentos pueden producir en su organismo. El mercado de estos productos ofrece, como respuesta a los nuevos hábitos de consumo, los llamados *snacks* saludables, entre los cuales están los horneados, siendo una de las principales alternativas debido a que contienen menos grasa.

El horneado es un proceso en el que ocurre una serie de cambios físicos, químicos y biológicos como: evaporación del agua, formación de estructuras porosas, expansión del volumen, desnaturalización de la proteína, gelatinización del almidón, formación de corteza y reacciones de Maillard. Además se modifican la textura, el color, el sabor y el contenido de humedad de los alimentos. Como consecuencia se desarrollan nuevos sabores y colores (López, 2012). El objetivo principal de la operación de horneado es modificar las características sensoriales de un alimento por la acción directa del calor comestible un alimento, haciéndolo agradable para su consumo (Fito, Andrés, Barat, & Albors, 2001).

Materiales y métodos

El análisis de carotenoides fue realizado por el laboratorio del Centro Nacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos (CITA) de la Universidad de Costa Rica, con el método de espectrofotometría UV visible.

Se realizaron tres corridas de cada producto (colados y *snacks*). En cada una se trabajó un producto con la variedad biofortificada y otro con la variedad común (ver figura 2). Además de otros ingredientes, en el caso de los colados infantiles el cultivo biofortificado fue el camote. En el caso de los *snacks*, se usó una mezcla de camote y yuca. El camote se adicionó en forma de pasta o puré y la yuca como harina (previamente elaborada en la Planta Piloto del Centro de Investigación y Gestión Agroindustrial –CIGA– por el mismo equipo de trabajo).

El camote biofortificado utilizado es de la variedad Covington y fue sembrado para el proyecto por el M.Sc. Sergio Torres en las fincas de la Sede Regional del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC) en Santa Clara de San Carlos, provincia de Alajuela. La variedad no biofortificada se conoce como guapileña y también se sembró en las fincas del TEC.

La yuca fue sembrada en la Estación Experimental Los Diamantes en Guápiles, provincia de Limón. La variedad biofortificada se trajo de Colombia y está identificada como CM 2772-13, mientras que la no biofortificada es la Valencia.

Se realizaron tres corridas de cada uno de los productos, utilizando la misma materia prima, los mismos aditivos, la misma maquinaria y las mismas condiciones de proceso.

Las muestras de los productos elaborados se seleccionaron con muestreo aleatorio simple y se rotularon con información conocida solamente por los investigadores, de manera que el laboratorio de análisis no tuviera factores que pudieran causar un sesgo.

Los resultados obtenidos fueron analizados para definir la significancia en la diferencia del contenido de carotenoides totales por la técnica de análisis de variancia de un factor, con una confianza del 95% en las conclusiones obtenidas tras aplicar esta técnica estadística.

Resultados

Los resultados obtenidos de la composición de carotenoides totales en productos elaborados a partir de camote y yuca fortificados y no fortificados se aprecian en el cuadro 1. Se puede observar que en promedio la cantidad de carotenoides totales es diez veces mayor en los productos elaborados con variedades biofortificadas que cuando se utilizan variedades comunes. En los productos elaborados con variedades no fortificadas, el promedio es de 300 $\mu\text{g-}\beta\text{caroteno}/100\text{ g}$. Este valor, en productos elaborados con cultivos biofortificados y utilizando exactamente las mismas técnicas de procesamiento, es de 4000 $\mu\text{g-}\beta\text{caroteno}/100\text{ g}$.

Análisis estadístico. Se aplicó análisis de variancia de un factor, los grados de libertad fueron de dos (tres repeticiones) y $\alpha = 0.05$. Esto implica que se puede tener un 95% de confianza en las conclusiones obtenidas a partir de esta técnica estadística. Se comparó el contenido de carotenoides totales de cada producto elaborado a partir de variedades fortificadas, con el mismo producto obtenido de variedades no fortificadas. Esto es: P1 versus P4, P2 versus P5 y P3 versus P6 y los resultados se muestran en el cuadro 2.

Se generan, por tanto, tres hipótesis nulas, de las cuales se presenta una de ellas:

El contenido de carotenoides totales del colado de camote con maracuyá usando la variedad biofortificada es significativamente mayor que el mismo contenido en el producto elaborado con variedad no fortificada.

Cuadro 1. Composición de carotenoides totales en productos elaborados a partir de camote y yuca fortificados y no fortificados ($\mu\text{g}\beta\text{-caroteno}/100\text{ g}$).

Identificación	Productos	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Promedio
P1	Colado de camote con maracuyá, variedad fortificada	4596	2660	3919	3725
P2	Colado de camote con plátano, variedad fortificada	3205	3689	3787	3560
P3	<i>Snack</i> de camote y yuca, variedades fortificadas	4230	5302	4153	4562
P4	Colado de camote con maracuyá, variedad no fortificada	214	291	374	293
P5	Colado de camote con plátano, variedad no fortificada	252	241	414	302
P6	<i>Snack</i> de camote y yuca, variedades no fortificadas	346	202	338	295

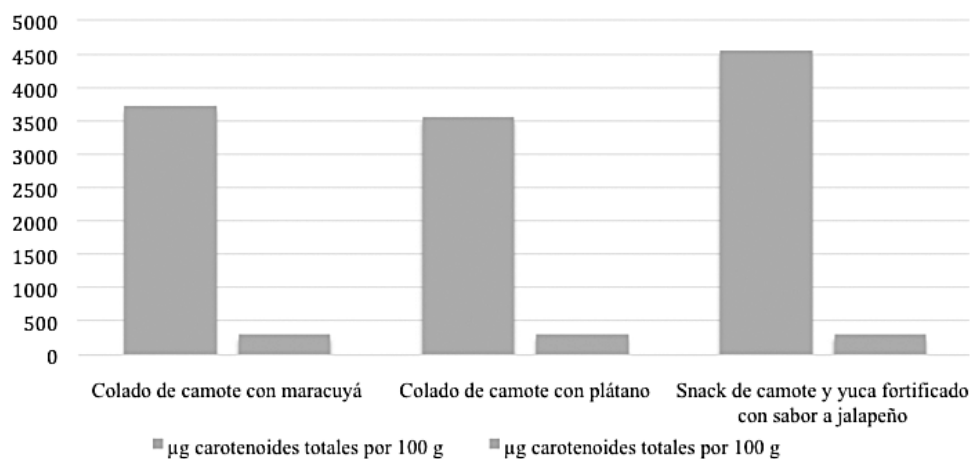


Figura 2. Comparación de los productos elaborados (colados y *snacks*) a partir de materias primas biofortificadas y no biofortificadas.

Cuadro 2. Resultado del análisis de varianza

Parámetro estadístico	Combinación		
	P1 versus P4	P2 versus P5	P3 versus P6
Valor crítico F	7,71	7,71	7,71
F	36,37	299,06	130,29

Conclusiones

En promedio, el contenido de carotenoides totales en productos elaborados con variedades de cultivos fortificados es diez veces mayor que en los elaborados con los cultivos de variedades no fortificadas (300 $\mu\text{g-}\beta\text{caroteno}/100\text{ g}$ versus 4000 $\mu\text{g-}\beta\text{caroteno}/100\text{ g}$).

Como conclusión general, queda demostrado que, independientemente de que durante todo el proceso tecnológico se produzcan pérdidas y modificaciones de los carotenoides, el uso de variedades biológicamente ricas en estos compuestos está justificado desde el punto de vista nutricional. En una próxima publicación, los autores estarán ofreciendo información detallada de las pérdidas provocadas por diferentes etapas del proceso y por el almacenamiento.

En este caso particular, por el hecho de que el nutriente estudiado es un pigmento natural, los productos elaborados con cultivos biofortificados, además de ser más nutritivos, son más agradables a la vista, debido a sus atractivos tonos anaranjados-rosados. Esto hace que sean más aceptados por las poblaciones meta: niños y adolescentes.

Con el propósito de conocer mejor la dinámica de la transformación de los carotenoides unos en otros, pérdida o ganancia de actividad vitamínica en detrimento o ganancia de la actividad antioxidante, se recomienda realizar otras determinaciones específicas, como los contenidos de β -caroteno y de vitamina A. De esta manera, además de conocer el valor nutracéutico de los productos desarrollados, los investigadores estarán en capacidad de recomendar la dosis ideal de consumo para satisfacer las necesidades vitamínicas de las poblaciones meta.

De acuerdo con el análisis de varianza realizado, las hipótesis nulas quedan rechazadas y como consecuencia se acepta la hipótesis alternativa. La diferencia en contenido de carotenoides totales es mayor en los productos elaborados con cultivos biofortificados.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento por el apoyo financiero al Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), en especial a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión, por el apoyo de tiempos y administrativo. También agradecen al Centro de Investigación y Gestión Agroindustrial (CIGA) de la Escuela de Ingeniería en Agronegocios y al Centro de Investigación en Protección Ambiental (CIPA) de la Escuela de Química, por su gran respaldo al proyecto. Se agradece al Ingeniero Agrónomo Sergio Torres, coordinador del Centro de Investigación y Desarrollo en Agricultura Sostenible para el Trópico Húmedo (CIDASHT) de la Escuela de Agronomía, Sede Regional de San Carlos, por la siembra y suministro puntual de las variedades requeridas en la cantidad y el momento requeridos. Se agradece a los asistentes del proyecto Sofía Solano, Dayana Benavides y Anouk Damiens.

Bibliografía

- Abreu, F. (2010). Productores costarricenses de yuca analizan alternativas de producción. IICA Conexión(16).
- Álvarez, M. V., Serna, S., & Villada, E. (2012). Papilla de arroz instantánea para niños de 12 a 36 meses fortificada con micronutrientes: Una alternativa para la alimentación infantil. Antioquia: Corporación Universitaria Lasallista.
- Aristizábal, J., & Sánchez, T. (2007). Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Ayi Wong, D. (2008). Desarrollo de un snack tipo tortilla a base de fruto de pejibaye (*Bactris gasipaes* Kunth). San José: Universidad de Costa Rica.
- Barquero, M. (2012, Octubre 8). Costa Rica aporta el 89% de la yuca que se consume en Estados Unidos. La Nación.
- CLAYUCA. (2005, Octubre 10). Yuca se utilizará para fabricación de etanol. La Nación .

- Cock, J. (1997). La Yuca, Nuevo potencial para un cultivo tradicional. Cali, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical.
- Davies, B. H. (1976). Carotenoids. (T. W. Goodwin, Szerk.) Chemistry and biochemistry of plant pigments, 38-165.
- Dirección General de Investigación y Extensión Agrícola. (1991). Aspectos Técnicos sobre Cuarenta y Cinco Cultivos Agrícolas de Costa Rica. San José: Ministerio de Agricultura y Ganadería.
- Espinola, N., Creed, H., Ugaz, M. E., & van Hal, M. (1998). Desarrollo de un Alimento Complementario con Camote para niños de 6 meses a 3 años. Lima, Perú: Centro Internacional de la Papa.
- Espinola, N., Creed, H., Ugaz, M. E., & van Hal, M. (1998). Desarrollo de un Alimento Complementario con Camote para niños de 6 meses a 3 años. Lima, Perú: Centro Internacional de la Papa.
- Fito, P., Andrés, A. M., Barat, J., & Albors, A. (2001). Introducción al secado de alimentos por aire caliente. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- López, R. (2012). Evaluación del efecto de condiciones de horneado sobre el contenido de antioxidantes de un snack de pejibaye (*Bactris gasipaes* H.B.K.) y valoración de la aceptación por parte de los consumidores. San José: Universidad de Costa Rica.
- Martí, H., Corbino, G., & Chludil, H. (2011. febrero-marzo). La batata: el redescubrimiento de un cultivo. *Journal of Plant Nutrition*, 21(121), 17-23.
- Medaglia, C. (2012). El mercado de raíces y tubérculos en la Unión Europea. Promotora del Comercio Exterior de Costa Rica, San José.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2008). ¿Por qué la mandioca? Forrás: Agricultura: http://www.fao.org/ag/agp/agpc/gcnds/index_es.html
- Palencia, Y. (2010). Sustancias bioactivas en los alimentos. Zaragoza: UNIZAR.
- Rodríguez, D. (1999). Carotenoides y preparación de alimentos: la retención de los carotenoides provitamina A en alimentos preparados, procesados y almacenados. USA: Jhon Snow, Inc/ OMNI Project.
- Schiedt, K., & Liaaen-Jensen, S. (1995). Carotenoids. (G. Britton, S. Liaaen-Jensen, & H. Pfander, szerk.) Isolation and analysis, IA, 81-108.

Estudio de remoción de arsénico en agua potable a nivel domiciliario mediante oxidación solar y coagulación-floculación

Study of arsenic removal in drinking water at household level using solar oxidation and coagulation-flocculation techniques

Paola Rojas-Chaves¹, María J. Vargas-Benavides², Andrés Araya-Obando³, Johnny Valverde-Cerdas⁴, Luis G. Romero-Esquivel⁵

Fecha de recepción: 23 de marzo del 2015

Fecha de aprobación: 11 de junio del 2015

Rojas-Chaves, P; Vargas-Benavides, M; Araya-Obando, A; Valverde-Cerdas, J; Romero-Esquivel, L. G. Estudio de remoción de arsénico en agua potable a nivel domiciliario mediante oxidación solar y coagulación-floculación. *Tecnología en Marcha*. Vol. 28, Nº 4, Octubre-Diciembre. Pág 54-65.

1 Graduada de Ingeniería Ambiental. Instituto Tecnológico de Costa Rica Teléfono: (506)8990-5193, Cartago, Costa Rica. Correo electrónico: projas1208@gmail.com

2 Estudiante de Ingeniería Ambiental. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Teléfono: (506)8876-0210, Cartago, Costa Rica. Correo electrónico: mariajvargas@gmail.com

3 Investigador de la Escuela de Ingeniería en Construcción. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Teléfono: (506)2550-2311, Cartago, Costa Rica. Correo electrónico: jobando@itcr.ac.cr

4 Investigador. Escuela de Química. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Teléfono: (506)2550-2734, Cartago, Costa Rica. Correo electrónico: jovalverde@itcr.ac.cr

5 Investigador. Escuela de Química. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Teléfono: (506)2550-2304, Cartago, Costa Rica. Correo electrónico: lromero@itcr.ac.cr

Palabras clave

Agua de consumo humano; remoción de arsénico; oxidación solar; floculación; coagulación.

Resumen

En Costa Rica, a pesar de que se han hecho esfuerzos por abastecer de agua segura a las comunidades afectadas por la presencia de arsénico en el líquido, una parte de la población aún se encuentra expuesta, posiblemente debido a que no están conectadas a una red de acueductos. Es por ello que en este estudio se presentan dos soluciones a nivel domiciliario para eliminar el arsénico: una por oxidación solar (SORAS) y otra por un proceso de coagulación-floculación. En ambos casos, el arsénico es removido por adsorción o coprecipitación sobre los óxidos hidróxidos de hierro (III) formados.

En el sistema SORAS se encontró que para reducir la concentración de arsénico de 200 µg/L a menos de la norma (10 µg/L), se necesitan entre 2h y 4h de exposición en un día soleado o nublado, respectivamente. En el sistema de coagulación-floculación, las condiciones óptimas para obtener niveles de arsénico por debajo de la norma fueron las siguientes: con floculante sintético, el pH fue 6 con 1 mg/L de FK-930-S (polímero de cloruro de polidialil-dimetilamonio) con dosis de FeCl₃ 12 mg/L; con floculante natural, el pH fue 6 con 250 mg/L de mozote (*Triumfetta semitriloba*), con dosis de FeCl₃ de 14 mg/L. Un prototipo consistente en un recipiente de coagulación-floculación y otro de filtración en arena fue capaz de tratar 15 L de agua sintética con 200 µg/L As y agua natural con 10 y 50 µg/L. A pesar de estos resultados, es necesario evaluar ambas técnicas en las comunidades, incluyendo aspectos de capacitación y aceptación.

Keywords

Drinking water; arsenic removal; solar oxidation; flocculation; coagulation.

Abstract

In Costa Rica, even though there have been efforts to provide safe water to communities affected by the presence of arsenic, there is a part of the population still exposed because might not be connected to a network of aqueducts. Two solutions household level use for As reduction are presented: one is the solar radiation oxidation (SORAS) and second one is the flocculation - coagulation process. Both solutions showed reduced As concentration due to adsorption or co-precipitation on the iron (III) oxide hydroxides. The SORAS system needed 2h and 4h of exposure in a sunny or cloudy day respectively to reduce the arsenic concentration from 200 µg / L to less than the standard (10 µg / L). For coagulation - flocculation system, best conditions were achieved at pH 6 with synthetic flocculant FK-930-S (polymer polydiallyl-dimethylammonium chloride) at 1 mg/L dose and FeCl₃ 12 mg/L dose; for natural flocculant it was achieved at pH 6 with mozote (*Triumfetta semitriloba*) at 250 mg/L dose, and FeCl₃ 14 mg/L dose. A prototype consisting in a coagulation-flocculation container and a sand filtration step was able to treat 15 liters of synthetic water with 200 µg / L As and natural water with 10 and 50 µg / L. Despite these results, it is necessary to evaluate both techniques in communities, including aspects of training and acceptance.

Introducción

El consumo de agua con arsénico en las fuentes naturales es un problema de salud pública que ha sido asociado a cáncer de piel, riñones, pulmones y vejiga (Bundschuh et al., 2012), entre otras enfermedades. Por tal motivo, la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el Ministerio de Salud de Costa Rica limitaron la concentración máxima de arsénico en el agua para consumo humano a 10 µg/L (Ministerio de Salud, 2005; OMS, 2011). Por lo anterior, es necesario buscar fuentes de agua alternativas o brindar un tratamiento para la remoción del arsénico.

Entre las tecnologías para remover arsénico más comunes se incluyen la adsorción, el intercambio iónico, las membranas, la oxidación/precipitación y la coagulación-floculación/coprecipitación (Mohan y Pittman, 2007). En general, en cada uno de estos procesos se requiere una fase previa de oxidación, ya que la remoción de arsénico en la forma pentavalente es más efectiva que en la trivalente. Los oxidantes más utilizados son el hipoclorito de sodio y el permanganato de potasio (OPS, 2005). Una vez realizada la oxidación, en presencia de hierro en el agua, se produce la precipitación de hidróxidos de hierro (III) en cuya superficie es retenido el arsénico pentavalente.

Un sistema de oxidación/precipitación bastante simple y seguro es la remoción de arsénico por oxidación solar (SORAS), que consiste en colocar el agua contaminada en botellas plásticas transparentes con la adición de jugo de limón y hierro (Litter et al., 2010). Posteriormente, las botellas se exponen a radiación solar para oxidar el arsénico trivalente y formar compuestos de coordinación entre el hierro y citrato mediante un proceso foto-fenton (Litter et al., 2010). El arsénico pentavalente coprecipita con los hidróxidos de hierro formados (Litter et al., 2012)

Además, se puede mencionar el frecuente uso de sulfato de aluminio, cloruro de hierro (III) y sulfato de hierro (III) como coagulantes. Las sales de hierro han demostrado ser más eficientes en la remoción de arsénico que el sulfato de aluminio en un rango de pH más amplio (Jain y Singh, 2012). Por ejemplo, el sistema "Bucket Treatment Unit" (BTU) utiliza dos recipientes; en el primero se realiza un proceso de coagulación-floculación y en el segundo una filtración. Usando cloruro de hierro (III) como coagulante se lograron cambios en la concentración, desde 375-640 µg/L a valores menores de 20 µg/L. El sistema "Fill and Draw Units" es similar al anterior, solo que el proceso se realiza en un solo tanque (Jain y Singh, 2012). Basado en el mismo principio, existe el sistema de la Organización de Salud Pública y Ambiental de Nepal (ENPHO, por sus siglas en inglés), y consiste en un cubo de 20 L al que se le añade una mezcla de cloruro de hierro (III), carbón en polvo e hipoclorito de sodio, logrando una eficiencia de remoción de alrededor del 91% con concentraciones desde los 91-274 µg/L llegando a valores de entre 9 y 22 µg/L de arsénico final (Hwang, 2002). Es factible utilizar un floculante natural como el mozote (*Triumfetta semitriloba*), ya que acelera el proceso de separación de los floculos (Vargas, 2008) y posterior filtración utilizando un filtro de arena. Este sistema de coagulación-floculación usando cloruro de hierro (III) y mozote es el que se analiza en el presente estudio.

En Costa Rica, a pesar de que las ASADAS han venido resolviendo el problema mediante sistemas de remoción con óxido de titanio (IV) (Vargas, com. pers., agosto de 2014), existe la posibilidad de encontrar familias que no están conectadas a ellos. Con el objetivo de brindar una alternativa de bajo costo a esta población que no tiene solucionado el problema de exposición al arsénico, se presentan tanto los resultados de ensayos preliminares de remoción por la técnica SORAS modificada como los resultados finales obtenidos usando coagulación-floculación con mozote como floculante.

Materiales y métodos

Ensayos con el sistema SORAS modificado

En estos ensayos se siguió el procedimiento descrito por Litter y colaboradores (2010). En este caso se utilizaron botellas de PET de 600 o 1500 mL conteniendo agua sintética tipo reto, formulada por la American Science Foundation (NSF) y descrita por Amy y colaboradores (2005) (ver cuadro 1). En dichas botellas se agregó As (V) hasta obtener una concentración de 200 µg/L. Posteriormente, se dosificaron 0,6 g/L de hierro cero-valente obtenido de hilos de hierro del utilizado para el lavado de utensilios de cocina o "brillo comercial". Dichas botellas se expusieron a la radiación solar al colocarlas inclinadas a ras del suelo a partir de las 8 am. Posteriormente, se tomó una muestra de agua de una botella diferente cada hora durante las siguientes seis horas. Las muestras de agua se filtraron utilizando papel filtro < 2 µm (marca Albet) y acidificaron con ácido nítrico (1+1) para el posterior análisis, al menos en duplicado, de arsénico y hierro. Inmediatamente después de la filtración, se determinó la turbidez y el color del filtrado en algunas muestras. Además, de las botellas mencionadas, se analizó el comportamiento de dos blancos: uno con hierro que no fue expuesto a la radiación solar y otro sin hierro que sí se colocó a la luz solar. En total se realizaron tres experimentos: el primero en un día nublado (A) y el segundo y tercero en días soleados (B y C). La intensidad de la radiación solar fue detectada durante el periodo de los experimentos en una estación meteorológica localizada en el Campus Central del Tecnológico de Costa Rica (TEC) en Cartago.

Ensayos de coagulación-floculación con cloruro de hierro (III) a nivel de laboratorio

Se utilizó un aparato de prueba de jarras Phipps & Bird PB-700 con seis jarras, que contenían un litro de agua reto tipo NSF. Mediante las pruebas se definió el pH óptimo, las dosis óptimas de coagulante, floculante y su tiempo óptimo de floculación; además se determinó el tiempo de sedimentación de los flóculos. En cuanto a la determinación de las dosis óptimas, el tiempo de coagulación empleado correspondió a 1 min a 150 rpm y la floculación a 10 min a 20 rpm; variando este último para identificar el tiempo óptimo. Posteriormente, se filtraron las muestras utilizando papel filtro Whatman No. 40. Se utilizó el floculante sintético comercial FK-930-S (polímero de cloruro de polidialil-dimetilamonio) y una disolución de mozote (*Triumfetta semitriloba*) como floculante natural. Se preparó una disolución madre de 0,1% v/v de floculante sintético a partir del polímero catiónico 100% puro. El mozote se preparó a partir de 20 g cortado en trozos de 2-3 cm, en 100 mL de agua ultrapura. La disolución se agitó durante 30 min para posteriormente refrigerarse un día antes de su utilización. Para los ensayos, se filtró el jugo de mozote con un filtro de tela de algodón comercial de los que se usan para chorrear café, obteniéndose una disolución de 200 000 mg/L. Todas las pruebas realizadas tuvieron una concentración de arsénico pentavalente cercano a 200 µg/L, debido a que este es un valor cercano a uno de los más altos encontrado en la zona afectada, de 0,187 mg/L (187 µg/L) (Astorga, 2013).

Sistema piloto de coagulación-floculación

Una vez definidas las condiciones apropiadas para la remoción de As, se construyó un sistema con capacidad para producir 15 L de agua libre de arsénico para su uso a nivel domiciliar. El sistema consistió en un tanque de 20 L para la coagulación-floculación (tanque para mezcla), que se encuentra en la parte superior (figura 1) y un segundo recipiente también de 20 L en el que se colocó el medio filtrante. Dicho medio consistió (en orden de superior a inferior): 10 cm de arena de 0,5 mm y un lecho de soporte de 2,5 cm de arena de 1 mm y 6 cm de arena de 2 mm. Además, se colocó una malla a la salida del tanque para evitar pérdida de material granular. La altura de 10 cm de arena de 0,5 mm se definió considerando la capacidad del tanque basado en el rango de valores de 20 cm (Ali et al., 2001) a 7,62 cm (Meng, Korfiatis, Christodoulatos y Bang, 2001) reportados en la literatura para sistemas de punto de uso. Se

utilizó arena como un material reutilizable, que se extrae del filtro y se lava con agua, como se ha hecho con otros sistemas de punto de uso (Ali et al., 2001; Meng et al., 2001). Inicialmente, ambos tanques se conectaron a través de la tubería de conexión por gravedad, sin embargo, en la práctica se determinó que es suficiente usar un pascón de cocina como difusor para distribuir el agua en la superficie del medio filtrante. Por último, se colocó otra llave que se ubica en la parte inferior del filtro para la salida del agua. Para proporcionar la agitación necesaria para la coagulación y floculación se utilizó un molinillo de madera.

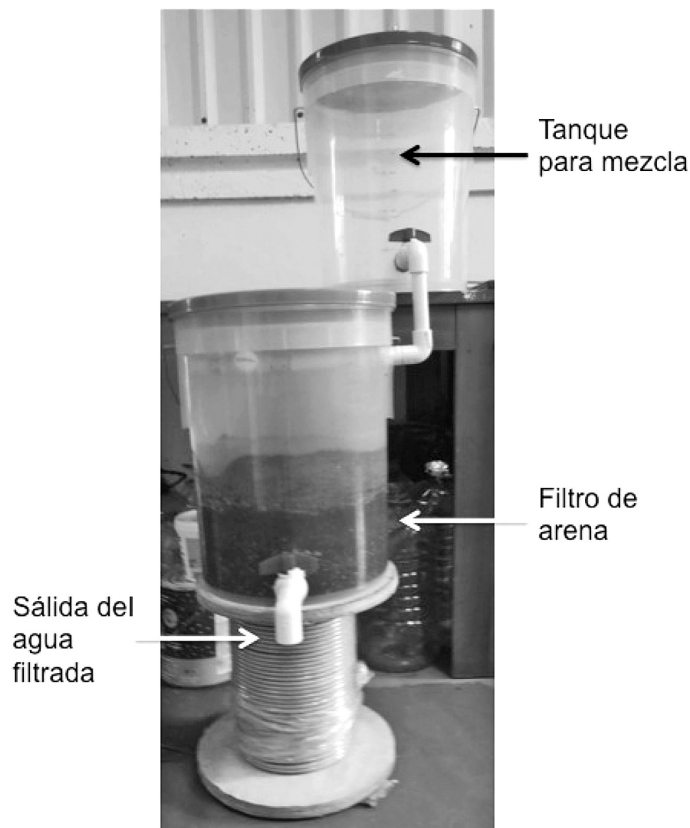


Figura 1. Prototipo desarrollado para la remoción domiciliar de arsénico

Pruebas al prototipo para remoción de arsénico de uso doméstico

Después de la confección del prototipo se realizaron 10 pruebas con 15 L del agua NSF y con las condiciones óptimas encontradas anteriormente. También, se evaluaron, utilizando las mismas condiciones, una muestra de agua de la Zona Norte y otra del Pacífico Norte del país con el fin de probar la eficiencia del prototipo con agua de las zonas afectadas. La concentración de arsénico de la muestra de la Zona Norte fue de 50 $\mu\text{g/L}$ y de la muestra del Pacífico Norte de 10 $\mu\text{g/L}$. Estas muestras se evaluaron de forma demostrativa a personas de las comunidades afectadas durante giras de campo.

Métodos de análisis y composición del agua reto

La determinación del contenido de arsénico en agua se realizó mediante el método 3114b del Standard Methods (APHA, AWWA y WPCF, 2005) por espectrofotometría de absorción atómica (AA) por generación de hidruros (Clesceri, Greenberg y Eaton, 1999). Se utilizó un

espectrofotometro marca Perkin Elmer AAnalyst 800. El método consistió en la generación de hidruros y la formación de AsH_3 (arsina) mediante la reacción con el borohidruro de sodio y una mezcla reductora (mezcla 1:1 de disoluciones acuosas de yoduro de potasio al 5% m/v y ácido ascórbico al 5% m/v). Posteriormente, el arsénico trivalente total se analizó en el espectrómetro de absorción atómica, en el cual se convirtieron en átomos en su fase gaseosa (Armienta, Castro de Esparza, López, Piñeiro y Sassone, 2009). El límite de detección es de $0,03 \mu\text{g/L}$ y el de cuantificación de $0,1 \mu\text{g/L}$. Estos se determinaron según lo que indican Miller y Miller (2002). Por otro lado, la incertidumbre de $1 \mu\text{g/L}$ se calculó según el procedimiento descrito por Rivas y Fernández (2006).

Cuadro 1. Composición del agua tipo reto (Amy et al., 2005)

Parámetro	Concentración (mg/L)
Sodio	74
Calcio	40
Magnesio	13
Alcalinidad (CaCO_3)	150
Cloruros	71
Fluoruros	1
Sulfatos	48
Nitratos (N)	2
Fosfato (P)	0,12
Sílice (SiO_2)	20

Fuente: Amy et al., 2005.

Para el análisis de hierro residual se siguió el método de fenantrolina 3500-Fe B del Standard Methods (APHA et al., 2005) utilizando un colorímetro LaMotte modelo Smart 3. El límite de detección fue de $0,12 \text{ mg/L}$. Se utilizó el mismo equipo en la determinación de turbidez por el método de absorción. Además, los métodos de muestreo, preservación y manipulación de las muestras se realizaron siguiendo las recomendaciones del Standard Methods (APHA et al., 2005). El agua tipo reto consistió en la adición de una serie de sales tipo primario a agua ultra pura (Mille Q) según el cuadro 1.

Resultados y discusión

Remoción de arsénico mediante el sistema SORAS modificado

Según Litter, Morgada y Bundschuh (2010), la oxidación de hierro cero-valente en la presencia de agua y oxígeno produce hierro (II) y posteriormente diferentes óxidos o hidróxidos de hierro (II) y (III). En dichos materiales el arsénico puede adsorberse o coprecipitar. La figura 2 muestra que la remoción del arsénico hasta niveles por debajo de $10 \mu\text{g/L}$ ocurrió después de dos horas de exposición en el caso de días soleados (líneas B y C) y cuatro horas cuando el día estuvo nublado (línea A). El tiempo de exposición necesario para la remoción por debajo del límite establecido en los experimentos realizados en días soleados resultó igual al reportado por Litter

y colaboradores (2012) utilizando la misma dosificación de hierro y agua sintética pero con luz ultravioleta artificial (366 nm; 0,800 W/m²).

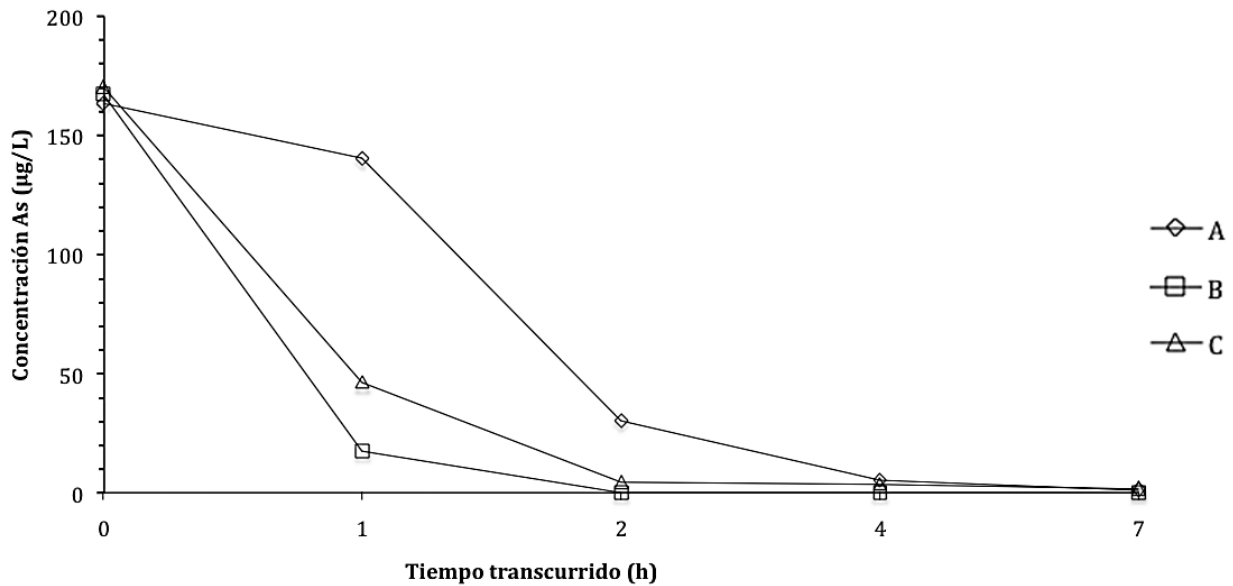


Figura 2. Remoción de arsénico mediante SORAS modificado

Como ilustra la figura 3a, en las condiciones en que se realizó el presente estudio para el caso del experimento A, al estar el día nublado, no se tuvo suficiente radiación durante todo el tiempo de exposición, siendo menor a 0,400 W/m² después de la primera hora y media. En el caso del segundo experimento, como se muestra en la figura 3b, se consideró como un día bastante soleado (la radiación siempre estuvo por encima de 1,200 W/m² durante las primeras dos horas de exposición). Finalmente, en la figura 3c se indica que la radiación estuvo por encima de 0,600 W/m² logrando una remoción eficiente de arsénico después de dos horas. Así, los datos sugieren que probablemente la radiación mínima durante dos horas está cerca de 0,600 W/m². No obstante, en el caso de un día nublado se debe extender el tiempo de exposición. Se requieren investigaciones adicionales para determinar estos límites de exposición y características del día.

Por último, el agua obtenida después del proceso de filtración presentó en algunos casos concentraciones de hierro levemente superiores a la norma (0,3 mg/L), lo que sugiere que se deben realizar más experimentos para definir esta variable. Esta variable, al igual que la influencia del pH del agua que va a ser tratada y el trabajo con aguas reales, son aspectos que se están investigando.

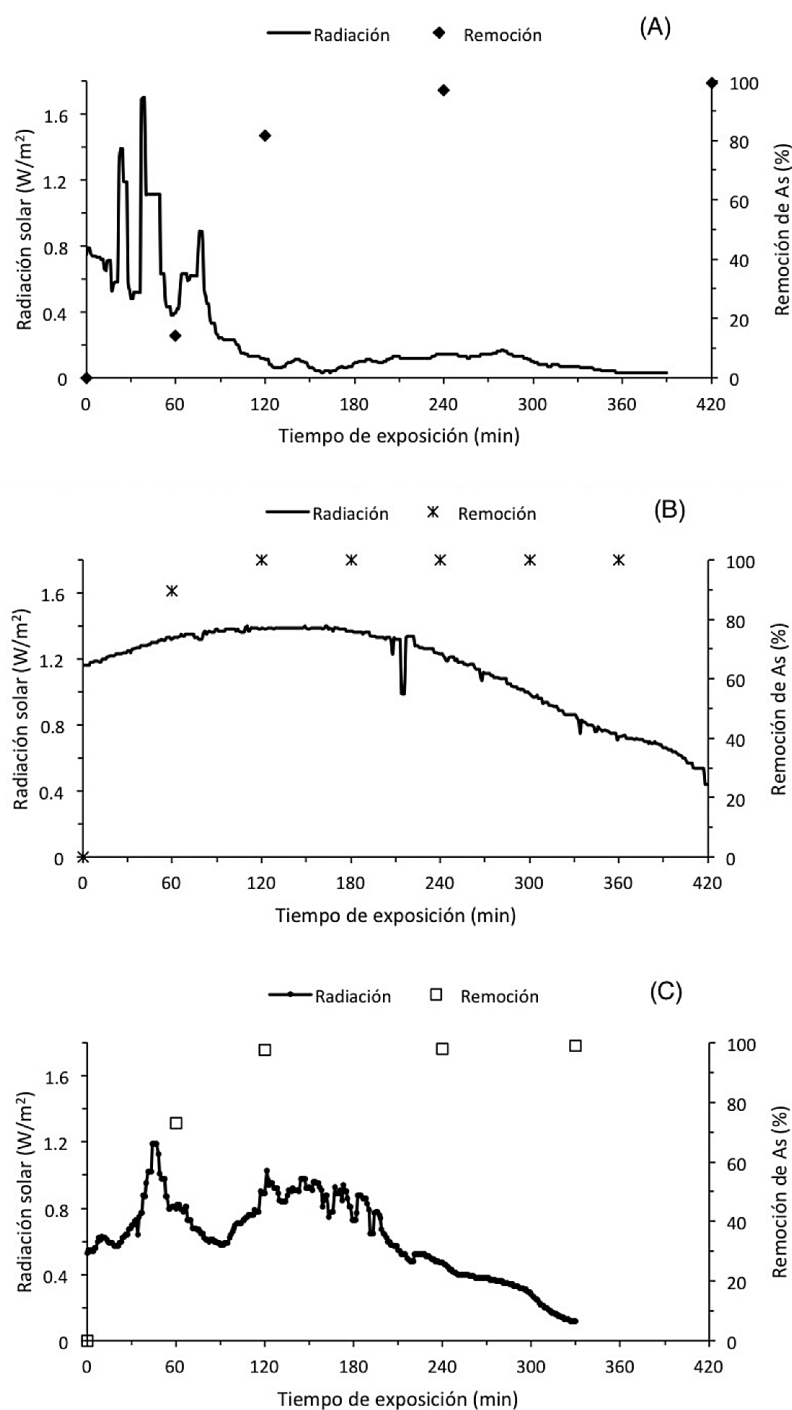


Figura 3. Remoción de arsénico por el método de SORAS modificado en tres diferentes condiciones de radiación natural

Condiciones apropiadas de floculación-coagulación

La efectividad de un proceso de coagulación-floculación depende de una serie de variables que se deben optimizar. En el cuadro 2 se observan las condiciones determinadas mediante pruebas de jarras para la remoción efectiva de arsénico de agua reto NSF hasta valores por debajo de la normativa. El detalle de los ensayos realizados para obtener dichas condiciones lo describe Rojas-Chaves (2014).

Cuadro 2. Condiciones óptimas de remoción de arsénico por coagulación/floculación usando cloruro de hierro y dos diferentes floculantes

Parámetro	Polimero catiónico	Mozote
pH	6	6
FeCl ₃ (mg/L)	12	14
Floculante (mg/L)	1	250
Tiempo de floculación (min)	1	1
Tiempo de sedimentación (min)	20	20

En relación con el pH, de manera similar a lo reportado por Lakshmanan, Clifford y Samanta (2008), la eficiencia del tratamiento aumentó conforme el pH del agua disminuyó de 7,25 a 6,00, siendo este último el valor óptimo para la remoción del arsénico sobre la superficie del hidróxido de hierro formado en el agua. Además, la concentración de cloruro de hierro (III) óptima es baja en comparación con otros sistemas de punto de uso, en los que las concentraciones de cloruro de hierro (III) fueron de 20 mg/L (Ali et al., 2001) y 25 mg/L (Bordoloi, Nath, Gogoi y Dutta, 2013). En este caso, se obtuvieron mejores resultados debido a que, contrariamente a los estudios citados, se usó un floculante y para el caso de Ali y colaboradores (2001) y se utilizaron concentraciones más altas de arsénico en el orden de 500-1000 µg/L. El aumento en la remoción de arsénico al utilizar un floculante de tipo catiónico también ha sido observado por Cheng y colaboradores (1994) cuando la concentración de cloruro de hierro (III) es menor o igual a 20 mg/L.

La concentración óptima de polímero catiónico estuvo en el rango de 1-1,8 mg/L con una remoción del 96%. En el caso del mozote, la dosis óptima fue de 250 mg/L correspondiente a una remoción del 98%. Esta dosis se encuentra dentro del rango (200-400 mg/L) similar a la obtenida por Quirós y colaboradores (2010b) al aplicar mozote en la remoción de 100% de turbiedad y color en agua sintética con 20 UNT de turbiedad inicial. Es importante señalar que en el estudio mencionado se empleó sulfato de aluminio como coagulante, con una dosis de 1 mg/L.

Considerando que la intención es utilizar el sistema estudiado a nivel domiciliario, una agitación manual prolongada puede resultar difícil para el usuario, por lo que se evaluó el tiempo de floculación. Los porcentajes de remoción de arsénico fueron mayores al 90% en todos los tiempos empleados. Para el floculante natural, se tomó como tiempo óptimo 1 minuto, cuya concentración final de arsénico correspondió a 4 µg/L. Por otro lado, a pesar de que la mayor remoción con el polímero catiónico fue a los 4 minutos, en 1 minuto se alcanzó una concentración final de arsénico de 9 µg/L, por lo que se seleccionó como tiempo óptimo.

Otro aspecto importante que se logró determinar fue el tiempo mínimo de sedimentación necesario para evitar la rápida saturación del filtro de arena. Así, se definió el tiempo requerido para obtener una turbiedad de 5 UNT (valor máximo admisible por el Reglamento de Calidad de Agua Potable (Ministerio de Salud, 2005) previo a la filtración. Al utilizar el polímero, a partir de los 23 minutos la turbiedad alcanzó el valor mencionado, mientras que con el mozote la sedimentación fue un poco más rápida, a los 20 minutos, en que alcanzó un valor menor de 5 UNT. El anterior valor de tiempo se seleccionó para mayor facilidad tanto para el polímero catiónico como para el mozote.

Pruebas al prototipo para remoción de arsénico de uso doméstico

Una vez obtenidas las condiciones óptimas de coagulación-floculación, se realizaron los ensayos utilizando el prototipo de uso domiciliario (figura 1). Al utilizar el agua tipo NSF con 200 µgAs/L en 10 ensayos diferentes, el agua tratada presentó concentraciones de arsénico residual inferior a los 10 µg/L (remoción del 99%). Con respecto a otros sistemas de punto de uso similares, el prototipo del presente estudio empleó una cantidad de cloruro de hierro (III) inferior. En el caso de los sistemas de Ali y colaboradores (2001) y Bordoloi y colaboradores (2013), las dosis fueron de 20 y 25 mg/L de FeCl₃ y el rango de arsénico entre 500-1000 y 196-212 µg/L, respectivamente. Dos aspectos importantes que se controlaron fueron la cantidad de hierro residual y la turbiedad residual después de realizada la filtración, ya que podían impartirle sabor, color y material particulado al agua, respectivamente. En los ensayos realizados, solo en la primera prueba la turbiedad estuvo en 6,0 ± 01 UNT, levemente por encima de la norma (5,0 UNT).

Al evaluar el sistema utilizando dos muestras de agua de las zonas afectadas (con 50µgAs/L y 10µ/L), el porcentaje de remoción en estos casos fue de 90% y 70%, respectivamente. Ambos casos menores que el resultante con las pruebas con el agua NSF; sin embargo, la concentración de arsénico cumplió la normativa. De igual manera, la turbiedad, el color y el hierro residual estuvieron por debajo de lo requerido. Además, las muestras filtradas no presentaron problemas de olor o sabor. Entre las razones por las que se obtuvieron eficiencias ligeramente menores a las encontradas con el agua NSF, es importante destacar que no se conocía la especiación de arsénico en el agua; este factor puede haber influido debido a que una mayor proporción de arsénico trivalente disminuye la eficiencia del tratamiento, dado que es más difícil de remover del agua que el arsénico pentavalente (Áviles, Tirado, Bedolla y Ramírez, 2003; Sancha, 2010); lo cual es muy probable, ya que al tratarse de agua subterránea, posiblemente predomina el arsénico trivalente (Herrera, 2013). Otra razón que puede reducir el porcentaje de remoción es la presencia de interferencias en el agua, como el sílice y fosfatos (Lakshmanan, 2007; Laky y Liciskó, 2011). Según Araya (com. Pers., diciembre de 2014) en las zonas afectadas se han encontrado concentraciones de sílice de hasta 120 µg/L, muy superiores a 20mg/L del agua NSF.

Conclusiones y recomendaciones

El uso del procedimiento SORAS modificado durante días soleados con suficiente radiación natural (posiblemente por encima de 0,600 W/m²) permite la remoción de arsénico desde 200 µg/L hasta valores por debajo de la norma en al menos 2 horas de exposición. En días nublados se debe extender ese tiempo hasta las 4 horas. No obstante, se requiere más investigación para definir estos tiempos adecuadamente. Aunado a ello, el agua producida por el método SORAS modificado puede presentar residuales de hierro por encima de la norma (0,3 mg/L), por tanto, se debe determinar la cantidad mínima de lana de hierro que permita una remoción apropiada de arsénico y un residual de hierro seguro.

En el caso de la técnica de coagulación-floculación, el valor óptimo de pH fue el de 6, lo cual es congruente con lo expuesto en la literatura, que indica que a pH menor de 8, el porcentaje de remoción es mayor. Las dosis de cloruro de hierro (III) de 12 y 14 mg/L para el polímero y el mozote, respectivamente, son bajas en comparación con otros sistemas de punto de uso que han empleado concentraciones de entre 20 y 25 mg/L. Estas bajas dosis de coagulante derivan en un tratamiento menos costoso. Las concentraciones óptimas de los floculantes fueron de 1 mg/L de polímero y 250 mg/L de mozote. En el caso del polímero catiónico, es una dosis baja pues se han utilizado concentraciones de hasta 4 mg/L. Por otro lado, el mozote no se ha

usado para la remoción de arsénico, sin embargo, el valor utilizado es bajo, ya que las dosis empleadas para la eliminación de turbiedad se encuentran entre 200 y 400 mg/L.

Entre las principales ventajas que presenta el prototipo está el hecho de que es desmontable, lo que facilita su mantenimiento; además, su confección es muy sencilla. Otra ventaja es su bajo costo, no solo en los materiales necesarios sino también en los reactivos utilizados en el tratamiento, como el cloruro de hierro (III) y el mozote. El prototipo presentó una menor eficiencia con las aguas naturales; esto se debe probablemente a que puede existir arsénico trivalente o la presencia de otras interferencias en el agua, como el sílice. Sin embargo, con el tratamiento se obtuvo una concentración de arsénico menor a 10 µg/L, lo cual es de esperarse puesto que al emplear el agua NSF con la intención de probar el sistema, se vaticina que sea eficaz en la remoción de arsénico. Además, es efectivo en la remoción del hidróxido de hierro (III) del agua, lo que se refleja en la calidad del agua en los valores de hierro total, turbiedad y color.

Finalmente, aunque en el agua reto se incluyen especies interferentes, en ambas tecnologías se debe evaluar su efecto con más detalle. Dado que cada tipo de agua presenta características únicas, antes de aplicar la tecnología en un agua específica se recomienda efectuar los ensayos pertinentes que garanticen una remoción de arsénico apropiada.

Bibliografía

- Ali, M.A., Badruzzaman, A.B.M., Jalil, M.A., Hossain, M.D., Hussainuzzaman, M.M., Badruzzaman, M. & Akter, N. (2001). Development of low-cost technologies for removal of arsenic from groundwater. En Bangladesh University of Engineering & Technology & United Nations University (Eds.), *Technologies for Arsenic Removal from Drinking Water* (pp. 99-120). Dhaka.
- Amy, G., Chen, H.C., Drizo, A., von Gunten, U., Brandhuber, P., Hund, R. & Banerjee, K. (2005). *Adsorbent treatment technologies for arsenic removal* (p. 164). Denver.
- APHA, AWWA & WPCF. (2005). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 21 ed. Washington D.C.: American Public Health Association.
- Armienta, M.A., Castro de Esparza, M.L., López, C.M., Piñeiro, A.E. & Sassone, A.H. (2009). Determinación de arsénico por el método: absorción atómica-generación de hidruros-FIAS. En M.I. Litter, M.A. Armienta y S. Farías (Eds.), *Metodologías analíticas para la determinación y especiación de arsénico en aguas y suelos*. Argentina: CYTED.
- Astorga, Y. (2013). *Decimoveno Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible: Gestión del recurso hídrico*. San José: Programa Estado de la Nación.
- Avilés, M., Tirado, M., Bedolla, L. & Ramírez, A. (2003). Remoción de arsénico a nivel domiciliario. En C. Díaz (Ed.), *Agua potable para comunidades rurales, reúso y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas* (pp. 1-14). Madrid: Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua.
- Bordoloi, S., Nath, S.K., Gogoi, S. & Dutta, R.K. (2013). Arsenic and iron removal from groundwater by oxidation-coagulation at optimized pH: laboratory and field studies. *Journal of Hazardous Materials*, 260, 618-26. doi:10.1016/j.jhazmat.2013.06.017
- Bundschuh, J., Litter, M.I., Parvez, F., Román-Ross, G., Nicolli, H.B., Jean, J.S. & Toujaguez, R. (2012). One century of arsenic exposure in Latin America: A review of history and occurrence from 14 countries. *Science of the Total Environment*. doi:10.1016/j.scitotenv.2011.06.024
- Clesceri, L., Greenberg, A. & Eaton, A. (Eds.). (1999). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20 ed. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.
- Herrera, L.M. (mayo, 2013). Contaminación con arsénico afecta agua de 24 pueblos. *La Nación*.
- Hwang, S.K. (2002). *Point-of-Use Arsenic Removal from Drinking Water in Nepal Using Coagulation and Filtration*. Massachusetts Institute Of Technology.
- Jain, C.K. & Singh, R.D. (2012). Technological options for the removal of arsenic with special reference to South East Asia. *Journal of Environmental Management*, 107, 1-18. doi:10.1016/j.jenvman.2012.04.016

- Lakshmanan, D. (2007). *A systematic study of arsenic removal from drinking water using coagulation-filtration and electrocoagulation-filtration*. University of Houston.
- Lakshmanan, D., Clifford, D. & Samanta, G. (2008). Arsenic Removal by Coagulation with Aluminium, Iron, Titanium, and Zirconium. *American Water Works Association*, 100(2), 76-88.
- Laky, D. & Liczkó, I. (2011). Arsenic removal by ferric-chloride coagulation – effect of phosphate, bicarbonate and silicate. *Water Science & Technology*, 64(5), 1046. doi:10.2166/wst.2011.419
- Litter, M.I., Morgada, M.E., Lin, H., García, M.G., Hidalgo, M. del V., D'Hiriart, J. & Mateu, M. (2010). Experiencias de remoción de arsénico por tecnologías fotoquímicas y solares en Argentina. En M.I. Litter, A.M. Sancha y A.M. Ingallinella (Eds.), *Iberoarsen Tecnologías económicas para el abatimiento del arsénico en aguas* (pp. 191-208). Argentina: CYTED.
- Litter, M.I., Alarcón-Herrera, M.T., Arenas, M.J., Armienta, M.A., Avilés, M., Cáceres, R.E. & Pérez-Carrera, A. (2012). Small-scale and household methods to remove arsenic from water for drinking purposes in Latin America. *The Science of the Total Environment*, 429, 107-22. doi:10.1016/j.scitotenv.2011.05.004
- Meng, X., Korfiatis, G.P., Christodoulatos, C. & Bang, S. (2001). Treatment of arsenic in Bangladesh well water using a household co-precipitation and filtration system. *Water Research*, 35(12), 2805-2810. doi:10.1016/S0043-1354(01)00007-0
- Miller, J.N. & Miller, J. (2002). Métodos de calibración en análisis instrumental: regresión y correlación. En *Estadística y Quimiometría para Química Analítica*. 4 ed. (pp. 111-155). Madrid: Pearson Educación, S.A.
- Ministerio de Salud. (2005). *Reglamento para la Calidad del Agua Potable*. Pub. L. No. 32327-S (2005). Costa Rica: Diario *La Gaceta* No. 84.
- OPS. (2005). *Guía para el mejoramiento de la calidad del agua a nivel casero*. Lima: OPS.
- Programa Estado de la Nación. (2013). *Decimonoveno Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible*. San José: PEN.
- Quirós, N., Vargas, M. & Jiménez, J. (2010). *Extracción y análisis de polímeros obtenidos a partir de varios productos naturales, para ser usados como potenciales floculantes en el tratamiento de agua para consumo humano* (pp. 1-30). Cartago, C.R.: Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Rivas, H. & Fernández, P. (2006). Estimación de incertidumbre para medición de Zn por espectrofotometría de absorción atómica-flama. En *Simposio de Metrología* (p. 6).
- Rojas-Chaves, P. (2014). *Diseño de un prototipo de uso doméstico para la remoción de arsénico en agua potable, basado en coagulación/floculación con cloruro de hierro (III)*. Cartago, C.R.: Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Sancha, A.M. (2010). Remoción de arsénico por coagulación y precipitación. En M.I. Litter, A.M. Sancha y A.M. Ingallinella (Eds.), *Tecnologías económicas para el abatimiento de arsénico en aguas* (pp. 33-41). Argentina: CYTED.
- WHO. (2011). *Guidelines for Drinking-water Quality*. 4 ed. Ginebra: World Health Organization.

Emisión de compuestos tóxicos del aire de fuentes móviles en la Gran Área Metropolitana de Costa Rica en 2007

Emissions of Air Toxic Compounds in Mobile Source for the Greater Metropolitan Area of Costa Rica in 2007

Javier E. Rodríguez-Yáñez¹

Fecha de recepción: 28 de marzo del 2014
Fecha de aprobación: 3 de febrero del 2015

Rodríguez-Yáñez, J. Emisión de compuestos tóxicos del aire de fuentes móviles en la Gran Área Metropolitana de Costa Rica en 2007. *Tecnología en Marcha*. Vol. 28, N° 4, Octubre-Diciembre. Pág 66-77.

¹ Ingeniero químico, uruguayo. Química Marina, Escuela de Química, Universidad Nacional. Campus Omar Dengo, Apdo. 863000, Heredia, Costa Rica. Teléfono: (506)2277-3351. Correo electrónico: urutico@gmail.com

Palabras clave

Fuentes móviles; tóxico; emisiones; GAM, Costa Rica.

Resumen

Se realizó una estimación de las emisiones de compuestos tóxicos generados por la flota vehicular en la Gran Área Metropolitana de Costa Rica para el año 2007. El cálculo se realizó mediante factores de emisión obtenidos con el modelo MOBILE 6 de la EPA, así como los datos de actividad aportados por la Dirección Sectorial de Energía y el Ministerio de Obras Públicas y Transportes.

Del total de 914.486 toneladas emitidas por fuentes móviles, de los contaminantes tóxicos evaluados, el 46% está asociada al benceno y el 26,8% al formaldehído. Las emisiones provienen principalmente de automóviles particulares y microbuses o transporte de carga liviana a gasolina, que representan el 70% del total.

Keywords

Mobile sources; toxic; emissions; GAM; Costa Rica.

Abstract

We estimated emissions of toxic compounds generated by the vehicle fleet in the GAM for 2007. This calculation was performed using emission factors obtained with the model of the EPA MOBILE 6 and activity data provided by the Energy Sector Management and the Ministry of Public Works and Transportation.

Of the total 914,486 tons emitted by mobile sources of toxic pollutants evaluated, we have that 46% is associated with Benzene and Formaldehyde 26.8%. The emissions are mainly caused by private cars and light duty cargo or minibuses of gasoline powered, which represent 70% of total emissions.

Introducción

Los vehículos automotores que circulan por las carreteras son aquellos como automóviles, camiones y autobuses diseñados para operar en las vías públicas. En la mayor parte de las áreas urbanas, los vehículos automotores contribuyen en gran medida a las emisiones de gases al ambiente. Dada la gran magnitud de sus emisiones y las consideraciones especiales que se requieren para calcularlas, los vehículos automotores se tratan separadamente de otras fuentes de emisión (trenes, barcos o aviones).

Las emisiones vehiculares principales están constituidas por dióxido de carbono (CO₂) compuestos volátiles orgánicos (VOC), monóxido de carbono (CO), óxido de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO₂), partículas (PM). Algunas de estas especies reducen la visibilidad y otras son compuestos tóxicos del aire, en los cuales se enfoca este trabajo.

Dichas emisiones resultan de varios procesos diferentes que se presentan en la figura 1. Las emisiones más comúnmente consideradas son las del escape, que resultan de la combustión y se emiten por el tubo de escape del vehículo, y las que provienen de varios procesos de emisión evaporativa.

Las metodologías de estimación de emisiones utilizan programas de modelado computacional, que permiten generar factores asociados a los diferentes tipos de vehículos y combustibles.

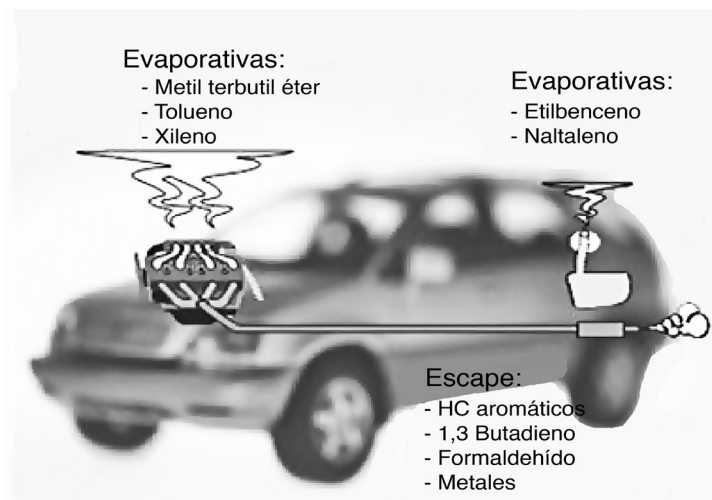


Figura 1. Tipos de emisiones y contaminantes tóxicos de fuentes móviles (ZMVM, 2004)

Metodología

La metodología utilizada para el estudio se basa en las consideraciones de aplicación del programa MOBILE 6 de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), con el cual se obtienen factores de emisión considerando las características de la flota vehicular y las condiciones de escenario (clima, carreteras, etc.). A partir de estos factores es posible realizar el cálculo de estimación de emisiones considerando la actividad vehicular.

La ecuación básica utilizada para estimar las emisiones de los vehículos automotores involucra los datos de actividad vehicular y un factor de emisión.

$$E_p = KRV \times FE_p \quad (1)$$

donde:

E_p = Emisiones totales del contaminante p

KRV = Kilómetros recorridos por el vehículo

FE_p = Factor de emisión del contaminante p

Para los vehículos automotores, los datos de actividad se refieren a los kilómetros recorridos por el vehículo (KRV), mientras que los factores de emisión se expresan en unidades de gramos de contaminante por KRV. Los KRV representan la distancia total recorrida por una población de vehículos en un periodo de tiempo determinado, siendo preferible estimar los KRV a partir de modelos de transporte o de conteos de vehículos en circulación. En algunos casos, sin embargo, los KRV deben calcularse a partir de las estadísticas de consumo de combustible (Wark y Warne, 2007).

Para el cálculo de los factores de estimación de emisiones (FE_p) se utilizó el MOBILE 6 de la EPA, que define los principales compuestos tóxicos emitidos por fuentes móviles.

El MOBILE 6 es un programa de cómputo integrado por rutinas elaboradas en lenguaje de programación Fortran y se utiliza para el cálculo de factores de emisión para distintos tipos de vehículos con motores a gasolina y diesel. El programa calcula factores de emisión para 28 tipos diferentes de categorías vehiculares, asociadas principalmente al tipo de vehículo, combustible, peso y tecnología de motor. Además, permite plantear la estimación para 25 años de los vehículos considerados dentro del periodo 1952-2050, en este caso entre 1983 y 2007 (Herrera, 2012).

Estos tóxicos se asocian a otros parámetros característicos de la flota vehicular, tales como la edad y el tipo de vehículo, según definiciones previas del programa, así como a consideraciones sobre el combustible, la circulación y tipos de carreteras. Otros factores considerados son las características climáticas del área y, dependiendo de la disponibilidad de información o aproximaciones, se pueden incluir otros parámetros, tales como material particulado, condiciones legales, etc. Con este conjunto de características se plantea un escenario para el área de estudio. En este artículo se presenta la estimación de las emisiones de compuestos tóxicos del aire en la Gran Área Metropolitana (GAM) de Costa Rica para el año 2007 (Rodríguez, 2012).

Flota vehicular

Se dividió la flota vehicular en ocho categorías de vehículos a partir de datos de los derechos de circulación del Instituto Nacional de Seguros (INS), sobre los que se hicieron las siguientes consideraciones:

Del total de la flota de vehículos en circulación, se consideró que el 57% circulaba en la GAM, a partir de una estimación de venta de combustible en dicha área respecto al resto del país aportada por la Autoridad Reguladora de Servicios Públicos (ARESEP).

Se identificó, a través del INS, que de los autos modelo 2008, el 40% había sido inscrito durante 2007.

El parque automotor tiene un rango de antigüedades de más de 30 años, pero el programa de estimación de factores de emisión MOBILE 6 solo acepta categorías de hasta 25 años, por lo que se restringen las antigüedades, agrupándose los vehículos anteriores a 1983 en este año. De la misma forma los vehículos empadronados como 2008 pero que circularon en 2007 se integran al conteo de vehículos de 2007. La cuantificación por tipo de vehículo y año se presenta en el cuadro 1.

Las unidades de clasificación corresponden a: automóviles, carga liviana, carga pesada, autobuses, taxis, microbuses, motocicletas y bicimotos. No se utilizan las segregaciones por peso en las categorías base.

Para los efectos del cálculo de los factores de emisión, se consideraron como parte de la categoría de carga pesada los remolques y los tracto-camiones, los cuales se contaron como unidades independientes.

Se asume que los vehículos que circulan en la GAM tienen actividad los 365 días del año, despreciando la existencia del programa de restricción vehicular existente en la ciudad de San José, debido a que su área de cobertura no es significativa con respecto al área de estudio.

Las características de la flota vehicular se discutirán conjuntamente con los resultados.

Condiciones de escenario

Los factores de emisión se obtuvieron del modelado computacional del programa MOBILE 6 de la EPA, ajustado a las condiciones definidas como el escenario a modelar, en este caso la GAM en Costa Rica en 2007, descritas en el cuadro 2.

Cuadro 1. Flota vehicular considerada por tipo, modelo y combustible, según categoría de clasificación de MOBILE 6

Año	Automóviles		Carga liviana y microbuses		Carga pesada	Taxis		Autobuses	Motocicletas y bicimotos
	gasolina	diesel	gasolina	diesel		gasolina	diesel		
Anteriores	10865	21	771	5700	1455	0	0	2	915
1983	1216	2	31	229	86	0	0	0	81
1984	3121	7	103	762	290	0	0	1	87
1985	3728	8	183	1352	503	0	0	0	165
1986	5561	11	417	3086	402	0	0	3	161
1987	11177	22	587	4344	574	1	0	2	250
1988	13208	26	354	2614	633	1	0	6	256
1989	10606	22	393	2908	700	0	0	22	359
1990	11261	22	421	3115	717	0	0	100	505
1991	17258	35	332	2453	539	2	0	136	504
1992	22186	44	265	1951	597	2	0	182	589
1993	22020	44	343	2536	860	6	1	249	829
1994	22114	44	352	2605	847	793	70	392	1242
1995	19075	38	331	2446	1220	693	62	495	923
1996	15255	31	191	1410	975	414	37	421	880
1997	14592	30	212	1549	836	411	37	400	706
1998	11502	23	288	2127	1024	193	17	354	936
1999	12029	24	323	2377	1060	251	22	466	536
2000	12079	24	301	2203	1086	492	44	516	599
2001	11663	23	235	1716	520	398	35	495	658
2002	10617	21	246	1811	274	358	32	464	1035
2003	9093	18	290	2142	492	162	14	518	1222
2004	7499	15	216	1585	206	191	17	337	1551
2005	8031	16	234	1720	147	333	30	439	2729
2006	8845	18	346	2481	135	384	34	355	7399
2007	10583	21	459	3150	240	295	26	505	11823
2008	5983	12	282	2002	189	117	10	211	7968
Total	311.167	622	8.506	62.374	16.607	5.497	488	7.071	44.908
%	68,05%	0,14%	1,86%	13,64%	3,63%	1,20%	0,11%	1,55%	9,82%

Cuadro 2. Condiciones de la GAM para la aplicación del programa MOBILE 6

Parámetro MOBILE 6	Datos de entrada proporcionados
Región	Ciudad a una altitud menor o igual a 5 500 pies (1677 m)
Año calendario por evaluar	2007
Velocidad promedio de circulación en la región	33,1 km/h ⁽¹⁾
Temperatura máxima diaria para la región	25,8 °C ⁽²⁾
Temperatura mínima diaria para la región	17,4 °C ⁽²⁾
Presión de Vapor Reid de la gasolina	63,5 kPa ⁽³⁾
Contenido de azufre en diesel	2500 ppm ⁽³⁾
Contenido de azufre en gasolina	192,5 ppm ⁽³⁾
Contenido de oxigenados en gasolina	Menor a 1 % ⁽³⁾
Porcentaje de vapor en la gasolina a 200°F	50 ⁽³⁾
Porcentaje de vapor en la gasolina a 300°F	85 ⁽³⁾
Porcentaje de aromáticos en la gasolina	23 ⁽³⁾
Porcentaje de olefinas en la gasolina	20 ⁽³⁾
Porcentaje de benceno en la gasolina	0,8 ⁽³⁾

(1) PRUGAM, Transporte, 2009.

(2) Instituto Meteorológico Nacional.

(3) ARESEP, 2011.

En el MOBILE 6 utilizado, los factores de emisión de tóxicos se definen considerando sus emisiones en forma evaporativa y de escape como fracción de emisión en g/milla recorrida (1 milla= 1,609 km). Se considera que las emisiones evaporativas son solamente en vehículos a gasolina.

El MOBILE 6 tiene predefinidos los seis principales compuestos tóxicos más habituales: benceno, metil terbutil éter (MTEB), 1,3 butadieno, formaldehído, acetaldehído y acroleína. No se consideraron otros tóxicos.

Las fracciones de emisión de contaminantes tóxicos obtenidas a partir del MOBILE 6 se relacionan con las emisiones totales de tóxicos específicos a través de los kilómetros recorridos por los tipos y modelos.

Como parámetros del programa se consideraron los tipos de carretera (FTYPE) según lo estimado por el Ministerio de Obras Públicas y Transporte (MOPT) para el Primer Inventario de Contaminantes Criterio del GAM en 2007 (Herrera, 2011) y los tipos de emisión asociados a los vehículos (ETypes) especificados en el MOBILE.

Actividad vehicular

Los valores de actividad expresados como km recorrido por tipo de vehículo se obtuvieron a través de metodologías aplicadas en la GAM, desarrolladas por la Dirección Sectorial de Energía (DSE) a partir de encuestas, y se expresan en el cuadro 3 (DSE, 2009).

Cuadro 3. Estimación de la circulación según la DSE

Tipo de vehículo	km/día	km/año
Automóviles particulares	57	20768
Taxis	230	86109
Carga liviana	77	27990
Carga pesada	107	38934
Motocicletas	43	16091
Autobuses	118	4417

Con los datos del recorrido diario, los días que circularon los vehículos durante el año 2007 y el número de vehículos de acuerdo con la distribución por año modelo, se obtuvieron los kilómetros recorridos (KRV) por tipo de vehículo y año modelo, a partir de la ecuación:

$$KRV_{ij} = (KD_j) (NV_{ij}) (DA_i) \quad (2)$$

donde:

KRV_{ij} = Kilómetros recorridos por el tipo de vehículo i , del año modelo j [km/año].

KD_j = Kilómetros recorridos al día por el tipo de vehículo i [km/día].

NV_{ij} = Número de vehículos del tipo i , del año modelo j .

DA_i = Días al año que circulan los vehículos del tipo i [días/año].

Cálculo de emisión

A partir de lo anterior, es posible obtener la estimación de los valores de emisión anuales para los compuestos tóxicos del aire en la GAM, de acuerdo con una multiplicación relativa según:

$$E_{ijk} = (kEIM_{ij}) (FET_{ijk}) / (1,609 * 1.000.000) \quad (3)$$

donde:

E_{ijk} = Emisión del tipo de vehículo i , año modelo j , del contaminante k [t/año].

$kEIM_{ij}$ = km recorridos según EIM por categoría de clasificación del tipo de vehículo i , año modelo j [km/año].

FET_{ijk} = Factor de emisión de tóxicos como g/milla por categoría de clasificación del tipo de vehículo i , año modelo j , del contaminante k [g/milla]

1.000.000 = Factor de conversión de gramos a toneladas.

1,609 = Factor de conversión de millas a km.

Se calculan así las emisiones de cada contaminante para cada tipo de vehículo, modelo y año. Luego dichas emisiones se suman para obtener la emisión global de cada contaminante por fuentes móviles.

Resultados y discusión

La estimación de emisiones se resume en el cuadro 4, en el que se indican las emisiones totales de contaminantes tóxicos del aire por tipo de emisión.

Cuadro 4. Emisiones totales en t/año por tipo de emisión y contaminante

Tóxico	Escape (t/año)	Evaporación (t/año)	Total (t/año)	% de fuentes móviles
Benceno	421,217		421,22	46,06%
Formaldehído	245,188		245,19	26,81%
1,3 Butadieno	114,377		114,38	12,51%
Acetaldehído	90,599		90,60	9,91%
MTBE	7,340	24,146	31,49	3,44%
Acroleína	11,620		11,62	1,27%
TOTAL	890,340	24,146	914,486	

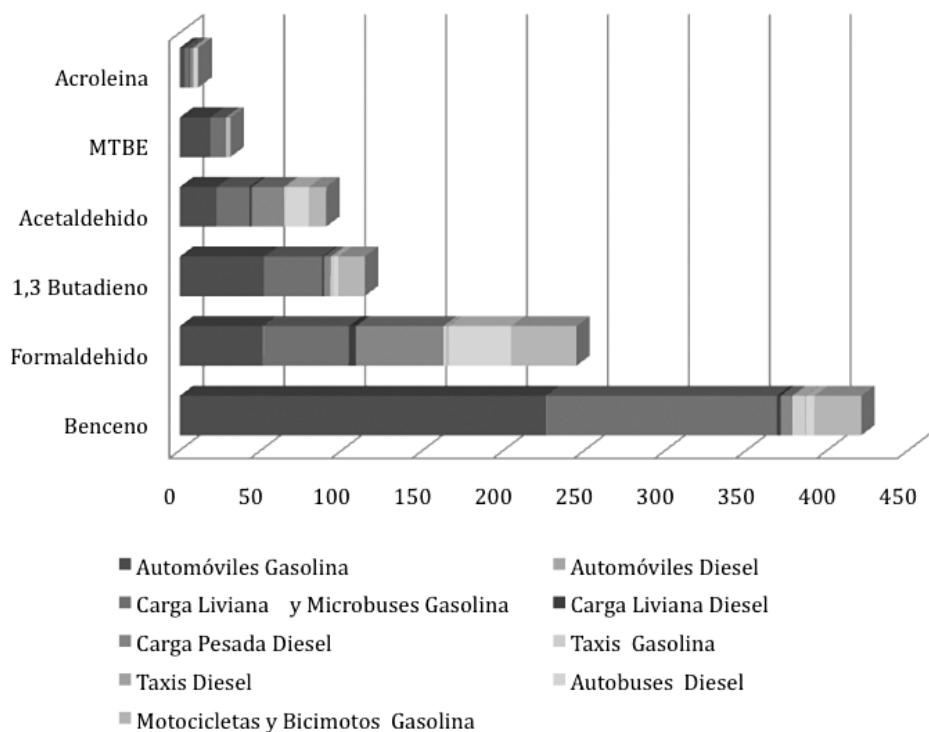


Figura 2. Emisiones totales por contaminante en t/año por tipo de vehículo

Las emisiones totales estimadas asociadas a fuentes móviles son aproximadamente 914,486 t/año para la GAM en 2007.

Del cuadro 4 se desprende que las emisiones principales se asocian con escapes, teniendo como los contaminantes más importantes el benceno y el formaldehído, seguidos en segundo orden por 1,3 butadieno, acetaldehído, MTBE y acroleína.

En el cuadro 5 y la figura 2 se aprecia que la categoría de *Automóviles particulares a gasolina* es la que presenta el mayor aporte en casi todos los contaminantes tóxicos considerados, pero afectando especialmente a la emisión de benceno. En segundo término los aportes de *Microbuses y Carga liviana a gasolina*, así como de *Motocicletas y Bicimotos* son los más

importantes, en ese orden. Las categorías *Carga pesada* y *Autobuses* a diesel también afectan en forma importante la emisión de formaldehído.

La distribución por edad muestra que hay un 23,3% de vehículos anteriores a 1991, los cuales no tienen tecnologías de control de emisiones. De estos, un 4,3% es anterior a 1983. El periodo 1991 y 1992 plantea una etapa de transición a vehículos con nuevas tecnologías de control de emisiones, representando un 10,3%.

La cantidad de automóviles a gasolina aumentó mucho a inicios de los años noventa, pasando de unos 5000 vehículos al año a mediados de los ochenta a más de 20.000, estabilizándose para el año 2000 en unos 10.000 vehículos por año. A partir del año 2000 se inicial el aumento de otros vehículos alternativos, en especial microbuses y motocicletas.

En general, para todos los tóxicos considerados, los vehículos más viejos son los que emiten en mayor proporción los contaminantes, debido a la falta de tecnologías de control, representando en promedio 50-60% de las emisiones en cada contaminante, como puede verse en la figura 3.

Como situaciones particulares, se tiene que para las *Motocicletas* y *Bicimotos* el 60% de la emisión está asociada a vehículos posteriores a 1992, mientras que para *Autobuses*, dadas las limitaciones de edad de las flotas, el 90% de las emisiones está asociado a modelos posteriores a 1992.

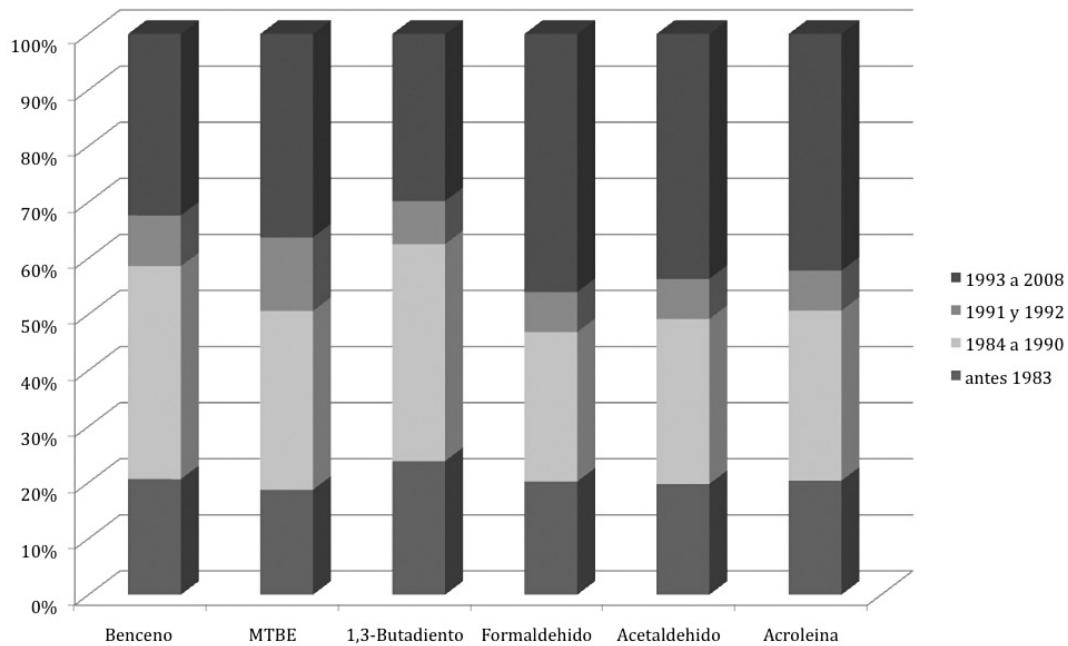


Figura 3. Distribución de misiones por edad de los vehículos

Cuadro 5. Detalle de emisiones por categoría de vehículo

Tipo de vehículo	Automóviles gasolina	Automóviles diesel	Carga liviana y microbuses a gasolina	Carga liviana diesel	Carga pesada diesel	Taxis gasolina	Taxis diesel	Autobuses diesel	Motocicletas y bicimotos gasolina
	(t/año)	(t/año)	(t/año)	(t/año)	(t/año)	(t/año)	(t/año)	(t/año)	(t/año)
Contaminante									
Benceno	226,592	0,137	142,431	2,251	7,278	7,981	0,352	5,224	28,972
Formaldehído	51,620	0,265	52,638	4,343	54,200	2,186	0,680	38,905	40,350
1,3 butadieno	52,502	0,062	35,583	1,013	4,228	1,450	0,159	3,035	16,345
Acetaldehído	23,174	0,084	19,914	1,384	19,961	0,836	0,214	14,328	10,701
MTBE	18,965	0	9,606	0	0	0,002	0	0	2,913
Acroleína	3,184	0,024	2,616	0,394	2,426	0,115	0,062	1,741	1,058
TOTAL (t/año)	376,037	0,572	262,787	9,385	88,093	12,570	1,467	63,233	100,340
%	41,12%	0,06%	28,74%	1,03%	9,63%	1,37%	0,16%	6,91%	10,97%

Conclusiones

En la GAM, las fuentes móviles generan un total de 914,486 toneladas de contaminantes tóxicos del aire. Dentro de los contaminantes evaluados, el principal es benceno, con un 46%, seguido del formaldehído, con un 26,8%. Los vehículos a gasolina aportan principalmente benceno, mientras que los de diesel lo hacen con formaldehído.

Los vehículos que más contaminantes producen son los *Automóviles particulares*, seguidos por los *Microbuses* o de *Carga liviana* a gasolina, que aportan en conjunto el 70% de las emisiones totales. Los primeros por su gran proporción en el parque vehicular (68%) y circulación, mientras que los segundos por el nivel de emisión (31 g/vehículo). Las *Motocicletas* son el tercer tipo de vehículos a gasolina con un porcentaje cercano al 11% de la emisión global.

Paralelamente, los vehículos de *Carga pesada* y *Autobuses*, que representan solo el 5,2% de la flota vehicular, emiten el 16,5% del total de emisiones.

Resulta de especial interés que los vehículos sin tecnologías de control de emisiones, anteriores a 1991, que son el 23,3% de la flota vehicular, generan el 54,6 % de las emisiones globales.

Estas relaciones son similares en otros inventarios para los *Automóviles particulares*, *Motocicletas* y *Autobuses*, en los que se marca de forma importante la utilización del transporte vehicular en la GAM.

Se destaca en este caso una diferencia importante en cuanto a las categorías asociadas al transporte de carga en la GAM, dado el nivel de emisión obtenido con un bajo porcentaje de vehículos. Esto podría explicarse por la actividad comercial e industrial en dicha área y las dificultades de circulación de cargas, convirtiéndose en un cruce de la red vial del país sin muchas alternativas de circulación rápida o fuera de ella.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo del Laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad Nacional y la Dirección de Gestión de Calidad Ambiental, así como del Ministerio de Ciencia y Tecnología, del cual el Ing. Javier Rodríguez es becario.

Bibliografía

- Dirección Sectorial de Energía. (2009). *Encuesta del recorrido medio anual de los vehículos en circulación en Costa Rica 2009*. Recuperado de www.dse.go.cr/es/03Publicaciones/04Tecnicas/RecorridoVehiculosCR2009.pdf
- Environmental Protection Agency (EPA). (2011). *MOBILE 6 Vehicle Emission Modeling Software*. Recuperado de www.epa.gov/oms/m6.htm
- Finlayson-Pitts, B.J. & Pitts J.N.Jr. (2004). *Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere*. Academic Press.
- Herrera J., Rojas, F., Rodríguez, S., Rojas, A. & Rodríguez, J. (2011). *Primer Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio del Aire para el Gran Área Metropolitana de Costa Rica en el 2007, Costa Rica*. Recuperado de www.digeca.go.cr/documentos/aire/Resumen%20ejecutivo%20del%20Inventario.pdf
- Herrera, J., Rodríguez, S. & Rojas J. (2012). Determinación de las emisiones de contaminantes del aire generadas por fuentes móviles en carreteras de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 25(1), 54-63.
- Instituto Nacional de Ecología. (2007). *Manual para la elaboración y usos de inventarios de emisiones*. México: Secretaría de Medio Ambiente.
- MINAET, MOPT, MS, UNA. (2008). *Plan Nacional para Mejorar la Calidad del Aire en el Gran Área Metropolitana de Costa Rica, 2008-2013*.
- PRUGAM. (2009). *Plan Regional Urbano para el Gran Área Metropolitana de Costa Rica, 2008-2030, Costa Rica*. Tomo VI Resumen Ejecutivo.

- Rodríguez J. (2012). *Inventario de Compuestos Tóxicos Peligrosos del Aire para el GAM en 2007*. Tesis de Maestría en Gestión y Estudios Ambientales, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.
- Secretaría de Medio Ambiente y Gobierno del Distrito Federal. (2006). *Inventario de Emisiones de Contaminantes Tóxicos del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México en 2004 (ZMVM; 2004)*, México.
- Secretaría de Medio Ambiente y Gobierno del Distrito Federal. (2010). *Inventario de Emisiones de Contaminantes Tóxicos del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México en 2008 (ZMVM; 2008)*, México.
- Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental-SEMARNAT y Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte. (2001). *Guía para la Correcta Selección y Empleo de Métodos de Estimación de Emisiones Contaminantes*, México.
- Solano, J., & Villalobos, R. (2000). *Regiones y subregiones climáticas de Costa Rica*. San José: Instituto Meteorológico Nacional. Instituto Meteorológico Nacional. Recuperado de www.imn.ac.cr
- Wark, K. & Warner, C.F. (2007). *Contaminación del Aire, origen y control*. México: Limusa.

Evaluación preliminar. Tratamiento del mercurio de fluorescentes y bombillas del alumbrado público

Preliminary assessment. Treatment of mercury from fluorescent light bulbs and street lighting

Juan Carlos Salas-Jiménez¹, William Benavides-Ramírez²

Fecha de recepción: 21 de octubre del 2014

Fecha de aprobación: 26 de enero del 2015

Salas-Jiménez, J. C.; Benavides-Ramírez, W. Evaluación preliminar. Tratamiento del mercurio de fluorescentes y bombillas del alumbrado público. *Tecnología en Marcha*. Vol. 28, N° 4, Octubre-Diciembre. Pág 78-85.

1 Escuela de Química. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: jcsalas@itcr.ac.cr

2 Escuela Ingeniería Ciencia de Materiales. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: wbenavides@itcr.ac.cr

Palabras clave

Inertización de mercurio; método de tratamiento de luminarias; manejo de fluorescentes.

Resumen

La actividad que se estudia es un proceso para inertizar el mercurio de las luminarias (desechos de bombillos y fluorescentes). Este consiste en triturar y mezclar los desechos con azufre aplicando calentamiento para formar un polímero de sulfuro de mercurio, que resulta un producto sólido, inerte, estable y de baja lixiviación que se puede depositar en un relleno sanitario. El calentamiento causa la generación de vapores de azufre molestos y de olor desagradable, por lo que se realizó un cambio del método de tratamiento sin calentar, mediante el uso de una mezcla del desecho de luminaria con azufre y mortero (cemento y arena). Las pruebas de laboratorio preliminares presentan resultados positivos para efectuar pruebas a nivel de planta piloto con este nuevo método a temperatura ambiente. Este proyecto se desarrolló en una de las actividades productivas del Centro de Investigación en Protección Ambiental (CIPA) del Tecnológico de Costa Rica.

Keywords

Inerting of mercury; method of treatment of luminaires; fluorescent management.

Abstract

The activity under study is a process for inerting mercury lights (fluorescent bulbs and waste). This is crushed and mixed waste sulfur heating applying a polymer to form mercury sulfide to yield a solid, inert, stable and low leaching, which may be disposed in a landfill. The heating causes annoying vapor generation sulfur odor which is unpleasant, so that a change of the treatment method was performed without heating by using a luminaire scrap mixture with sulfur and mortar (sand and cement), where preliminary laboratory tests show positive results, for testing at pilot plant with this new method at room temperature. This project was developed in one of the productive activities has the Center for Research in Environmental Protection (CIPA) of the Technological Institute of Costa Rica.

Introducción

Los tubos fluorescentes y las bombillas de uso doméstico y del alumbrado público (luminarias) se mezclan con los desechos ordinarios y se envían al relleno sanitario como sitio de disposición final. Este proceso es incorrecto ya que las luminarias contienen mercurio, un metal pesado de alta toxicidad que puede causar daños en el cerebro, los riñones y los pulmones y perjudicar seriamente un feto en desarrollo. Por este motivo, los tubos fluorescentes y bombillas se convierten en un desecho peligroso que se debe tratar para poder desecharlo adecuadamente en un relleno sanitario.

En 1998, el gobierno de Costa Rica aprobó el decreto N° 27000-MINAE “Reglamento sobre las características y el listado de los desechos peligrosos industriales” (MINAE, 1998a), el decreto N° 27001-MINAE “Reglamento para el Manejo de los Desechos Peligrosos Industriales” (MINAE, 1998b) y el Decreto N° 27002-MINAE, “Reglamento Residuos Peligrosos su Toxicidad” (MINAE, 1998c), con fundamento en los artículos 50 y 140, incisos 3 y 18 de la Constitución Política y de conformidad con lo dispuesto en los artículos 60 y 69 de la Ley Orgánica del

Ambiente N° 7554. Estos reglamentos tienen como objetivo establecer las características de los desechos peligrosos, el listado de los mismos, los límites de concentración máxima permisible, manejo desde su almacenamiento, recolección, transporte, tratamiento y disposición final y el procedimiento para la prueba de extracción.

El Reglamento para el Manejo de los Desechos Peligrosos Industriales tiene como objetivo establecer las normas y procedimientos para un manejo adecuado de estos materiales desde una perspectiva sanitaria y ambiental y se aplica a todo aquel que se considere peligroso según la definición sobre las características y el listado de los desechos peligrosos industriales (Decreto N° 27001-MINAE, 1998). El reglamento también establece que el generador de desechos peligrosos será el responsable de garantizar que su tratamiento y disposición final se realicen de acuerdo con las condiciones exigidas (artículo 2). Se establece, además, que el tratamiento de un producto o desecho peligroso es un método, técnica o proceso dirigido a cambiar las características físicas, químicas o biológicas, de manera que se produzca un desecho no peligroso o menos peligroso para su almacenaje, transporte o disposición final segura (artículo 11, sobre el tratamiento de los desechos peligrosos, inciso 1).

También define (inciso 2) el tratamiento de estabilización y solidificación como un tratamiento factible, que consiste en mezclar los desechos peligrosos con otros materiales donde son capturados o fijados, formando una estructura sólida. El objetivo de la estabilización es convertir el desecho en un sólido inerte, estable, que tiene baja lixiviabilidad. La lixiviación es el proceso por el cual los contaminantes se transfieren de una matriz estabilizada a un medio líquido (como el agua) y con suficiente fuerza mecánica, esto impide que migren hacia el agua (Fuhrmann, Melamed, Kalb, Adams y Milian, 2002). ¿Se refiere al lugar o al proceso?

La solidificación depende de las características de los desechos. Los materiales usados en la solidificación son:

- Cemento
- Limo o materiales puzolánicos (porcelana)
- Materiales termoplásticos: betún, parafina o polietileno
- Silicatos fundidos
- Arcillas.

El proceso de inertización del mercurio en desechos de luminarias (bombillos de alumbrado público y fluorescentes) se realiza a través de un proceso de calentamiento en el cual se mezclan los desechos de vidrio contaminados (con mercurio) y azufre hasta formar una masa pastosa que luego se solidifica, formándose el sulfuro de mercurio II (HgS), que es una sal poco soluble en agua (Fuhrmann, Melamed, Kalb, Adams y Milian, 2002).

Debido a que el mercurio (Hg) es un metal líquido y ligeramente volátil a temperatura ambiente, se realizaron pruebas de laboratorio sobre la estabilización y solidificación, tratando los desechos de luminarias usando una matriz de cemento con azufre, en un proceso sin la etapa de calentamiento con el fin de disminuir la evaporación del mercurio (Zhang y Bishop, 2002; Ming, Loa, Walsh, Lamb, 2004).

En cuanto a la disposición final de los desechos peligrosos, el Reglamento para el Manejo de los Desechos Peligrosos establece (artículo 12) que la disposición adecuada se refiere a la descarga, inyección, deposición, lanzamiento y/o colocación de cualquier desecho peligroso (previamente tratado) y esto debe hacerse de manera que el desecho o cualquiera de sus constituyentes que entra al ambiente no le produzca ningún tipo de problema.

Además, establece (artículo 12, inciso 2) que los únicos métodos de disposición final aceptados son los siguientes:

- Relleno sanitario de seguridad
- Encapsulamiento, incineración.
- Exportación a países desarrollados (solo con fines de tratamiento y disposición final) (MINAE, 1998b).

Sin embargo, no existe ningún método de disposición totalmente seguro y en todos los casos es necesario evaluar previamente los posibles impactos ambientales y seleccionar con propiedad los sitios para disponer los desechos peligrosos.

A los desechos peligrosos que son tratados por estabilización y solidificación antes de enviarlos al relleno sanitario se les realiza una prueba a nivel de laboratorio denominada TCLP (nombre en inglés de Toxicity Characteristic Leaching Procedures) (USEPA, 1991), con el fin de determinar la característica de toxicidad por lixiviación de un residuo a partir de un análisis químico a una muestra o extracto del lixiviado o extracto, obtenido bajo ciertas condiciones estándares. La prueba TCLP determina la movilidad en el residuo de determinados constituyentes tóxicos; (MINAE, 1998a; USEPA, 1991) en el caso de desechos que contienen mercurio, la lixiviación de un residuo tratado no puede dar concentraciones mayores de 0,2 mg/L, que es el límite máximo permisible de acuerdo con el reglamento establecido por el Decreto D27000-MINAE.

Metodología

Evaluación a nivel de pruebas de laboratorio de un tratamiento de inertización de mercurio de luminarias sin la etapa de calentamiento, utilizando una matriz de mortero (mezcla de cemento y arena) y azufre:

Proceso de Inertización en frío del mercurio de los desechos de luminarias mezclándolo en frío con azufre y mortero (cemento + arena 1:3).

El proceso de inertización en frío consiste en mezclar los desechos de luminarias que contienen mercurio, con cemento + arena en una proporción de 1:3, azufre y agua, formando una estructura sólida a temperatura ambiente. El objetivo es convertir los desechos de luminarias que contienen mercurio en un sólido inerte, estable y de baja lixiviabilidad.

Como punto de partida se prepararon siete pruebas a nivel de laboratorio para determinar la mezcla de mortero (cemento + arena) más adecuada. Se encontró que la concentración inicial promedio de mercurio en las luminarias es de 7,75 ppm, lo que corresponde a 38.7 veces el mínimo permitido (0,2 ppm).

En el cuadro 1 se muestran las mezclas realizadas en laboratorio de acuerdo con un criterio de experto. De la mezcla 1 a la 4 se varía la proporción de mortero en aumento (de 15%, 35%, 55% y 75%) y con porcentajes de desechos de luminaria (de 75%, 55%, 35% y 15%, respectivamente, manteniendo el porcentaje de azufre en 10%. A las pruebas 5 y 7 no se les agregó azufre, a las 6 y 7 se les adicionó 0,5 g de mercurio metálico para enriquecer de mercurio, mientras que las mezclas 5, 6 y 7 se utilizaron como pruebas de control.

El procedimiento de mezclado realizado para obtener las mezclas de pruebas del cuadro 1 se explica a continuación:

- Primero se hace la mezcla del desecho de luminaria con el azufre, agitando durante cinco minutos para lograr una mezcla homogénea.

- Se agrega el cemento + arena (mortero 1:3) y se agita durante cinco minutos para lograr una mezcla homogénea.
- Se adiciona el agua lentamente hasta formar una mezcla que presente consistencia y no sea fluida. En la figura 1 se muestra el porcentaje de agua requerida en cada mezcla.

Se realizaron las pruebas de compresibilidad después de dejar las mezclas secando durante 22 días; luego se realizaron la prueba de TCLP y se determinó la concentración de mercurio mediante espectroscopia de atómica.

Cuadro 1. Relación en porcentaje de masa de los componentes de la mezcla para Solidificar y Pruebas de control.

Mezcla	Mortero Relación 1:3	Azufre	Desecho Luminaria + Hg.	Pruebas Control
1	15	10	75	
2	35	10	55	
3	55	10	35	
4	75	10	15	
5	50	0	50	X
6	45	10	45+ 0,5g Hg.	X
7	100	0	0,5g Hg.	X

Resultados y discusión

En la figura 1 se determinó experimentalmente que, al aumentar la cantidad de mortero, se requiere una mayor cantidad de agua para lograr una mezcla homogénea con la consistencia deseada. La variación de los porcentajes del agua está entre el 11% y el 15% cuando se cambia la proporción de mortero de un 15% a un 75%, respectivamente. Esta proporción de agua es una variable muy importante, ya que un porcentaje menor hace más difícil obtener una mezcla homogénea, quedando partes secas, lo que no permite que haya una solidificación por falta de fraguado. Por otra parte, si el porcentaje de agua es mucho mayor, se obtiene una mezcla muy fluida que dura mucho para secarse y solidificarse.

Cada mezcla se deposita en recipientes para su solidificación y fraguado, proceso que tiene una duración de treinta días. Finalmente, se debe realizar la prueba de resistencia a la compresión.

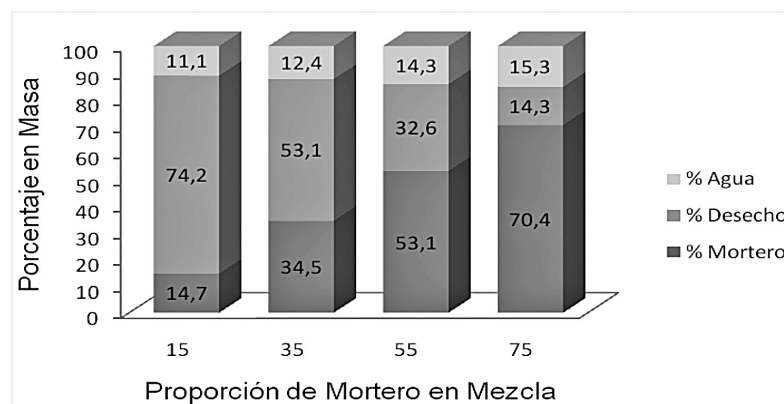


Figura 1. Porcentajes de agua requeridos en cada mezcla.

En el cuadro 2 se muestran los resultados de las pruebas de compresión.

Cuadro 2. Determinación de pruebas de compresión de las mezclas.

Mezcla	Proporción	Diámetro	Largo	Carga
	Mortero	(m)	(m)	KPa
1	15	0,05	0,10	25
2	35	0,05	0,10	1976
3	55	0,05	0,10	2714
4	75	0,05	0,10	7002
5	50	0,05	0,10	3858
6	45	0,05	0,10	3353
7	100	0,05	0,10	21225
8	50	0,05	0,10	1693

En la figura 2 se muestra que la resistencia de las mezclas de la 1 a la 4 aumenta al incrementarse la proporción de cemento + arena.

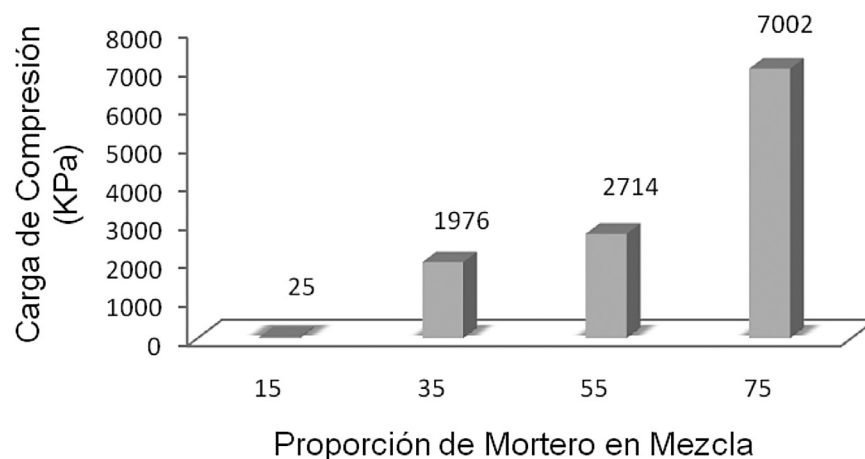


Figura 2. Determinación de resistencia de las muestras al someterlas a compresión.

La muestra 1, que contenía 15 % cemento + arena, se desboronaba al presionarla con la mano, pero las muestras 2, 3 y 4, con un 35%, 55% y 75%, respectivamente, mostraron tener resistencias por encima de los 350 Kpa, que es la resistencia mínima por compresión en un relleno sanitario.

En la figura 3 se observa el resultado del cálculo matemático de la densidad, que muestra una tendencia con relación a la proporción de mortero, ya que al aumentar el porcentaje de mortero también lo hace la densidad y eso provoca un incremento en la resistencia a la compresión de las muestras sólidas analizadas.

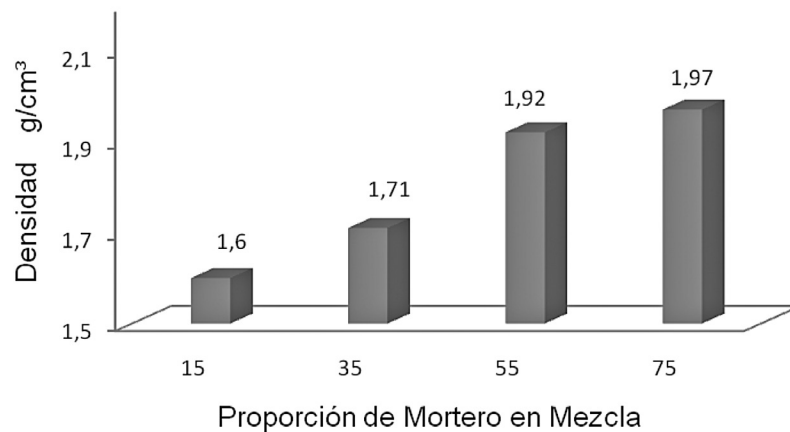


Figura 3. Densidades de las mezclas.

En el cuadro 3 se incorporan los resultados de la concentración de mercurio obtenida en la prueba de lixiviación para cada mezcla. La cuantificación del mercurio se realizó mediante espectroscopía atómica.

Cuadro 3. Contenido de mercurio en los lixiviados de las mezclas analizadas.

Mezcla	Mortero (%)	Azufre (%)	Desecho (%)	Concentración Mercurio (mg / l)
1	15	10	75	0.12
2	35	10	55	0.39
3	55	10	35	0,066
4	75	10	15	0,044
5	50	0	50	0,24
6	45	10	45%+ 0,5g Hg.	0,36
7	100	0	0,5g Hg.	0,25

De acuerdo con los resultados del análisis de la concentración de mercurio en el lixiviado, la mezcla 1 está muy cerca del máximo permisible (0,2 mg / L) y la mezcla 2 está por encima. Las muestras 3 y 4 presentan los mejores resultados, ya que se obtiene una concentración que está muy por debajo del máximo permisible según lo establecido en el decreto D27000-MINAE.

La muestra 5 tiene una mezcla de 50% mortero y 50% de desechos de luminarias sin azufre y presenta una concentración de los lixiviados por encima de la norma, lo que demuestra que el azufre puede estar reaccionado con el mercurio a temperatura ambiente. En la mezcla 6, al agregarle 0,5 gramos de mercurio metálico, se tiene una concentración de mercurio de 816 mg/L inicial, el resultado del análisis obtenido es de 0,36 mg/l, dando un porcentaje de retención del mercurio en esta mezcla del 99,95%, lo cual permite indicar que el mortero y el azufre son muy efectivos para retener el mercurio. En la mezcla 7, a la que también se le agregaron 0,5 gramos de mercurio metálico y 100% de mortero, se tiene una concentración de mercurio de 826 mg/L inicial, el resultado del análisis obtenido es de 0,25 mg/L, dando un porcentaje de retención del mercurio en esta mezcla de 99,96%, lo cual permite indicar que el mortero solo sin azufre es también muy efectivo para retener el mercurio.

Para efectos de un tratamiento en frío se pueden realizar pruebas a nivel de planta piloto con la mezcla 3, ya que presenta una concentración 3,0 veces por debajo del límite máximo permisible y cumple con los requerimientos de compresión de relleno sanitario. Es importante tomar en cuenta la mezcla que minimice la cantidad de mortero a utilizar y maximice la cantidad de desechos de luminarias, para disminuir costos en materias primas. Para establecer la mezcla que maximice estas dos variables, se deberían realizar pruebas variando la proporción de mortero entre el 55% y el 35%. Estos ensayos, así como el establecimiento de las pruebas en la planta piloto, excede los objetivos del presente proyecto.

Conclusiones y recomendaciones

1. En las mezclas 6 y 7 a las que se agregó mercurio puro al desecho de luminarias y mortero puro, se determinó que el mortero (cemento + arena 1:3) tiene una gran capacidad de retención del mercurio, con resultados superiores al 99,90%.
2. La mezcla 3 (55% mortero, 10% azufre y 35% luminaria) cumple con los parámetros de compresibilidad y concentraciones permisibles de mercurio en los lixiviados; ésta se puede escalar a nivel piloto.
3. Se recomienda realizar un diseño de experimentos variando la proporción de mortero entre 35% y 55%, buscando reducir costos en el consumo de mortero y aumentando la proporción de desechos de luminarias.
4. Se recomienda dar una mayor difusión a este proyecto, por ser este el único proceso que se tiene para el tratamiento de luminarias en el país y por la importancia que tiene desde el punto de vista ambiental.

Agradecimientos

Este artículo desarrolla uno de los tres objetivos del proyecto de Protocolización, Rediseño y Evaluación del Proceso de Inertización del Mercurio de Luminarias, para optar por el grado de Maestría en Sistemas Modernos de Manufactura, impartida por el Tecnológico de Costa Rica, realizado por Lic. Juan Carlos Salas Jiménez y el Ing. William Jesús Benavides Ramírez.

Bibliografía

- Fuhrmann, M, Melamed, D, Kalb, P.D., Adams, J.W. & Milian, L.W. (2002), Sulfur Polymer Solidification/Stabilization of elemental mercury waste. *Waste Management*, V., 22, 327-333
- MINAE (1998a). Decreto N° 27000-MINAE. (1998). Reglamento sobre las Características y el Listado de los Desechos Peligrosos Industriales. La Gaceta N° 124.
- MINAE (1998b). Decreto N° 27001-MINAE. (1998). Reglamento para el Manejo de los Desechos Peligrosos Industriales. La Gaceta N° 101.
- MINAE (1998c). Decreto N° 27002-MINAE. (1998). Reglamento residuos peligrosos su toxicidad. La Gaceta 101.
- Ming, J., Loa, T., Walsh, T. & Lamb T. (2004). Stabilization of high mercury contaminated brine purification sludge. *Journal of Hazardous Materials*, B113, 157-164.
- USEPA. Method 1311. (1991). *Toxicity Characteristic Leaching Procedure*. Code of Federal Regulations, 40 CFR parts 261, Appendix II.
- Zhang, J. & Bishop P. (2002). Stabilization/solidification (S/S) of mercury-containing wastes using reactivated carbon and Portland cement. *Journal of Hazardous Materials*, B92, 199-212.

Evaluación de técnicas de cuantificación de nitratos en agua potable para análisis en línea

Evaluation of nitrate quantification techniques for in-line analysis in drinking water

Laura Hernández-Alpízar¹, Ricardo Coy-Herrera²

Fecha de recepción: 2 de febrero del 2015

Fecha de aprobación: 17 de mayo del 2015

Hernández-Alpízar, L; Coy-Herrera, R. Evaluación de técnicas de cuantificación de nitratos en agua potable para análisis en línea. *Tecnología en Marcha*. Vol. 28, N° 4, Octubre-Diciembre. Pág 86-93.

1 Escuela de Química, CIPA. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: lahernandez@itcr.ac.cr

2 Escuela de Química, CIPA. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: rcoy@itcr.ac.cr

Palabras clave

Nitratos; análisis en línea; FIA; muestreo continuo; espectrofotometría.

Resumen

En este artículo se presentan los resultados de un estudio para determinar el potencial uso de cuatro técnicas para la cuantificación de nitratos en muestreo continuo: cromatografía iónica, espectrofotometría de absorción ultravioleta utilizando un equipo de mesa y dos miniespectrofotómetros con inyección de la muestra en flujo continuo, uno para mediciones en el ámbito de radiación visible y el otro optimizado para mediciones de absorción de radiación ultravioleta. Las variables consideradas son el consumo de reactivos y accesorios, la toxicidad de los desechos, la respuesta al analito, el límite de detección (LD), el límite de cuantificación (LC), la linealidad en el ámbito de interés y la sensibilidad.

La espectrofotometría de detección de absorción ultravioleta con inyección de la muestra en flujo continuo resultó ser la mejor de las técnicas evaluadas para análisis en línea; su respuesta es lineal entre 0-10 mg/L, que es el ámbito recomendado por la OMS para la concentración de nitratos en agua potable; tiene un bajo consumo de reactivos y accesorios, no genera residuos peligrosos, tiene LD 0,002 mg/L y LC 0,006 mg/L y una sensibilidad adecuada para responder rápidamente a la concentración del analito sin saturación de la señal, cumpliendo con las características deseables para un sistema de análisis en línea.

Keywords

Nitrate; in-line analysis; FIA; continuous sampling; spectrophotometry.

Abstract

The potential of four analytical methods for the quantification of nitrate is determined to be used in a continuous sampling set up: ion chromatography and the ultraviolet spectrophotometric screening, both in their benchtop version, Cadmium reduction with post-reaction and visible light absorption measurement and the direct ultraviolet spectrophotometric absorption screening but using mini-spectrophotometers and in flow injection of the sample and analysis (FIA) techniques. Accessories, toxicity of the reaction products, response, detection and quantification limits, linearity in the range of interest and sensitivity are considered for the evaluation. The direct measurement of ultraviolet absorption with flow injection was the best of the evaluated techniques. It has a linear response in the 0-10 mg/L range, WHO recommended range for drinking water, low reagents and accessories consuming, LOD 0,002 mg/L, LOQ 0,006 mg/L, and good sensitivity in the investigated range, meeting the required characteristics for in-line monitoring systems.

Introducción

Los cambios de composición en la tierra, el agua y el aire como resultado de los procesos industriales, métodos intensivos de cultivo o el complejo funcionamiento de las ciudades es una preocupación creciente y una interrogante constante en cuanto a su orden de magnitud y la dirección de su efecto. Numerosos estudios ambientales demuestran un alto impacto de las actividades antropogénicas con efecto negativo en sistemas vulnerables o expuestos e interconectados, tales como suelos, ríos, bosques, mar y aire. Incluso sistemas que se creía

cambiaban muy lentamente por estar muy protegidos o lejos de las fuentes de contaminación, por ejemplo, los acuíferos o fuentes de agua subterránea, revelan cambios de composición más acelerados de lo previsto (Puckett, Tesoriero y Dubrovsky, 2011). Esta situación ha reforzado la necesidad de contar con información completa y en tiempo real para poder correlacionar adecuadamente los cambios de composición con sus causas, establecer parámetros y tomar medidas.

La calidad de un recurso como el agua es de gran importancia para la salud de los seres vivos y en ésta área se han establecido prioridades a nivel nacional, debido a la limitación del recurso y al riesgo de contaminación en el que siempre se encuentra (Ministerio de Planificación, 2014). El contenido de nitratos es un indicador importante de la calidad del agua y ha demostrado tener un alto peso estadístico a la hora de clasificarla (Calvo-Brenes y Mora-Molina, 2010). El ion nitrato tiene un origen natural pero por el uso de fertilizantes inorgánicos, principalmente, o por residuos humanos o animales se puede introducir en exceso, llegar por filtración o escorrentía hasta las aguas superficiales y subterráneas y ser acumulado en concentraciones muy altas para la salud humana (Galloway et al., 2003). Ya sea por los procesos agroindustriales, residuos domésticos o residuos industriales, los nitratos en altas concentraciones multiplican el crecimiento de organismos vegetales, elevan el nivel de fotosíntesis y agotan el oxígeno de las aguas superficiales frescas, dañando la vida y los ecosistemas. La Organización Mundial de la Salud (OMS) norma el máximo permitido en 50 mg/L para proteger a los lactantes alimentados con biberón contra la metahemoglobinemia y recomienda concentraciones menores a 10mg/L (OMS, 2013). A nivel nacional, el máximo permitido de nitratos es también de 50 mg/L, según lo indica el Reglamento para la Calidad de Aguas Potables (Decreto N° 32324-H).

El Laboratorio Nacional de Aguas en Costa Rica reporta que el 2% de las fuentes de agua superan 50 mg/L de nitrato y el 18% se encuentran entre 10 y 50 mg/L, quiere decir que al menos el 20% de las fuentes de agua del país están contaminadas o en riesgo de contaminación (Mora, Chamizo y Mata, 2006). Las causas que generan estos riesgos pueden ser mejor elucidadas y controladas con un muestreo y análisis continuo y en el sitio, ya que esto permite ver tanto tendencias como registrar eventos, contrariamente al monitoreo puntual, en el que el gran espacio de tiempo entre la toma de muestras con que en general se analizan las fuentes no lo permite. El monitoreo puntual se refiere a un muestreo sencillo o compuesto. En el muestreo compuesto se hacen tomas en distintos sitios o con una diferencia de minutos en un mismo sitio y luego se combinan y homogenizan para formar una sola. Las muestras, ya sean sencillas o complejas, se recogen en uno o varios puntos con una frecuencia entre recolectas que depende de lo que se esté analizando, del tipo de cuerpo de agua y del uso esperado, pero que en todos los casos representan solo el día o el momento del muestreo, eso conlleva el riesgo de no registrar eventos particulares o tendencias y con esto la pérdida de información necesaria para una caracterización completa (APHA, 2005a).

Por otra parte, las técnicas estandarizadas de análisis de nitratos son muy apropiadas para analizar muestras puntuales o discretas, ya que estas se preservan y se llevan al laboratorio para su análisis. Sin embargo, no funcionan para el análisis continuo y en el sitio, pues los equipos de laboratorio grandes y caros que demandan controles complicados no se pueden llevar al campo.

Entre estas técnicas están los métodos de cromatografía iónica, espectrometría de absorción de luz visible y la espectrometría de absorción de radiación ultravioleta con equipos de mesa. Las tres técnicas están bien caracterizadas en cuanto a sus limitaciones y alcance en laboratorio (APHA, 2005b). La separación de iones en una columna cromatográfica con posterior detección de conductividad es una técnica muy eficiente de separación, detección y cuantificación de nitratos. La eficiencia de separación y eliminación de interferencias depende de la eficiencia de la columna, la temperatura y el eluyente utilizado. Después de la calibración con disoluciones

patrón, se pueden obtener resultados de las muestras en un periodo de solo diez minutos, sin embargo, este análisis requiere de un instrumento de alto precio y cuidado que no se puede utilizar en el campo debido a los controles necesarios en el laboratorio para su manejo y reproducibilidad.

El método de cuantificación de nitratos por absorción de luz visible se logra reduciendo los nitratos a nitritos en una columna de cadmio y midiendo la absorción del producto de reacción de la diazotación del ion nitrito con sulfanilamida seguido del acoplamiento con el dicloruro de N-(1-naftil)-etilenediamina, lo cual forma un complejo color rosado. La concentración de ion nitrato se obtiene de la resta de la cantidad de ion nitrito al valor total obtenido de NO_x . Hay varios problemas con el uso de las columnas de cadmio: la inactivación de la columna por la formación de carbonato de cadmio e hidróxido de cadmio, la toxicidad del cadmio para el operador y las dificultades para tratar los residuos.

Por otra parte, el ion nitrato presenta un máximo de absorción de entre 200nm y 230nm, lo que permite cuantificarlo por espectrofotometría directa en el ámbito de la radiación ultravioleta. Este método es sensible a interferencias por cloruros y bromuros que se encuentran en altas concentraciones en las aguas de estuarios y en materia orgánica disuelta en aguas dulces. Se han utilizado varios métodos para reducir las interferencias, entre ellos se encuentra el pretratamiento con un intercambiador iónico en análisis de flujo continuo, la corrección de la absorbancia usando una longitud de onda distinta y otra de referencia, la utilización de funciones de corrección polinomial y la técnica analítica de espectrofotometría ultravioleta de segunda derivada (Gentle et al., 2011).

La técnica de inyección de la muestra en un flujo continuo hacia el detector se conoce como FIA (Flow Injection Analysis) y es un campo en continua evolución muy apropiado para el desarrollo de técnicas de análisis de muestras continuas y en el sitio (Cerdà, 2013). El método para el análisis de las muestras tomadas de forma continua debería cumplir con características apropiadas para esa inyección continua, tales como son el bajo consumo de reactivos y accesorios, baja toxicidad, presentar poca dependencia de la temperatura y la presión (o una forma de considerar su dependencia), dar una respuesta rápida, tener pocas interferencias o al menos una forma de considerarlas, poseer bajos límites de detección y cuantificación en el caso de aguas muy puras, y un buen ámbito de respuesta lineal que aumente su aplicabilidad para el registro de eventos que lleven la concentración a un máximo o a un mínimo (ASTM, D3864-12, 2013). Con el desarrollo de componentes ópticos miniaturizados y celdas de flujo continuo, las técnicas de espectroscopia y absorción molecular ofrecen una opción deseable para el análisis de muestras continuas (Kröckel et al., 2010).

En este estudio se compara el límite de detección, cuantificación y linealidad en el ámbito de 0-10mg/L, de dos técnicas de laboratorio para el análisis de nitratos, cromatografía iónica y absorción de radiación ultravioleta con equipo de mesa con los resultados del uso de miniespectrómetros acoplados a un sistema de inyección en flujo para la medición de la absorción directa de radiación ultravioleta, en un caso, y luz visible previa reducción de nitratos a nitritos, en el otro, evaluando así su potencial aplicación para el análisis de muestras continuas de aguas potables.

Parte experimental

Disoluciones patrón

Para la preparación de las curvas de calibración se utilizó un patrón de ion nitrato en agua de 1000 mg/L certificado con trazabilidad al NIST marca Merck. Las diluciones se efectuaron con agua ultrapura de calidad analítica (18 ohm) obtenida usando el purificador Barnstead E-pure del laboratorio CIPA. Se prepararon disoluciones de 0,200; 0,295; 1,341; 2,016; 4,028; 6,080; 8,018 y 9,952 mg/L de ion nitrato en agua, midiendo las masas de alícuota y volumen total correspondiente en una balanza analítica Mettler Toledo, modelo MS304S.

Método instrumental

Determinación por cromatografía iónica con detector de conductividad: Se utilizó un cromatógrafo iónico con detección de conductividad y supresión química marca Methrom modelo 761 Compact CI, con una columna de 10 cm modelo Metrosep A Supp 5. La composición de la fase móvil es 0,0017 mol/L en NaHCO_3 y 0,0018 mol/L en Na_2CO_3 preparada a partir de reactivos de calidad analítica. Se utilizó un flujo de 0,7 mL/min. La inyección se efectuó manualmente utilizando filtros de 0,2 μm . La regeneración de los supresores se efectuó con ácido sulfúrico y agua ultrapura según recomendaciones de fábrica.

Determinación por detección directa con luz ultravioleta en equipo de mesa: Se utilizó un espectrofotómetro de doble haz, marca Shimadzu modelo UV-1800, con una lámpara de deuterio y celdas de cuarzo de 1 cm de camino óptico. La curva se preparó con mediciones sucesivas de los patrones, de menor a mayor, realizando los lavados correspondientes.

Inyección en flujo y determinación de ion nitrato mediante una reducción catalizada por cadmio y detección de la absorción de luz visible: Se utilizó un sistema FIALab-2500 con bomba peristáltica, lámpara de tungsteno OceanOptics HL-2000 y detección con espectrómetro OceanOptics, modelo USB4000-VIS-NIR. Este es un miniespectrofotómetro optimizado para el trabajo en un amplio espectro (348-1039 nm). Se introdujo la muestra y los reactivos cromogénicos (sulfanilamida, ácido fosfórico y dicloruro de naftiletildiamina, todos con calidad analítica) en un lazo de reacción en el que se genera el color y se dirige hacia la celda de flujo (1 cm de camino óptico) donde se mide la absorción a 540 nm de la especie generada a partir de los nitratos. Se utilizó el registro a 650 nm como referencia de no absorción.

Inyección en flujo y determinación de ion nitrato con detección directa de la absorción de radiación ultravioleta: Se utilizó un sistema FIALab-2500 con bomba peristáltica y lámpara ultravioleta OceanOptics DH-mini, con un espectrómetro OceanOptics USB 2000+, optimizado para el trabajo en el ámbito de 190-513 nm. Se introdujeron los patrones en forma secuencial a la celda de flujo de 1 cm de camino óptico, midiendo directamente la absorción de radiación a 220 nm. Se registra también la absorción a 250 nm (donde se produce la absorción interferente de compuestos orgánicos) y se usó como referencia la absorción a 300 nm (ASTM, 2013).

Los datos se guardaron en formato de texto y se exportaron a una hoja Excel para ser analizados estadísticamente, calculando el límite de cuantificación, el límite de detección, la correlación lineal (Miller y Miller, 2002) y la sensibilidad de los métodos (EURACHEM, 2002).

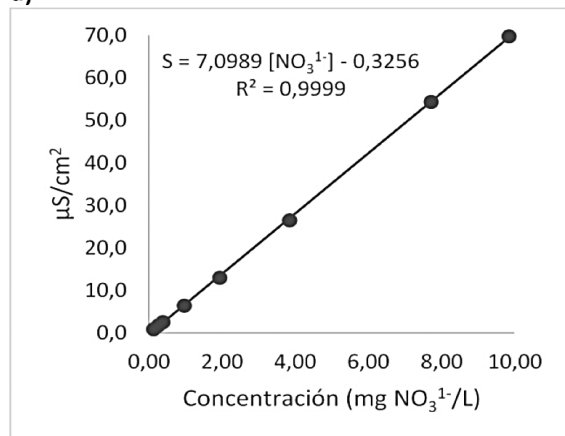
Resultados

Se obtuvo una respuesta lineal para las cuatro técnicas evaluadas de cuantificación del ion nitrato en el ámbito de 0–10 mg/L (figura 1). La cromatografía iónica es la técnica que presenta mayor correlación entre los datos obtenidos y mayor pendiente en la ecuación lineal, lo que indica que es la de mayor sensibilidad. Sin embargo, al analizar el intercepto de las curvas

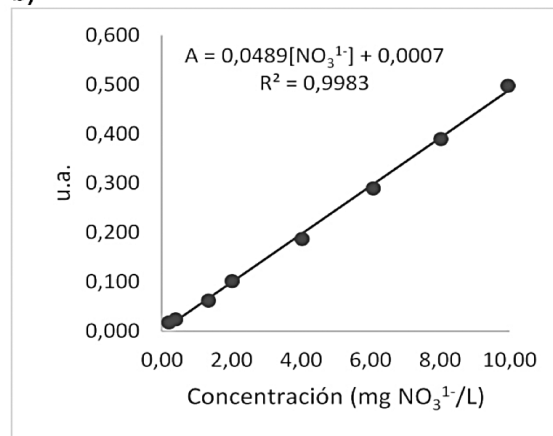
de mejor ajuste, esta técnica es la que registra la mayor señal de ruido en las cercanías del límite de detección; esto se debe principalmente a que los iones que contiene un patrón diluido pueden ser equivalentes a los presentes en el eluyente que lo transporta, lo que disminuye la relación señal-ruido y afecta el límite de detección.

Métodos en equipos de mesa.

a)

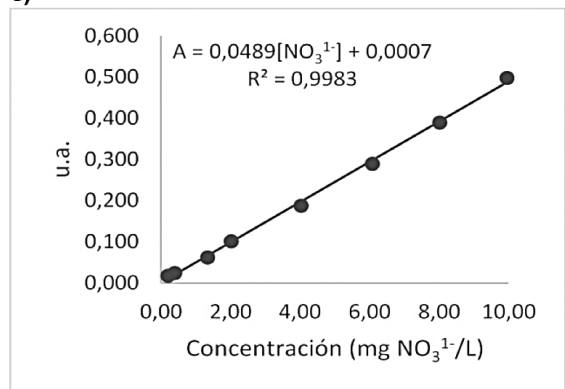


b)



Métodos en equipos de flujo continuo.

c)



d)

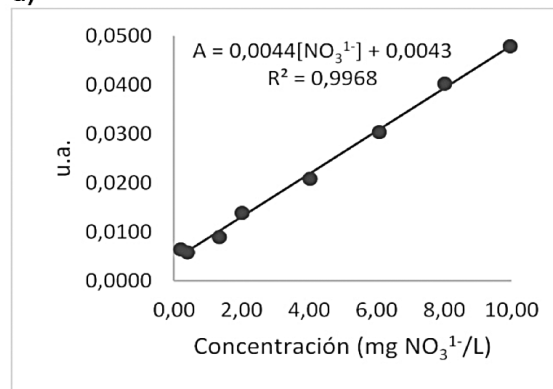


Figura 1. Comparación de las curvas de calibración para la determinación de ion nitrato por: (a) Cromatografía iónica con supresión de conductividad (CI), (b) Espectrofotometría ultravioleta de muestras discretas (UV), (c) Espectrofotometría visible por reducción de nitratos en columna de cadmio en flujo continuo (FIA-Cd) y (d) Espectrofotometría ultravioleta de muestras en flujo continuo (FIA-UV).

Las técnicas espectroscópicas estudiadas se comportan linealmente y también idealmente en las cercanías del límite de detección como lo predice la Ley de Beer-Lambert, ya que en disoluciones con concentración muy bajas del analito no hay pérdidas por reabsorción, difracción o dispersión de la luz (Skoog, Holler y Nieman, 2011). Las tres técnicas resultan en límites de cuantificación y detección muy bajos, con alta correlación aunque no tan sensibles como la cromatografía iónica (Cuadro 1). La sensibilidad se define por el cambio de la pendiente con respecto a la incertidumbre del intercepto (EURACHEM, 2002). Los valores más bajos de sensibilidad de las técnicas espectroscópicas significan que no responden tan marcadamente

a los cambios de concentración del analito como la cromatografía iónica pero se equilibran con la mayor capacidad de detección de las técnicas, relacionada directamente con la relación señal-ruido.

Cuadro 1. Límite de cuantificación (LC), límite de detección (LD), coeficiente de correlación (R) y sensibilidad (S) del análisis de nitratos por cromatografía iónica con supresión (CI), equipo de mesa de espectrofotometría ultravioleta (UV), inyección en flujo con reducción de nitratos en columna de cadmio (FIA-Cd) e inyección en flujo y medición de absorción ultravioleta con inyección en flujo (FIA-UV).

Técnica	LC	LD	R	S
CI	2	0,5	0,9999	21
UV	0,07	0,02	0,9997	10
FIA-Cd	0,03	0,008	0,9999	8
FIA-UV	0,06	0,002	0,9983	4

Como se indicó anteriormente, las técnicas de mesa no son apropiadas para el análisis de muestras en forma continua y en el sitio. La cromatografía iónica requiere condiciones reguladas de laboratorio, como una temperatura constante. Además, cada muestra toma diez minutos de análisis en comparación con un minuto o menos para alcanzar resultados en los sistemas acoplados a inyección por flujo. La espectrofotometría de absorción ultravioleta con equipo de mesa requiere efectuar lavados de la celda de medición con el patrón, efectuar lavados y tener cuidados de laboratorio cada vez que se introduce una muestra en forma discreta al equipo, lo que implica un tiempo de análisis total mayor. El costo de un cromatógrafo básico es de al menos el doble de los sistemas espectrofotométricos.

Aunque se observa que la técnica FIA-Cd es más sensible que la FIA-UV, la necesidad de preparar reactivos, de usar una columna consumible y tóxica y la obtención de productos de reacción nocivos para el ambiente, hacen difícil pensar en esta técnica como apropiada para el análisis de muestras continuas y en línea y en fuentes de agua para consumo humano.

Conclusiones

De las cuatro técnicas analizadas, la espectrofotometría ultravioleta con inyección en flujo se considera la más apropiada para el análisis de muestras continuas y en el sitio debido a su relativo bajo costo, el bajo consumo de reactivos y accesorios, linealidad, los bajos límites de detección y cuantificación, la no generación de residuos peligrosos y la sensibilidad adecuada para cuantificar en el ámbito recomendado por la OMS para la concentración de nitratos en aguas de consumo humano (menor a 10 mg/L). Es recomendable extender el estudio al ámbito de los máximos permitidos por las normas y las pruebas en campo.

Bibliografía

- American Society for Testing and Materials. (2013). Standard Practice for Describing and Measuring Performance of Ultraviolet and Visible Spectrophotometers. West Conshohocken, PA.: ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2013). D38664-12: Standard Guide for On-Line Monitoring Systems for Water Analysis. West Conshohocken, PA.: ASTM International.

- APHA (American Public Health Association). (2005a). *Method 4500-NO₃⁻ Nitrogen (nitrate). Standard Methods for the examination of Water and Wastewater*. 21 ed.
- APHA (American Public Health Association). (2005b). *Section 1060. Standard Methods for the examination of Water and Wastewater*. 21 ed.
- Cerdá, V., Avivar, J., Ferrer, L. & Leal, L.O. (2013) Automatic Water and Wastewater Quality Monitoring Systems. *Real-Time Water Quality monitoring*, 6(4), 105-123.
- Calvo-Brenes, G. & Mora-Molina J. (2010). *Evaluación y clasificación de la calidad de varios cuerpos de agua en la península de Osa*. Informe proyecto de investigación. Cartago, C.R.: Tecnológico de Costa Rica.
- EURACHEM Cooperation on International Traceability in Analytical Chemistry. (2002). *Guide to Quality in Analytical Chemistry*. Obtenido de www.eurachem.org.
- Galloway, J.N., Aber, J.D., Erisman J.W., Seitzinger, S.P. & Howarth, R.W. (2003). The Nitrogen Cascade. *BioScience*, 53(4) 341-356.
- Gentle, B.S., Ellis, P.S., Grace, M.R. & McKelvie, I.D. (2011). Flow analysis methods for the direct ultra-violet spectrophotometric measurement of nitrate and total nitrogen in freshwaters. *Analytica Chimica Acta*, 704, 116-122.
- Kröckel, L., Schwotzer, G., Lehmann, H. & Wieduwitt, T. (2011). Spectral optical monitoring of nitrate in inland and seawater with miniaturized optical components. *Water Research*, 45(3)1423-1431.
- Ministerio de Planificación (2014). *Plan Nacional de Desarrollo 2015-2018*. San José.
- Miller, J.N. & Miller, J.C. (2002). *Estadística y quimiometría para química analítica*. Madrid: Prentice-Hall.
- Mora, D., Chamizo, H. & Mata, A. (2006). Estudio exploratorio sobre la incidencia de cáncer gástrico y los contenidos de nitratos en el agua potable en Costa Rica. *Revista Costarricense de Salud Pública*, 15(28)101-156, 17-28.
- OMS (Organización Mundial de la Salud). (2013). *Guías para la calidad del agua potable*. 3 ed.
- Puckett, L.J., Tesoriero, A.J. & Dubrovsky, N.M. (2011). Nitrogen contamination of surficial aquifers-A growing legacy. *Environmental Science and Technology*, 45(3), 839-844.
- Skoog, D.A., Holler, F.J. & Nieman, T.A. (2009). *Principios de análisis instrumental*. Madrid: McGraw Hill.

Evaluación integral financiera, económica, social, ambiental y de productividad del uso de bagazo de caña y combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica en Nicaragua

Integral assessment (financial, economic, social, environmental and productivity) of using bagasse and fossil fuels in power generation in Nicaragua

Napoleón Vicente Blanco-Orozco¹, Eduardo Arce-Díaz²,
Carlos Zúñiga-Gonzáles³

Fecha de recepción: 2 de diciembre del 2014

Fecha de aprobación: 25 de marzo del 2015

Blanco-Orozco, N; Arce-Díaz, E; Zúñiga-Gonzáles, C. Evaluación integral financiera, económica, social, ambiental y de productividad del uso de bagazo de caña y combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica en Nicaragua . *Tecnología en Marcha*. Vol. 28, N° 4, Octubre-Diciembre. Pág 94-107.

- 1 Ingeniero Eléctrico. Máster en Gerencia de Proyectos de Desarrollo. Estudiante de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo en el Tecnológico de Costa Rica. Docente de la Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Electrotecnia y Computación, Nicaragua. Correo electrónico: blanconapoleon@yahoo.com; napoleon.blanco@usr.uni.edu.ni.
- 2 Ingeniero Mecánico. MSc. Kansas State University, E.U.A. Ingeniería Agrícola, 1988. Ph.D. Kansas State University, E.U.A. Economía Agrícola, 1995. Consultor, instructor y profesor internacional para diversas organizaciones. Correo electrónico: earced@yahoo.com.mx
- 3 Economista agrícola. M.Sc Economía Pública y del Desarrollo, 1999-2001, Universitat Barcelona, España, Ph.D Economía Agrícola y Desarrollo Local 2005-2008, American World University, E.U.A. Profesor del Departamento de Agroecología de la Facultad de Ciencias y Tecnológica UNAN León. Correo electrónico: czunigagonzales@gmail.com

Palabras clave

Bagazo de caña; lógica difusa; evaluación integral.

Resumen

En este artículo se presentan los resultados de una evaluación integral del uso del recurso energético bagazo de caña y derivados del petróleo para la generación de energía eléctrica en Nicaragua. Para ello se utiliza un modelo de evaluación que integra fácilmente, mediante el uso de la lógica difusa, los elementos de evaluación financiera, económica, social, ambiental y de productividad. Se determinó que el empleo del bagazo de caña es integralmente rentable y presenta más beneficios que el uso de derivados del petróleo para la generación de energía eléctrica en Nicaragua.

Keywords

Bagasse; Fuzzy Logic; Integral evaluation.

Abstract

This article presents an evaluation of the use of the energy resource bagasse from sugar cane and petroleum products in electricity generation in Nicaragua using an evaluation model that easily integrates, using fuzzy logic, elements of financial, social, economic, environmental and productivity assessment. It was determined that the use of bagasse to generate electricity is fully profitable, but, the use of petroleum is not fully profitable to generate electricity in Nicaragua.

Introducción

En este artículo se realiza una evaluación integral desde los puntos de vista financiero, económico, social, de productividad y ambiental del empleo del recurso energético bagazo de caña y de los derivados del petróleo en la generación de energía eléctrica en Nicaragua.

La valoración integral se realizó con un modelo cuyo proceso de integración partió de la selección de elementos metodológicos de las evaluaciones financiera, económica, social, ambiental y de productividad de recursos energéticos renovables y no renovables para determinar los elementos que fueron integrados para valoración del recurso bagazo de caña y de los derivados del petróleo, en un modelo aplicable a las condiciones del país centroamericano. La selección de las metodologías también se sustentó en la herramienta de consultas a expertos (método DELPHI).

Este artículo está dividido en cinco partes: la introducción, que presenta el propósito del escrito, el marco teórico, que proporciona el sustento teórico del modelo de evaluación integral, la metodología de evaluación integral, los datos utilizados y los resultados obtenidos.

Marco teórico

El propósito de esta investigación es lograr un modelo integral de evaluación del recurso energético biomasa empleado para generar energía eléctrica de forma integral. La integración de las metodologías de evaluación se sustenta en la lógica difusa. Según Cox (1997), la lógica

difusa provee de un método que permite la reducción y explicación de sistemas complejos que usan complicados modelos matemáticos y tienen como desventaja la forma en que las variables de un estudio específico son representadas y manipuladas. Por otra parte, la teoría de la lógica difusa es una herramienta distinta a la lógica clásica, porque trata de representar el grado de incertidumbre en el razonamiento y pensamiento humano para tener respuestas basadas en conceptos más coherentes. Y dada la necesidad que tiene el mundo actual de encontrar soluciones reales a problemas en los que existe la vaguedad, la lógica difusa ha sido exitosa al aplicarla a las áreas económicas, sociales, industriales y políticas, entre otras (Arango et al., 2012).

La modelación difusa permite la definición de métricas con las que se puede acceder a los factores intangibles de un sistema en análisis y trabajar con medidas heterogéneas (Osorio, 2011). Además, la selección de reglas difusas es la clave para un sistema difuso de inferencias que puede modelar de manera efectiva la experticia humana en una aplicación específica (González y Spin, 2010). Más aun, la lógica difusa está basada en reglas heurísticas con un antecedente (SI) y un consecuente (entonces), en las que el antecedente y el consecuente son también conjuntos difusos (Zadeh, 2008).

De la misma forma, la principal ventaja de la representación del conocimiento preferencial basado en la lógica difusa es la oportunidad de utilizar el lenguaje como elemento de comunicación y modelado en el análisis de la decisión, creando un modelo explícito del conocimiento (Andrade et al., 2011). Entonces, la lógica difusa combina conceptos de la lógica y teoría de los conjuntos mediante la definición de grados de pertenencia para trabajar con información de difícil especificación y emplearla objetivamente con un fin determinado (Cejas, 2011). Por otra parte, los principales componentes de la lógica difusa son el fusificador, que tiene el efecto de transformar los datos concretos de la medición en valores lingüísticos apropiados; la base de reglas difusas, que almacena el conocimiento empírico de la operación del proceso y, finalmente, el defusificador, que se usa para producir una decisión no difusa o acción de control de una acción inferida por la máquina de inferencia (Arango et al., 2012).

La lógica difusa ha evolucionado hacia lo que se llama lógica difusa compensatoria (LDC), cuyas características más importantes son la flexibilidad, la tolerancia ante la imprecisión, la capacidad para moldear problemas no lineales y su fundamento en el lenguaje de sentido común. La LDC acerca a los involucrados en la toma de decisiones con la comunidad académico-empresarial con el objetivo de crear una evaluación de alternativas de acción con una combinación de matemática y procesos cualitativos (Cejas, 2011). La LDC renuncia al cumplimiento de las propiedades clásicas de la conjunción y la disyunción expresiones lingüísticas expresadas en predicados, contraponiéndoles la idea de que el aumento o disminución del valor de verdad de la conjunción o la disyunción provocadas por el cambio del valor de verdad de uno de esta expresiones puede ser compensada con la correspondiente disminución o aumento de la otra (Espin y Vanti, 2005).

Por otra parte, según la lógica clásica, un elemento pertenece o no pertenece a un conjunto determinado; por el contrario, dado un conjunto difuso, la lógica difusa lo que hace es poner un grado de pertenencia al conjunto. Hay muchos métodos para estimar las funciones de pertenencia, entre los que se pueden mencionar el basado en la heurística para asignar valores y rangos, los que se basan en modelos matemáticos teóricos, funciones de pertenencia bajo conceptos humanos y otros fundamentados en redes neurales (Azizz, 2013).

La función de pertenencia sigmoideal se define por sus límites inferior a , superior b y el valor m o punto de inflexión, tales que $a < m < b$ (Mallo et al., 2010). Según, Cox (1994), la función sigmoideal representa valores comprendidos entre no membresía o no pertenencia al conjunto difuso. Además, la función sigmoideal representa valores de pertenencia que se incrementan o

decrecen en forma no lineal, como lo hace una evaluación financiera y económica. Además, las funciones de pertenencia sigmoideas en el caso de funciones crecientes o decrecientes son recomendadas por los autores Dubois y Prade (1985). La función trapezoidal es apropiada para representar las valoraciones sociales resultantes de la metodología de multicriterio y la metodología de análisis de productividad total de los factores cuyos resultados tienen un comportamiento dentro de un rango definido de valores de rentabilidad (Cox, 1994).

Por otra parte, la lógica de predicados está basada en la idea de que las oraciones realmente expresan relaciones entre objetos, así como también cualidades y atributos de tales objetos. Por lo que un predicado es una función del universo X en el intervalo $[0,1]$ y las operaciones de conjunción (\wedge), disyunción (\vee), negación (\neg) e implicación (\rightarrow), se definen de modo que al ser restringidas al dominio $\{0,1\}$ se obtiene la lógica necesaria para el análisis en cuestión (Cejas, 2011). Según Mallo y colaboradores (2010), algunos de los operadores propuestos por la LDC son los siguientes:

La conjunción ("and"), que está dada por la media geométrica de los valores de verdad que toma el predicado de la variable analizada y que se expresa de la siguiente manera:

Operador AND

$$C(X_1, X_2, X_3 \dots) = \sqrt[n]{X_1 * X_2 * X_3 * \dots * X_N} \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde X_1, X_2, X_3 son los valores de las valoraciones financieras, económicas, sociales, ambientales y de productividad a integrarse.

La disyunción ("or"), representada por el complemento de la media geométrica de las negaciones de los valores de verdad, calculada conforme a la siguiente expresión:

Operador OR

$$d(X_1, X_2, X_3, \dots, X_N) = 1 - \sqrt[n]{X_1 * X_2 * X_3 \dots * X_N} \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde X_1, X_2, X_3 son los valores de las valoraciones financieras, económicas, sociales, ambientales y de productividad a integrarse.

Además las negaciones de los valores de verdad de cada predicado son calculadas como su complemento, de la siguiente manera:

Operador NOR.

$$n(X_i) = 1 - X_i \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde X_i representa los valores de las valoraciones financieras, económicas, sociales, ambientales y de productividad.

Por otro lado, la modelización de la vaguedad se logra a través de variables lingüísticas que tienen su fundamento en escalas. Usando la función sigmoidea, los valores de rentabilidad financiero, económico, social y de productividad estarían comprendidos con base en lo establecido por Cox (1994) en un rango de membresía cero o de una asignación de falso al predicado y una valoración de membresía completa o verdadera pasando por un punto de inflexión del 50% de un valor de pertenencia. También, según Cejas (2011) los rangos son operadores que modelan palabras como: muy, algo, bastante, entre otros; y modifican el valor

de verdad de una proposición intensificando, moderando y ejerciendo otros efectos. Espin y Vanti (2005), en su estudio de la administración lógica, utilizaron el paradigma de la lógica difusa para un enfoque transformacional y asociaron los rangos difusos ente (0,1). Por su parte, González y Espín (2010) establecieron que la lógica difusa es una lógica multivalente basada en el concepto de conjunto difuso en la que toda proposición toma valores de verdad en el intervalo [0 1].

Igualmente, Mallo y colaboradores (2010) evaluaron las entidades aseguradoras en Argentina, a través de un modelo difuso compensatorio asignando a cada indicador un número determinado de etiquetas lingüísticas que se traducirán en números difusos, pertenecientes al intervalo [0,1]. Estos autores emplearon escalas semánticas (alta, media y baja) para sus variables de investigación, como solvencia financiera, endeudamiento, gestión eficiente. Por su parte, Arango y colaboradores (2012), en su investigación sobre un sistema de indicadores de gestión empresarial, usaron una metodología basada en el modelo Mamdani, que a su vez se basa en indicadores difusos con rangos de evaluación alto, medio y bajo para evaluar la perspectiva financiera del cliente, de los procesos y del aprendizaje y crecimiento. De la misma forma, Osorio (2011), para la toma de decisiones sobre la evaluación de un candidato para un puesto de trabajo, utilizó la consulta a expertos y a los integrantes del equipo multidisciplinario de consulta les pidió determinar el nivel de importancia o peso de cada elemento del perfil del puesto por medio de una variable lingüística; de manera que representó cada una de las variables de selección a través de un número difuso y empleó cinco niveles de calificación que a su vez se representan por números difusos triangulares: Muy Bajo "MB", Bajo "B", Medio "M", Alto "A", Muy Alto "MA".

Al final de la evaluación de las reglas difusas en forma de predicados y preposiciones, se produce un conjunto difuso de valores asociados con el modelo de evaluación empleado. Al conjunto de valores difusos resultado de la evaluación se le deben asociar enunciados o categorías que representen la información de la evaluación final; a este proceso se le llama defusificación. La defusificación descansa en la heurística para representar fenómenos complejos y multidimensionales a través de expresiones numéricas (Cox, 1994). Para la defusificación se suele emplear la técnica centroide, a través de la cual se encuentra el punto de solución de la región difusa mediante el cálculo de la media ponderada de la región difusa o punto de balance, en otras palabras, se debe encontrar un punto o centro de gravedad de la solución.

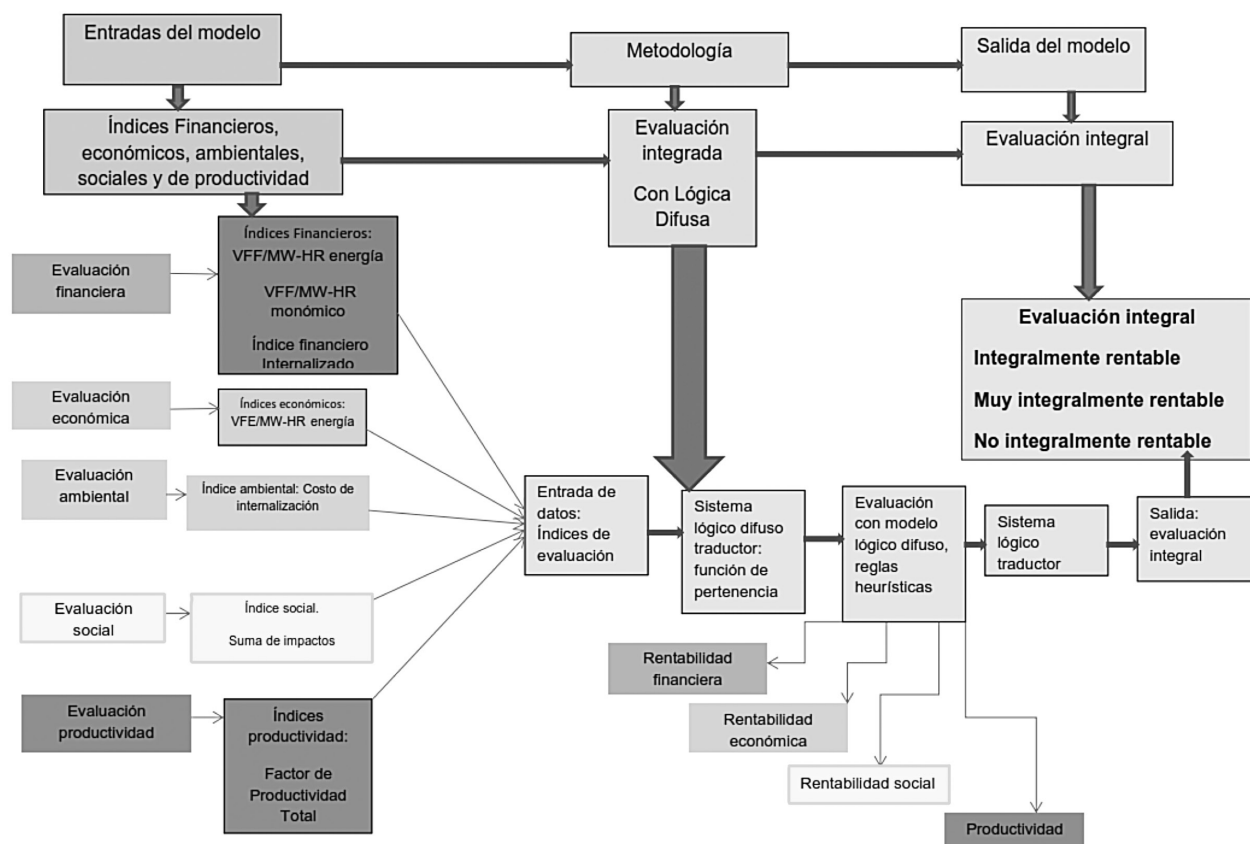
Metodología

Para la elaboración del modelo de evaluación integral se siguió un procedimiento que se inició con la revisión bibliográfica, a partir de la cual se comprobó que no se disponía de un modelo de evaluación financiera, económica, social y ambiental de forma integral de recursos energéticos. Seguidamente, se procedió a la selección de los elementos metodológicos de cada evaluación que se adaptan para valorar recursos energéticos; la selección de las metodologías también se sustentó en consultas a expertos. Luego se aplicaron los elementos seleccionados para integrarse en estudios de casos. A continuación, los resultados de cada evaluación se expresaron en índices: financieros, económicos, sociales y de productividad que son las entradas al modelo de integración.

Finalmente, utilizando el método inductivo, que es un método científico mediante el cual se obtienen conclusiones generales a partir de premisas particulares, se logró, con base en las observaciones de las características de cada evaluación realizada en los estudios de casos, efectuar una derivación inductiva de la dificultad de integrar las metodologías y teorizar una

forma de integración usando el conocimiento matemático; esto condujo a que se integraran los índices de evaluación a través de la lógica difusa.

Para la evaluación integral del uso de bagazo en la generación de energía eléctrica de los casos de estudio de los ingenios San Antonio y Monte Rosa y del uso de combustible fósil en las plantas ALBANISA, EMPRESA ENERGÉTICA CORINTO, TIPITAPA POWER COMPANY, CENSA, GECSA Y GEOSA se empleó un modelo de evaluación que integra las evaluaciones financiera, económica, ambiental, social y de productividad sustentado en un proceso de integración basado en los principios de lógica difusa y que se muestra en la figura 1.



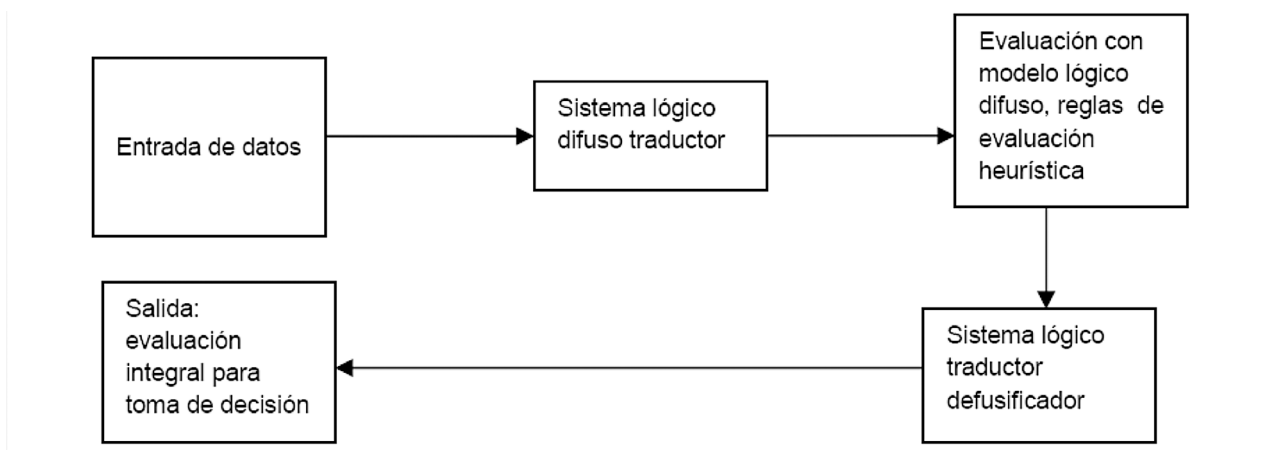
Fuente: Elaboración propia

Figura 1. Esquema metodológico del modelo de evaluación integral.

El modelo de evaluación tiene como entradas los resultados de las siguientes evaluaciones: financiera, económica, social, ambiental en forma de balance de gases de efecto invernadero y la de productividad, que se realiza empleando la metodología de datos envolventes (DEA) y los índices de Malmquist de la planta de generación de energía.

Las entradas de datos son procesadas utilizando una lógica de rangos basada en la lógica difusa. Luego se procesan los dictámenes de evaluación con un algoritmo basado en reglas heurísticas que vincula los criterios de decisión sobre las inversiones y la operación de plantas de generación de energía eléctrica en estudio. Como salida del proceso, se tendría una valoración integral del empleo del energético bagazo de caña de azúcar o combustible fósil.

Parte del proceso metodológico de evaluación integral contiene la definición de criterios de evaluación. Los criterios de evaluación financiero, económico, social, ambiental y productivo se sustentan en la consulta a expertos y en la revisión de la bibliografía relacionada. Siguiendo con el proceso metodológico de evaluación integral, las entradas de cada evaluación, expresadas en los índices de evaluación, son transformadas a la lógica difusa usando las funciones de pertenencia descritas en el acápite de perspectiva teórica y evaluadas con los criterios de evaluación definidos y consultados a los expertos. El valor difuso de cada evaluación es categorizado empleando lógica de rangos asociada a los valores de función de pertenencia de cada tipo. Los resultados de cada valoración financiera, económica, ambiental, social y de productividad se integran a través de reglas heurísticas.



Fuente: Elaboración propia con base en Cox, 1994.

Figura 2. Modelo de aplicación de la lógica difusa en la evaluación financiera, económica, social y de productividad.

Después se evaluaron las reglas heurísticas con un modelo lógico de rangos sustentado en la lógica difusa; lo que incluye la definición de funciones de pertenencia y definición de rangos de funciones de pertenencia que fueron consultadas a expertos. En la figura 2 se definieron los predicados de la lógica difusa que contienen los resultados de cada valoración financiera, económica, ambiental, social y de productividad y que se integran a las reglas heurísticas. Posteriormente, se tradujeron las reglas heurísticas a lógica difusa y se valoraron con la lógica de rangos usando los valores de verdad (lógicos) de las funciones de pertenencia.

La transformación de las entradas de cada evaluación financiera, económica, ambiental, social y de productividad expresadas en los índices de evaluación a la lógica difusa se hizo usando los valores lógicos de función de pertenencia. Los índices de cada evaluación financiera, económica, ambiental, social y de productividad se integran con la lógica difusa en un modelo de evaluación integral. Las reglas heurísticas para la evaluación son integradas usando un modelo matemático con operadores de lógica difusa. Las reglas heurísticas, criterios de evaluación, valores lógicos de rangos de funciones de pertenencia y predicados para la evaluación integral de las plantas de generación de energía empleando bagazo de caña y combustibles fósiles fueron definidas y consensuadas por un grupo de expertos consultados, quedando establecidas en la expresión que se presenta a continuación.

Modelo de Evaluación Integral

$$EI_n(x) = P_i FIN_n(x) \wedge P_i ECON_n(x) \wedge P_i SOCIAL_n(x) \wedge P_i PRODUCT_n(x) \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde n representa el tipo de evaluación de integralidad (1 representa la condición de integralmente rentable, 2 la condición de no integralmente rentable y 3 la condición de muy integralmente rentable).

FIN = Evaluación financiera

ECON = Evaluación económica

SOCIAL = Evaluación social

PRODUCT = Evaluación productividad

^ = operador difuso AND

Pi representa el peso asignado por los expertos a cada tipo de evaluación a integrar.

La evaluación integral usando las reglas heurística y la lógica difusa produce como resultado un conjunto de valores difuso correspondiente al modelo empleado; estos valores deben ser defusificados para traducirlos a un lenguaje más comprensible para los evaluadores. Para la evaluación final se empleó un proceso de defusificación basado en un rango de valores, muy similar al proceso de asignación de pertenencia con la función sigmoideal, por lo que al final se empleó una tabla de asignación de valores de evaluación integral. La defusificación se basa en las reglas heurísticas asignadas y en un modelo de defusificación (centroide), para simplificar el proceso: se asume una escala de evaluación de rangos de rentabilidad integral con un punto central de la evaluación que es un punto de inflexión igual a 0.5 en la evaluación de la rentabilidad total.

Cuadro 1. Resultados de la evaluación financiera de la actividad de generación de energía eléctrica en plantas de generación que emplean bagazo de caña y derivados del petróleo.

#	Planta de generación de energía eléctrica	VFF US \$	Observación
	Ingenieros que emplean Bagazo de caña		
1	Ingenio San Antonio	\$150 440 090	Rentable financieramente
2	Ingenio Monte Rosa	\$44 786 871	Rentable financieramente
	Plantas que emplean derivados del petróleo conectadas al SIN		
1	ALBANIZA	\$10 129 820	No Rentable financieramente
2	CENSA	\$338 351 842	Rentable financieramente
3	EMPRESA ENERGÉTICA CORINTO	\$326 053 280,53	Rentable financieramente
4	TIPITAPA POWER COMPANY	\$315 514 979,29	Rentable financieramente
5	GEOSA	\$302 860 891	Rentable financieramente
6	GECSA	\$156 018 688,35	Rentable financieramente

Fuente: Elaboración propia

Datos

Los datos de entrada al modelo de evaluación son las salidas de las evaluaciones financiera, económica, social, ambiental y de productividad. De la evaluación financiera se empleó el valor futuro financiero (VFF) que se muestra en el cuadro 1. De la evaluación económica se empleó el valor futuro económico (VFE) que se muestra en el cuadro 2. De la evaluación social se obtuvieron los impactos del empleo de bagazo de caña y derivados del petróleo: contribución del acceso a la energía eléctrica a la sociedad, precio de la energía eléctrica, impacto en las emisiones de CO₂ y la suma de impactos que se muestra en los cuadros 3 y 4.

Cuadro 2. Resultados de la evaluación económica de la actividad de generación de energía eléctrica en plantas de generación que emplean bagazo de caña y derivados del petróleo.

Resultados de la evaluación económica de la actividad de generación de energía eléctrica en plantas de generación que emplean bagazo de caña y derivados del petróleo			
#	Planta de generación de energía eléctrica	VFE	Observación
	Ingenios que emplean Bagazo de caña		
1	Ingenio San Antonio	\$211 928 609	Rentable Económicamente
2	Ingenio Monte Rosa	\$40 245 802	Rentable Económicamente
	Plantas que emplean derivados del petróleo conectadas al SIN		
1	ALBANIZA	\$76 771	No Rentable Económicamente
2	CENSA	\$120 746 055	No es Rentable Económicamente
3	EMPRESA ENERGÉTICA CORINTO	\$460 349 663	No es Rentable Económicamente
4	TIPITAPA POWER COMPANY	\$302 759 161	No es Rentable Económicamente
5	GEOSA	\$846 730 464	No es Rentable Económicamente
6	GECSA	\$139 615 915	Rentable Económicamente

Fuente: Elaboración propia

De la evaluación de productividad social se obtuvieron los promedios de ritmo de crecimiento de la productividad total de los factores de las plantas de generación de energía eléctrica que emplean bagazo de caña y combustibles fósiles y están conectadas al Sistema Nacional Interconectado (SIN), tal y como se muestran en los cuadros 5 y 6.

Cuadro 3. Resultados de la evaluación social de la actividad de generación de energía eléctrica en plantas de generación que emplean bagazo de caña.

Resultados de la evaluación multicriterio del uso de bagazo para la generación de Energía Eléctrica				
Ingenio	Impacto Contribución del acceso a la energía eléctrica a la sociedad	Impacto Precio de la energía eléctrica	Impacto beneficio al ambiente a través del impacto en el ahorro de emisiones de CO ₂	Suma de impactos
Ingenio San Antonio	0,10	0,00019	0,049	0,15
Ingenio Monte Rosa	0,17	0,00017	0,04	0,21

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4. Resultados de la evaluación social de la actividad de generación de energía eléctrica en plantas de generación que emplean derivados del petróleo.

Planta generadora de energía eléctrica	Impacto de Contribución del acceso a la energía eléctrica a la sociedad	Impacto en el precio de la energía eléctrica	Impacto en las emisiones	Suma de impactos
ALBANIZA	0,71	0,0009	-0,009	0,7
GECSA	0,38	0,0003	-0,008	0,37
CENSA	0,22	0,0005	-0,011	0,21
EMPRESA ENERGÉTICA CORINTO	0,35	0,001	-0,024	0,33
TIPITAPA POWER COMPANY	0,23	0,001	-0,018	0,22
GEOSA	0,48	0,057	-0,023	0,51

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 5. Promedios de ritmo de crecimiento de la productividad total de los factores, la eficiencia técnica y la tecnología de los ingenios San Antonio y Monte Rosa, durante el periodo 2002-2012.

Promedios de ritmo de crecimiento de la productividad total de los factores, la eficiencia técnica y la tecnología de los ingenios San Antonio y Monte Rosa, durante el periodo 2002-2011					
Planta de Generación	Effch	Techch	pech	Sech	Tfpch
Ingenio San Antonio	0,94	0,944	0,952	0,988	0,888
Ingenio Monte Rosa	1,168	0,944	1,123	1,039	1,103
Promedio	1,048	0,944	1,034	1,013	0,989
Effch: cambio de la eficiencia técnica, Techch: cambio tecnológico, pech: cambio en eficiencia pura, Tfpch: cambio en la productividad total de los factores.					

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 6. Promedios de ritmo de crecimiento de la productividad total de los factores de plantas que emplean derivados del petróleo en la generación de energía eléctrica, durante el periodo 2009-2011.

Promedios de la productividad total de los factores, la eficiencia técnica y la tecnología de las centrales térmicas del SIN que emplean derivados del petróleo en la generación de energía eléctrica, durante el periodo 2009-2011					
Centrales térmicas de Generación	Effch	Techch	pech	Sech	Tfpch
ALBANIZA	1,034	0,992	1,000	1,034	1,026
GECSA	1,031	0,988	1,029	1,002	1,019
GESARSA	0,987	0,988	1,000	0,987	0,976
CENSA	0,979	0,989	0,979	1,000	0,969
EMPRESA ENERGÉTICA CORINTO	1,000	0,93	1,000	1,000	0,930
TIPITAPA POWER COMPANY	1,012	0,994	1,000	1,012	1,006
GEOSA	0,854	0,95	0,854	1,000	0,811
Promedio	0,984	0,976	0,979	1,005	0,960
Effch: cambio de la eficiencia técnica, Techch: cambio tecnológico, pech: cambio en eficiencia pura, Tfpch: cambio en la productividad total de los factores.					

Fuente: Elaboración propia

Análisis de resultados

Los resultados de la evaluación integral corresponden a la salida del modelo de evaluación integral descrito en este artículo y se dividen en una valoración integral del uso de cada energético así como en una evaluación de cada componente; es decir, es una valoración que integra los aspectos financieros, económicos, ambientales, sociales y de productividad y cuyos resultados se resumen en los cuadros 7 y 8.

Cuadro 7. Evaluación integral de los ingenios San Antonio y Monte Rosa.

Evaluación	Ingenio San Antonio	Ingenio Monte Rosa
Evaluación financiera	Muy rentable	Muy rentable
Evaluación económica	Bastante rentable	Bastante rentable
Evaluación social	Bastante rentable	Muy rentable
Evaluación de productividad	No productivo	Bastante productivo
valoración integral	Integralmente rentable	Integralmente rentable

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 8. Evaluación integral de las plantas de generación de energía que emplean derivados del petróleo.

Evaluación	ALBANISA	EMPRESA ENERGÉTICA CORINTO	TIPITAPA POWER COMPANY	CENSA	GECSA	GEOSA
Evaluación financiera	No rentable	Bastante rentable	Bastante rentable	Muy rentable	Muy rentable	No rentable
Evaluación económica	No rentable	No rentable	No rentable	No rentable	No rentable	No rentable
Evaluación social	Muy rentable	Bastante rentable	Bastante rentable	Bastante rentable	Bastante rentable	Muy rentable
Evaluación de productividad	Bastante productivo	No productivo	Bastante productivo	No productivo	Bastante productivo	No productivo
valoración integral	No integralmente rentable	No integralmente rentable	No integralmente rentable	No integralmente rentable	No integralmente rentable	No integralmente rentable

Como resultado de la evaluación integral del uso de bagazo de caña en la generación de energía eléctrica, se encontró que es una actividad muy rentable desde el punto de vista financiero, lo que significa que desde la perspectiva de la iniciativa privada de negocio esta actividad es muy atractiva. Así mismo, se obtuvo que desde el punto de vista de la evaluación económica, esto es, el costo de oportunidad de la economía nicaragüense, esta actividad es bastante rentable, lo que denota los beneficios económicos del uso de este recurso energético renovable para la sociedad en general y no para un grupo específico de ella.

Además, desde el punto de vista del impacto social del uso de bagazo en la generación de energía eléctrica, y de forma más precisa desde el impacto de la contribución del acceso a la energía eléctrica a la sociedad, impacto en precio de la energía eléctrica e impacto en las emisiones de CO₂ fue valorado como bastante rentable para el caso del ingenio San Antonio y muy rentable para el ingenio Monte Rosa, lo que indica que la contribución social de este último ingenio impacta en mayor beneficio a los ciudadanos. Desde el punto de vista de la productividad total de los factores de producción empleados en la generación de energía eléctrica usando bagazo de caña, el ingenio Monte Rosa presenta un ritmo promedio de

crecimiento de productividad; por el contrario, el ingenio San Antonio no muestra crecimiento en su productividad y por tanto es calificado como no productivo.

Por otra parte, la evaluación integral del empleo de derivados del petróleo en la generación de energía eléctrica detalla como no rentables todas las plantas térmicas consideradas en este estudio. No obstante, la mayoría de estas plantas son consideradas bastante rentables y muy rentables desde el punto de vista financiero, es decir, son un buen negocio, lo que confirma la disponibilidad de inversión privada en este tipo de centrales. Sin embargo, estas plantas térmicas no son rentables para la economía nacional, por lo que su empleo no justifica la disposición de recursos públicos en ellas.

Por otro lado, desde el punto de vista social, la mayoría de las plantas que emplean derivados del petróleo para generar energía fueron valoradas como bastante rentables, debido principalmente al impacto en el acceso al bien energía eléctrica que proporcionan. En el mismo sentido, en la evaluación del promedio de crecimiento de productividad total de sus factores, algunas de ellas muestran un crecimiento que las clasifica como bastante productivas, pero la mitad fueron evaluadas como no productivas, lo que significa que el empleo del recurso energético no renovable y la gestión del proceso de generación de energía eléctrica en el 50% de las plantas térmicas estudiadas es ineficiente.

Conclusiones

El modelo de evaluación integral presentado en este artículo se sustenta empleando una lógica de rangos basado en la herramienta matemática de la lógica difusa, que logra integrar los elementos de evaluación financiera, económica, social y ambiental empleados para valorar el recurso energético renovable bagazo de caña con respecto a los recursos energéticos no renovables derivados del petróleo en la generación de energía eléctrica en Nicaragua.

Así mismo, en este artículo se detalló el proceso de construcción del modelo de evaluación integral y se explicó cuales fueron los datos de entrada y salida que se deben suministrar al modelo, así como la forma de emplearlo. Así mismo, se detalló la metodología de integración basada en la lógica difusa y la evaluación integral de salida del modelo. Cabe señalar que durante el proceso de integración de las evaluaciones en el modelo, el establecimiento de los límites o rangos de evaluación de rentabilidad financiera, económica, social y de productividad, las reglas heurísticas generales de evaluación y la modelización de la lógica difusa fueron consultados expertos usando la metodología DELPHI.

Por otra parte, como resultado de la evaluación integral del uso de bagazo de caña en la generación de energía eléctrica, se obtuvo que es integralmente rentable. Por el contrario, todas las plantas térmicas consideradas en este estudio resultan no ser integralmente rentables.

En suma, el empleo del bagazo de caña es integralmente rentable y presenta más beneficios que el uso de derivados del petróleo para la generación de energía eléctrica en Nicaragua.

Bibliografía

Andrade, R., González, E. & Caballero, E. (2011). Un sistema lógico para el razonamiento y la toma de decisiones: la lógica difusa compensatoria basada en la media geométrica. *Revista investigación operacional*, 32(3), 230-245. Obtenido de <http://rev-inv-ope.univ-paris1.fr/files/32311/32311-04.pdf>

- Arango, M., Serna, C. & Ortega G. (2012). La gestión de indicadores empresariales con lógica difusa para la toma de decisiones. *Lámpakos*, 8, 47-53. Obtenido de <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4490568>
- Aziz, R. (2013). *Studies in Fuzziness and Soft Computing*. New York: Springer ISBN 978-3-642-34894-5
- Baca, G. (2006). *Evaluación de Proyectos*. 4 ed. México: Mc Graw Hill.
- Blanco, N. & Zúniga, C. (2013). A New Case of Bio Economy in Nicaragua. *Journal of Agricultural Studies*, ISSN 2166-0379. Vol. 1, No. 1. Macrothink Institute. doi:10.5296/jas.v1i1.3352; URL:<http://dx.doi.org/10.5296/jas.v1i1.3352>
- Blank, L. & Tarquín, A. (2004). *Ingeniería económica*. 5 ed. México: Mac Graw Hill.
- Cejas, J. (2011). La lógica difusa compensatoria. *Ingeniería Industrial*, 23(2), II/No. 157-161.
- Coelli, T. (2008). A guide to DEAP versión 2.1: a data Envelopment Analysis computer program. CEPA Working Paper, 96. Obtenido de <http://www.uq.edu.au/economics/cepa/deap.php>
- Cohen, E. & Martínez, R. (2004). *Manual de formulación, evaluación y monitoreo de proyectos sociales*. Obtenido de http://www.cepal.org/dds/noticias/paginas/8/15448/manual_dds_200408.pdf
- Cox, E. (1994). *The Fuzzy System Hand Book*. Washington: Academy Press.
- Dubois, D. & Prade, H. (1985). A review of fuzzy set aggregation connectives. *Information Sciences*, 36, 85-121.
- Espín, R. & Vanti, A. (2005). Administración lógica: un estudio de caso en una empresa de comercio exterior. *BASE. Revista de Administração e Contabilidade da Unisinos*, 2(2), 69-77.
- Farrel, M.J. (1957). The Measurement of productivity. *Journal of the Royal Society, A CXX*, 253-290. Obtenido de <http://www.lib.ctgu.edu.cn:8080/wxcd/qw/285.pdf>
- Fontaine, E. (1999). *Evaluación social de proyectos*. 12 ed. Chile: Alfa Omega.
- González, E. & Espín, R. (2010). Solución de juegos cooperativos n-personales basada en lógica difusa compensatoria. *Investigación operacional*, 31(1), 45-60.
- Mallo, P., Artola, M., Zanfrillo, M., Morettini, M., Galante, M., Pascual, M. & Busetto, A. (2010). Una propuesta de selección de entidades aseguradoras a partir de un modelo de lógica compensatoria difusa. *Cuadernos del CIMBAGE*, 12, 85-111.
- Mendoca, L., Sousa, J.M.C., Kaymak, U. & Sá da Costa, M.G. (2006). Weighting goals and constraints in fuzzy predictive control. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 17, 517-532.
- Morillas Raya, A. 2006. *Introducción al análisis de datos difusos*. Edición electrónica. Texto completo en www.eumed.net/libros/2006b/amr/
- Osorio, J. (2011). QFD difuso para la toma de decisiones multicriterio. Ejemplo de aplicación. *Prospectiva*, 9(2), 22-29.
- Rosales, R. (2001). *Evaluación de proyectos*. San José: ICAP.
- Zadeh, L. (2008). Is there a need for fuzzy logic? *Information Sciences*, 178(13), 2751-2779.
- Zimmermann, H. (2001). *Fuzzy Set Theory and Its Applications*. 4 ed. Boston: Kluwer Academic Publishers. ISBN 9780792374350.

Uso de tecnología en la educación: las habilidades básicas del maestro de primaria en la clase de matemática

Employ of technology in education: the
primary teacher and their basics skill in
technology in mathematics classroom

Yuri Morales-López¹

Fecha de recepción: 20 de octubre del 2014

Fecha de aprobación: 3 de abril del 2015

Morales-López, Y. Uso de tecnología en la educación: las habilidades básicas del maestro de primaria en la clase de matemática. *Tecnología en Marcha*. Vol. 28, N° 4, Octubre-Diciembre. Pág 108-121.

¹ Escuela de Matemática. Universidad Nacional. Costa Rica. Teléfono: (506)25626278. Correo electrónico: yuri.morales.lopez@una.cr

Palabras clave

Educación matemática; formación docente; educación primaria; tecnologías de información y comunicación (TIC).

Resumen

El uso adecuado e inteligente de los recursos tecnológicos es indispensable para el desarrollo de un país. En esta investigación se realiza un diagnóstico de las competencias de los educadores de primaria respecto a estos recursos y su utilización en la clase de matemáticas en Costa Rica. El objetivo es describir una muestra de docentes de primaria y obtener evidencias sobre sus conocimientos actuales, principalmente para el manejo de dichos recursos, y, en segundo lugar, determinar si se ajusta a lo que ocurre en la lección de matemáticas. Esto forma parte del preámbulo para poder definir rutas específicas de formación continua y capacitación adecuadas a la realidad de los docentes de primaria en el país.

Los resultados señalan que muchos educadores no desarrollan las competencias básicas en el uso de TIC en la formación inicial ni en las capacitaciones del Ministerio de Educación Pública. Esto puede ser un indicador de que los esfuerzos y presupuestos económicos que el país ha invertido en este tema no necesariamente se están traduciendo en capacitaciones pertinentes para los educadores.

Keywords

Mathematics Education; Teacher training; Elementary school; Information and Communication Technology ICT.

Abstract

The appropriate and intelligent use of technology resources is essential for the development of a country. This research focuses on competencies of elementary educators about technology resources and how they use it in mathematics classroom. The objective is to describe a sample of Elementary teachers and, thus, obtain evidence regarding to the teachers knowledge about ICT, mainly for management of technological resources into mathematics classroom. This is a preamble to define specific routes for lifelong learning and training for Elementary teachers in Costa Rica.

The results indicate that many teachers do not develop basic skills in the use of ICT in the initial training or in the training of the Ministerio de Educación Pública in this issue are not necessarily being translated into relevant training for educators.

Introducción

La educación es el motor social. Al parecer, esta razonable afirmación no siempre está acompañada de acciones en los países y en sus estructuras de formación de docentes. Está claro que no se cuenta con recursos ilimitados como para suponer que el sistema educativo puede ser autosuficiente y sobrevivir sin una inversión adecuada. De esta manera, es responsabilidad de todos dotar al sistema educativo de las mejores herramientas para fortalecer este motor y la formación de profesionales responsables.

El sistema educativo enfrenta retos y pretende suplir las necesidades que los ciudadanos requieren, respecto a su educación. Esta es una reestructuración permanente entre lo que se realiza en la escuela y lo que es necesario. Para que esta reestructuración ocurra de forma adecuada, deben existir múltiples condiciones como, por ejemplo, una pertinente y permanente formación inicial de docentes, aunque no se eluden otros elementos: políticas educativas, inversión de recursos económicos y sociales, contratación de educadores con estándares mínimos, infraestructura y acceso. Todo ello es parte de las carencias actuales de muchos sistemas educativos.

Si se mantiene la hipótesis de que la educación puede ofrecer oportunidades, posibilidades económicas y de bienestar, entonces se debe contar con maestros líderes, con actitudes y aptitudes positivas y una formación inicial de excelencia.

En el caso de la formación de docentes de matemática, se debe hacer una selección adecuada de personas con afinidad a la disciplina y a la educación, y esto representa una dificultad en la profesionalización de docentes de primaria, nivel en el que se inscribe esta investigación.

Este asunto no solo involucra el conocimiento sobre el contenido disciplinar. Desde la primaria hasta la universidad, la educación matemática debe fortalecerse para poder formar personas con una estructura de pensamiento ordenada y lógica, que puedan enfrentar problemas y adquieran de esta disciplina una herramienta para vivir mejor.

A partir del estudio de lo que ocurre en primaria, se espera evidenciar parte de las características en las que se desarrollan estos procesos (formación de maestros) y las prácticas de aula, especialmente las clases de matemáticas, en las cuales el uso de recursos como las tecnologías de información y comunicación (TIC) podría potenciar algunos procesos.

Para esto, el contexto y sus características también juegan un papel fundamental. Es necesario indicar que, en el caso de Costa Rica, en la primaria (correspondiente a los primeros seis años de estudios del I y II Ciclo de la Educación General Básica) los maestros y las maestras atienden todas las asignaturas básicas (al menos parcialmente), por lo que reciben instrucción general en las distintas disciplinas y pedagogía (otras características del sistema costarricense serán abordadas a lo largo de este manuscrito).

Costa Rica vive una situación particular con la creación de nuevos programas de matemática para primaria y secundaria. La reforma en la educación matemática, diseñada por un grupo de investigadores liderados por Ángel Ruiz Zúñiga y aprobada por el Consejo Superior de Educación el 21 de mayo de 2012, supone un importante insumo para el mejoramiento de la situación actual, aunque es claro que también son relevantes muchos otros factores (por ejemplo, la formación continua).

Una de las iniciativas consideradas durante la creación de estos programas fue la socialización de la propuesta con más de 7000 docentes de todo el país (tanto de primaria como de secundaria), durante el segundo semestre de 2011.

En este contexto, se realizó un diagnóstico de las competencias de los educadores de primaria respecto a los recursos tecnológicos y la forma en que indican que los utilizan en la clase de matemática (en los casos en que lo hacen).

El propósito fue describir una muestra de docentes de primaria y tener indicios sobre los conocimientos de que disponen, principalmente para el manejo de recursos tecnológicos y, en segundo término, cómo éstos se ajusta a lo que ocurre en la lección de matemática.

Marco teórico

A continuación, se presentan los principales aportes considerados desde la bibliografía nacional e internacional, la Reforma de las Matemáticas en Costa Rica y experiencias previas relevantes para esta investigación.

Formación de docentes de primaria y recursos tecnológicos

La calidad en la formación inicial de docentes es fundamental en la preparación de los profesionales. Es ahí donde se configura una serie de cualidades propias del perfil de egreso de las distintas carreras y se expresa la respuesta de los centros de formación para las necesidades que pauta el contexto.

Esta formación inicial es parte de un proceso complejo sobre las capacidades de los docentes para enfrentar los retos de cada país. Para esto, la formación permanente y la capacitación son pilares fundamentales para contar con personal facultado para liderar el proceso educativo.

Esta es una meta en toda la región latinoamericana. Por ejemplo, la Organización de Estados Iberoamericanos para la Educación, la Ciencia y la Cultura (OEI) señala que:

Un profesor que cuente con una formación inicial de calidad y con las oportunidades de acceder a programas de capacitación continua puede contribuir al mejoramiento de los resultados de los niños en su rendimiento. Sin embargo, en la mayor parte de los países de la región, las inmensas demandas de transformación pedagógica que se les han exigido a los docentes en las últimas décadas no han sido acompañadas de los debidos procesos de cambio en las instituciones que los forman ni de las condiciones de trabajo y desarrollo profesional necesarias (OEI, 2010, pp. 74-75).

De manera paralela a las debilidades ya señaladas, la coyuntura de los países hace que no necesariamente todos los centros de formación ofrezcan egresados preparados para su futuro quehacer. Y este asunto también es complejo: la falta de perfiles de contratación, las escasas políticas de seguimiento y evaluación de las carreras de formación inicial de docentes son parte de las debilidades que aún tienen países como Costa Rica.

El currículo de algunas de las carreras de formación de primaria aun está definido por los derroteros del modelo tradicional de educación. Son muy pocas las carreras de este tipo en Latinoamérica que no se enmarcan en este modelo. Algunos han apostado por el rediseño curricular para actualizar sus perfiles de egreso y adaptarse a las nuevas tendencias, como el modelo por competencias desarrollado en Europa, sin que esto signifique la admisión literal de este.

Esta reestructuración y reorganización de los currículos ofrece oportunidades de formación de profesionales más capacitados. Sin embargo, como se mencionó, no son muchas las carreras en Latinoamérica que han podido configurar una estructura nueva.

En este documento no interesa detallar el modelo de competencias europeo ni su adaptación a la región latinoamericana. Lo que es fundamental es precisar al lector que gran parte de las habilidades y destrezas necesarias en la formación de docentes pueden concebirse desde el concepto de *competencia*, así como desde otros modelos.

En general, se desea abordar la idea de *competencia* a través de la existencia de un mínimo de habilidades y destrezas, conocimientos teóricos y prácticos necesarios en la formación de maestros (ya sean o no desarrollados con el modelo curricular por competencias). Esto es equivalente a considerar tales habilidades desde el concepto de *estándares*, como en EE.UU., o indicadores, como parte de lo que indican las bibliografías colombiana y chilena.

Por otro lado, la inclusión de recursos tecnológicos en la formación de docentes agrega otro factor de consideración en este manuscrito. Partir de la inclusión de recursos no desvirtúa la necesidad de comprender que esta no es una meta en sí misma y que está en función de potenciar los currículos de las carreras. El objetivo principal de considerar las TIC en la formación inicial, como indican Moral y Villalustre (2010), es contar con docentes que construyan competencias tecnológicas que les permitan potenciar los distintos espacios de aprendizaje.

Así, se involucra la preparación de los maestros y maestras en el uso pertinente de la herramienta de forma integral con otros recursos. No solo es un asunto de conocimiento y práctica sobre la tecnología como recurso educativo, sino que “se deben desarrollar actitudes críticas, comprometidas y responsables respecto a los impactos de la tecnología en la sociedad” (Ávila, 2008, p. 55).

Varios autores, como Colorado y Edel (2012), reiteran la necesidad de comprender la formación de docentes de primaria como la base fundamental de la inclusión de nuevos conocimientos al aula. Para lograr que la tecnología sea parte de las herramientas para la vida de los educandos, primero debe ser parte de las herramientas del futuro educador.

Esta integración en la formación inicial no ocurre espontáneamente; los centros de formación de maestros tienen una gran tarea al tratar de incorporar el uso pertinente de este recurso. Pero como indica la OEI (2010): “*las transformaciones educativas con tecnología no van a ocurrir si el docente no se integra y se posiciona en el centro de esta*” (p. 72).

Es evidente que las buenas intenciones en este sentido son importantes, pero los indicadores y objetivos explícitos en la incorporación de TIC son estrictamente necesarios. Posiblemente exista una genuina creencia en que las TIC pueden ser útiles en el sector educativo; sin embargo, se evidencia una gran distancia entre tal creencia y las oportunidades y experiencias que se ofrecen en las distintas carreras en la región.

Competencias en TIC y vinculación con la educación matemática en primaria

Las habilidades y destrezas relacionadas con el manejo básico de los recursos tecnológicos por parte de los docentes dependen, en gran medida, de quienes definan tales necesidades. Esto quiere decir que aunque cada país y universidad puede definir sus propios indicadores sobre tales destrezas, es posible establecer una base de partida (o estándares) para conocer la capacidad de los educadores ante el recurso TIC y saber cuáles son las prioridades y características deseables en la formación inicial docente en primaria.

En Morales (2010) se muestran las principales producciones literarias y artículos de investigación científica en el país vinculados a la definición de competencias tecnológicas en la educación. (ver cuadro 1)

Otros documentos también citados en esta investigación, así como destacados en otros artículos (Morales, 2011), señalan listas extensas de cualidades y destrezas que debe poseer el docente en su formación inicial.

Aunque muchos de los textos en los que se examinan estos estándares son meticulosos en la investigación que los genera, la experiencia ha dictado (al autor de este manuscrito) que los esfuerzos por crear tales catálogos de incontables características solo ofrecen un punto de partida para el análisis de las necesidades que presenta el contexto.

Documentos como *Estándares TIC para la formación inicial docente: Una propuesta en el contexto chileno del Centro de Educación y Tecnología*, del Ministerio de Educación de Chile (ENLACES) en colaboración con la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), publicado en 2008, ofrecen una perspectiva distinta y representan un avance en el trabajo que se había realizado antes de este año respecto a los

estándares, pues es el primer intento documentado donde se propone que existe relación entre los catálogos de indicadores y la acción docente y el contexto.

Cuadro 1. Principales producciones literarias y artículos de investigación científica en el país vinculados a la definición de competencias tecnológicas en la educación

Autores señalados (año)	Aporte
Quintanilla (2000)	Definió las siguientes competencias tecnológicas respecto a los docentes en formación: el conocimiento y uso de los equipos informáticos estándar, el conocimiento y uso funcional y creativo de los programas informáticos instrumentales estándar y de páginas <i>web</i> de referencia, de tratamiento de la información: búsqueda, adquisición y procesamiento.
López y Flores (2006)	a) Competencias básicas en el uso de las TIC. Elementos necesarios para el manejo y divulgación del conocimiento. b) Competencias en el uso de las TIC para la navegación. Elementos necesarios para la comprensión y gestión de recursos mediante redes (internet). c) Competencias en el uso de las TIC como medios de comunicación. Elementos relacionados con la comunicación por correos, foros, <i>blogs</i> y construcción de <i>wikis</i> . d) Competencias en el uso de las TIC como medios para el aprendizaje. Herramientas para mediación y formación continua.
Silva, Gros, Garrido y Rodríguez (2006)	a) La primera competencia (básica-mínima) relacionada con el manejo y uso propiamente operativo de <i>hardware</i> y <i>software</i> . b) Diseño de ambientes de aprendizaje entendido como la habilidad o destreza para organizar entornos de enseñanza y aprendizaje con uso de tecnología. c) Vinculación de las TIC con el currículo, en la que se le da importancia a realizar un proceso de aprendizaje desde las necesidades de los sectores curriculares (norma curricular) que permita contextualizar los aprendizajes. d) Evaluación de recursos y aprendizajes, centrada en las habilidades para evaluar técnica y críticamente el impacto del uso de ciertos recursos y la organización de entornos de aprendizaje. e) Mejoramiento profesional, entendido como aquellas habilidades y destrezas que permiten a los docentes dar continuidad a lo largo de la vida a procesos de aprendizaje con el uso inteligente de TIC. f) Ética y valores, orientados a elementos legales y de uso ético de recursos.

Fuente: Extraído de *En búsqueda de las competencias tecnológicas en la formación de formadores en matemáticas* de Morales (2010), en *Cuadernos de Investigación y Formación en Educación Matemática*, 5(6), 63-80.

De manera simultánea, en 2008 aparecen tres documentos diseñados por la UNESCO:

- *ICT competency standards for teachers: the framework of educational policies.*
- *ICT competency standards for teachers: standards of competence modules.*
- *ICT competency standards for teachers: framework guidelines for implementation.*

Estos documentos brindan una visión que delimita la relación con el contexto (mejor que las propuestas previas) y plantean las siguientes guías para hacer efectivas ciertas acciones (UNESCO, 2008, p. 3):

- a) Atendiendo el “Marco de políticas educativas” subyacente.
- b) Examinando los componentes de la reforma de la educación y desarrollando un conjunto de matrices de competencias para docentes que correspondan a los distintos enfoques en

materia de políticas educativas y a los componentes de la reforma del sistema educativo.

- c) Ofreciendo una descripción detallada de las competencias específicas que los docentes deben adquirir en el contexto de cada conjunto o módulo.

Estos documentos se han convertido en un punto de referencia para la creación de proyectos educativos que involucran las competencias en la formación docente. No se pretende abordar todas las competencias que se señalan en estos textos pues eso excedería el alcance de este artículo, además, ya en Morales (2011) se elaboró y publicó un análisis.

En el marco internacional, destacan las investigaciones y documentos propuestos por The International Society for Technology in Education (ISTE). Aunque la implementación directa de sus estándares es incongruente, principalmente por la disparidad de los contextos latinoamericanos en relación con los de EE.UU., el valor real, en este sentido, es la metodología de trabajo adoptada por los científicos involucrados en dicha iniciativa

El caso de la educación matemática

La formación en competencias TIC para los docentes de primaria y su relación con la formación en educación matemática adolece de síntomas similares a los descritos en los párrafos anteriores.

Respecto a las competencias tecnológicas utilizadas en las clases de matemática, existe muy poca evidencia de investigación longitudinal que documente experiencias relacionadas con el vínculo entre la formación inicial de docentes de primaria en TIC y su quehacer en el aula.

Ciertamente, existe un factor que puede ofrecer pistas sobre la razón de la poca experiencia en este campo: al menos en la región, pocas veces se forma a los docentes de primaria en didácticas específicas y, como se aborda en el próximo apartado, incluso la formación en contenidos matemáticos es escasa.

Al crear carreras para las cuales el docente debe tener preparación en las principales áreas de conocimiento, se disminuye el tiempo con que se cuenta para abordar temáticas como la matemática y su didáctica. Este es un asunto sensible, pues aunque existen carreras de docencia de primaria con énfasis en matemática, la formación, en general, parece no ser suficiente.

Por ejemplo, en Costa Rica una parte importante de las carreras de formación de docentes no está acreditada: apenas el 8,6% del total de carreras académicas que se ofrecen en Costa Rica están acreditadas. (Estado de la Educación 5, Programa Estado de la Nación, 2015).

En lo que sí parece haber claridad es en que existe una limitada capacidad de respuesta a las necesidades de aula en matemáticas y que, posiblemente, las herramientas tecnológicas no han sido recursos utilizados con efectividad. Es importante advertir que esto no significa que su uso (incluso efectivo) podrá solucionar, de forma aislada, muchas de las debilidades que tienen algunos sistemas educativos de la región y que deben ser abordadas desde muchas aristas.

Situación particular de Costa Rica

Como se señaló, Costa Rica vive actualmente una reforma profunda en la educación matemática. Con la redacción y aprobación de nuevos programas se han abierto múltiples oportunidades para sintonizar los elementos presentes en el currículo costarricense. A la luz de este nuevo programa educativo, se hace necesario repensar la formación inicial de docentes de primaria y secundaria. El principal cambio, posiblemente, viene de una reestructuración del quehacer de aula, para orientarlo hacia la resolución de problemas y un currículo basado en habilidades.

Sin embargo, incluso con este cambio en el programa, no se puede ser ingenuo y considerar la desaparición de los problemas que afectan al país. Como se señala en el *Tercer Informe Estado de la Educación* (Programa Estado de la Nación, 2011, p. 116), “el sistema sigue teniendo serios problemas para promover en los estudiantes destrezas y habilidades básicas que hoy demanda el contexto nacional e internacional, especialmente en áreas como las ciencias, el dominio de idiomas y el uso de las nuevas tecnologías de información y comunicación”. Según este informe, se puede añadir que:

- *Existen iniciativas para la incorporación de TIC, pero están desarticuladas entre sí, alejadas de la formación inicial y desarrollo profesional continuo de docentes.*
- *La formación inicial presenta problemas relevantes vinculados a la oferta de cursos que preparen a los docentes para el uso pertinente de TIC.*
- *Han mejorado los salarios de los docentes, pero siguen existiendo jornadas extenuantes que no contemplan preparación de lecciones ni otras actividades fundamentales.*
- *Existe mayor titulación; pero, como se advirtió unos párrafos atrás, al no existir ningún control sobre la calidad, no necesariamente significa una mejoría.*
- *Aun el país no tiene un perfil de contratación de docentes.*
- *La formación continua es dispersa y no necesariamente responde a las necesidades del docente.*
- *No existe un perfil de capacitación.*

Respecto a la investigación y la bibliografía nacional sobre el uso de recursos tecnológicos por parte de docentes de primaria en Costa Rica, se destacan tres fuentes en el presente artículo.

Por un lado, Gonzaga (2005) investigó sobre el programa de formación de docentes de primaria en la sede Occidental de la Universidad de Costa Rica (UCR, Occidente) y logró documentar ciertas características relevantes (p. 22):

- La incorporación de la tecnología informática en el desarrollo de los cursos es mínima.
- Los programas no la consignan y los estudiantes señalan que son pocas las posibilidades de acceso a los equipos.
- Los docentes aducen falta de capacitación y de disponibilidad institucional del equipo.
- El uso principal que se hace es búsquedas de información en internet y presentaciones en Power Point y elaboración de material didáctico.
- La tecnología se utiliza como un medio para hacer más atractivo el proceso de enseñanza y aprendizaje, lo que no constituye un cambio de paradigma.

Por otro lado, Monge y Méndez (2006) realizaron una investigación sobre el papel de la computadora en la educación. Señalan que la muestra de docentes analizada considera que las tecnologías son herramientas muy útiles, pero las usan para sustituir otras más antiguas como el retroproyector sustituido por el *videobeam*. Además, afirman que, aunque los gobiernos han intentado impulsar el uso de tecnologías de forma triunfalista, el personal docente no tiene criterio sobre temas fundamentales en la didáctica relacionada con estas herramientas. Más de la mitad de la muestra indicó que el mayor potencial del recurso tecnológico favorece la organización de su trabajo, en vez de mejorar los procesos de educación.

Por último, Alfaro, Alpízar y Chaves (2012) describen los métodos, técnicas de enseñanza y recursos didácticos utilizados por una muestra de docentes de I y II Ciclo de la Educación General Básica en la Dirección Regional Educativa de la provincia de Heredia, al enseñar probabilidad y estadística.

Entre los principales hallazgos respecto al uso de TIC mencionan la poca incorporación detectada. Esto puede deberse a la falta de recursos tecnológicos y la poca preparación para su uso. Asimismo, indican que aunque hay laboratorios de cómputo en algunas escuelas, no existe vinculación directa con el quehacer de los docentes en asignaturas básicas, incluyendo matemática.

Metodología

Esta investigación es de tipo descriptivo, con un enfoque principalmente cuantitativo. Su objetivo es detallar las habilidades básicas con las que cuenta el personal docente de primaria respecto al uso de recursos tecnológicos y conocer cómo los aplican en la clase de matemática (en los casos en que se aplican).

La población que se consideró fue el cuerpo docente en servicio de primaria en Costa Rica y se diseñó una encuesta anónima que se aplicó de forma electrónica entre enero y febrero de 2011.

Instrumento e indicadores

Se confeccionó un instrumento de encuesta individual a los participantes. Tras una prueba piloto que contó con 30 educadores, la versión definitiva del instrumento se dirigió a 186 docentes de primaria de todo el país.

Esto se realizó a través de un servidor computacional ubicado en la UCR y se empleó el software libre LimeSurvey versión 1.91+ Build 11804 para la administración del mismo instrumento.

En este proceso respondieron 143 personas del grupo estimado originalmente; seis personas no realizaron completamente la encuesta y se consideraron no válidas (fueron excluidas). Así, la muestra final estudiada en la investigación fue de 137 docentes de primaria en servicio en el periodo 2011 y contratados por el Ministerio de Educación Pública (MEP).

Indicadores

Para el diseño de los indicadores correspondientes al instrumento se analizó la bibliografía nacional e internacional indicada en la sección anterior. Como se mostró, existen extensas listas de cualidades que varios autores han formulado para la formación en TIC, las cuales sirvieron como referencia pero se enfatizó en los documentos que muestran indicios sobre la vinculación con el currículo.

Así, este trabajo está basado en un análisis exhaustivo de la propuesta chilena del 2008 ya mencionada, los estándares de la UNESCO (2008) y la propuesta desarrollada en Morales (2011). Se definieron los siguientes indicadores (ver cuadro 2). En total, la versión final del instrumento constó de 29 preguntas, de las cuales 21 fueron preguntas cerradas de opción única y otras de opción múltiple y ocho escalas tipo Lickert.

Estudio de correlaciones

En la búsqueda de correlaciones estadísticamente significativas se utiliza el Rho(ρ) de Spearman, para verificar si alguna relación se aleja de la nulidad. También se seleccionó esta correlación, pues las variables son ordinales y de naturaleza discreta y no se puede asegurar (ni se pretende) que los datos se acerquen a una curva tipo normal.

Cuando se interpreta la existencia o no de correlaciones no paramétricas en este documento, siempre se considera un análisis bilateral o de doble hoja para estudiar todos los posibles casos (direcciones) de correlación de este tipo (prueba de significancia).

Así, $\rho = 1 - ((6\sum d^2)/(N^3 - N))$, donde ρ es el coeficiente de Spearman, d es el valor de la diferencias de los rangos de ambas variables y N es la cantidad de parejas de datos observadas.

Cuadro 2. Selección de indicadores y preguntas en la encuesta aplicada

Indicadores	Preguntas en la encuesta
Manejo básico de las TIC (PC, laptop, <i>videobeam</i> , entre otros).	p.6, p.7, p.8, p.9, p.10, p.11.
Programas (<i>software</i>) que conoce y que puede utilizar.	p.12, p.13, p.14.
Formación inicial en las universidades respecto al uso de tecnologías.	p.15, p.16, p.17, p.18, p.19, p.20.
El uso de la computadora en las clases de matemáticas.	p.21, p.22, p.23, p.24, p.25, p.26, p.27.
Necesidades de capacitación docente.	p.28, p.29.

Fuente: Elaboración propia.

Análisis

En este apartado se consignan los principales descriptores de las características de los educadores y algunas correlaciones trabajadas.

En el estudio participaron 137 profesores en servicio del MEP, de los cuales el 74,5% fueron mujeres. El rango de edades osciló entre 26 y 61 años y el promedio de los encuestados fue de 41 años. De estos docentes, el 69% pertenece al área metropolitana del país y el resto a las regiones rurales.

Sobre el uso básico de las TIC, los docentes expresan que conocen y manejan la computadora de escritorio y el *videobeam* para tareas básicas (no necesariamente relacionadas con educación); en contraste, solo el 12% expresó conocer el manejo de pizarras electrónicas y el 6% las calculadoras programables. Aproximadamente la mitad de las personas (49%) consideró que sabe utilizar las calculadoras científicas.

Esto concuerda con la bibliografía consignada en los párrafos anteriores, que señala que la inversión en recursos en el país ha aumentado; no obstante, al cuestionar sobre tecnologías más orientadas a la educación, los porcentajes disminuyen.

Al mismo tiempo, el total de personas afirma poseer computadora de escritorio en la casa, lo que puede ser un factor determinante para expresar un uso básico. También se había indicado un aumento en los salarios de los educadores y esto puede contribuir a la compra de computadoras de escritorio.

Al consultar el lugar principal donde aprendió a utilizar la computadora de escritorio, un alto porcentaje (70,8%) señaló que en el hogar con familiares o amigos o en cursos y capacitaciones ofrecidos por otras instituciones diferentes al MEP; mientras que solo uno de cada diez (9,5%) aprendió en la formación universitaria inicial. Asimismo, se destaca que únicamente siete personas indican haber aprendido por capacitaciones del MEP o en el trabajo en la escuela junto a colegas (ver figura 1). Otra consulta reveló que la media de los maestros sobre hace cuánto tiempo aprendieron a usar este recurso fue de 13 años.

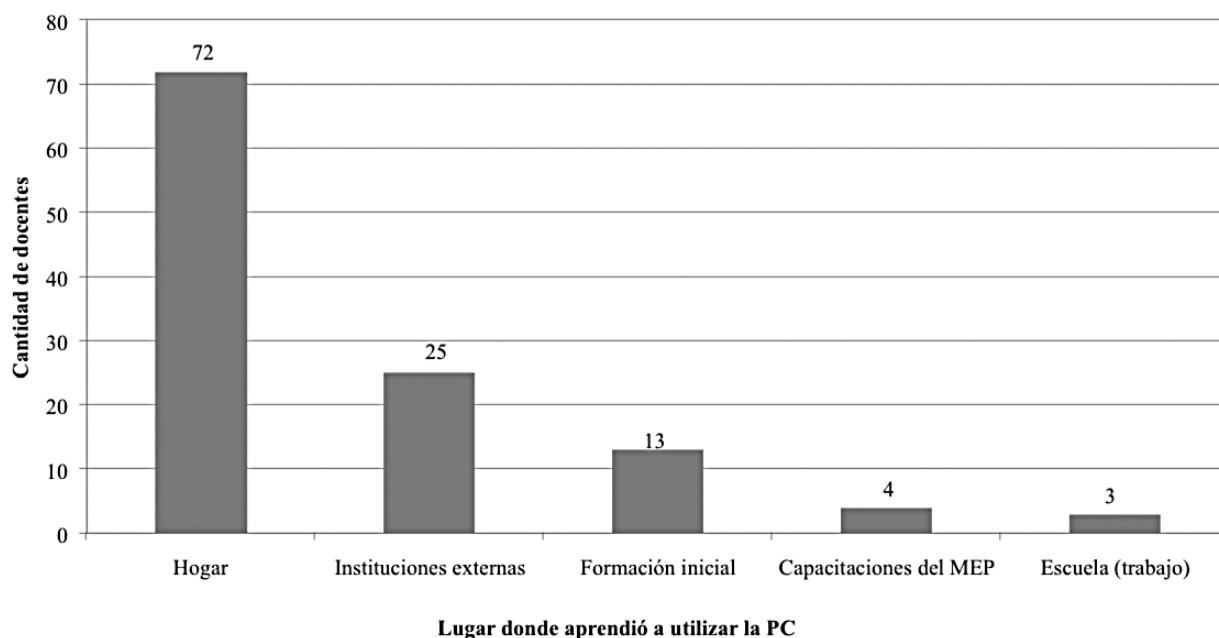


Figura 1. Lugar donde los docentes aprendieron a utilizar la computadora de escritorio según profesorado, Costa Rica. 2011. *Fuente:* Elaboración propia con la base de datos del estudio.

Respecto al ingreso y uso de internet, 61% de los encuestados afirman poder ingresar a esta red al menos una vez al día. La principal actividad que realizan es revisar el correo (frecuentemente o muy frecuentemente), seguida de buscar información en motores como Google. Y aunque la mitad de los encuestados afirman ingresar a chatear, a redes sociales y actividades de ocio, estas son de muy poca prioridad para la muestra de educadores.

Por otro lado, el 55% de los docentes expresan que han recibido instrucción sobre el uso de recursos tecnológicos como herramienta educativa durante su formación inicial. Una cuestión relevante es que al consultarles sobre la pertinencia de esta instrucción, el 64% contestó que fue nada o poco pertinente y el 36% la califica de apenas pertinente (ver figura 2). Además, ninguno de los encuestados respondió que fue muy pertinente o totalmente pertinente.

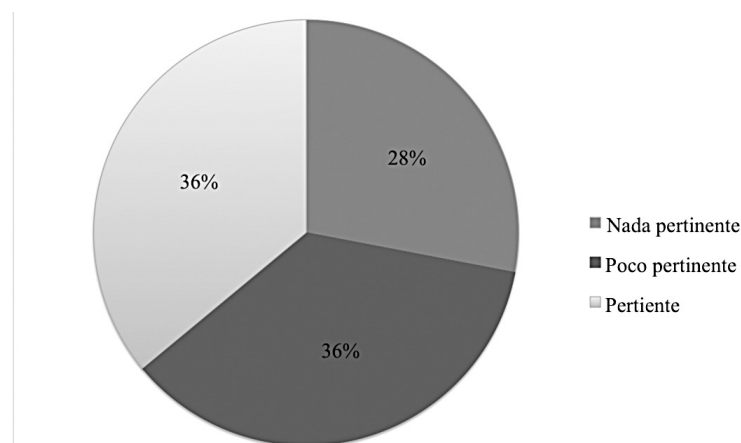


Figura 2. Pertinencia de la formación inicial en el uso de TIC como recurso educativo según profesorado, Costa Rica. 2011. *Fuente:* Elaboración propia con base de datos del estudio.

Esto también se ve reflejado en el alto porcentaje de educadores que señaló la necesidad de contar con mayor instrucción en este recurso durante los procesos de formación inicial (87%). Independientemente, el 99% de la muestra de docentes (136 de 137) afirma que es necesario recibir formación tanto inicial como continua y permanente en este tema.

Respecto a la relación con matemáticas, solo el 23% de los docentes expresa haber utilizado el recurso tecnológico en el aula de matemáticas, aunque cinco de cada diez (50,4%) asegura que existen laboratorios disponibles en la escuela en la que labora. Así, es evidente que la falta de recursos es un factor importante, pero también se señala la desmotivación, problemas administrativos con el préstamo de los recursos y el desconocimiento como factores importantes dentro de su realidad de aula.

Cuando se utilizó este recurso en matemáticas, uno de cada tres profesores lo usó para desarrollar trabajos grupales o en equipo, mientras que dos de cada tres prefirió utilizarlo de forma individual en la clase de matemática.

Consecuentemente con el objetivo de la investigación, se indagó sobre la autovaloración de su conocimiento en el uso de recursos tecnológicos (independientemente de su formación) para conocer la capacidad que expresa el docente de utilizarlos de forma adecuada. Casi la mitad de los educadores (53,4%) dijo tener la habilidad para incorporar estos recursos en el aula de matemática de manera efectiva.

Por último, se estudió la necesidad de formación permanente expresada por los educadores. Al respecto, el 99% manifestó que es necesario establecer programas de capacitación dando prioridad a ciertos temas, como se muestra en la cuadro 3.

Cuadro 3. Intereses de formación continua por prioridad, según profesorado, Costa Rica. 2011

1. Actividades lúdicas con el uso de la computadora	↓
2. Software variado para abordar distintos temas	↓
3. Herramientas relacionadas con ambientes como Moodle	↓
4. Didáctica específica- Teoría de la incorporación de recursos tecnológicos en el currículo escolar	↓
5. Ética de los recursos tecnológicos en la educación	

Fuente: Elaboración propia con base de datos del estudio.

Correlaciones estudiadas

Antes de señalar las correlaciones estudiadas, se advierte que este artículo no pretende inferir estadísticamente sobre la población de educadores, más bien procura ofrecer un punto de partida para el análisis de la realidad de los maestros y maestras en muchas zonas distintas del país y con características propias en este nivel educativo.

A continuación, se señalan las correlaciones analizadas mediante el coeficiente de Spearman:

- No se determinó relación estadísticamente significativa entre la creencia sobre la importancia del uso de TIC en la educación y el lugar donde aprendió a utilizar los recursos tecnológicos.

- No se determinó relación estadísticamente significativa entre el lugar donde aprendió a utilizar los recursos tecnológicos y quienes lo incorporaron en las clases de matemáticas.

Se debe indicar que el hecho de no obtener un p significativo no indica que la población se comporta de la misma manera; este indicador determina la intensidad en esta muestra.

Consideraciones finales

Entre los resultados más relevantes de esta investigación se distingue que gran cantidad de los educadores considerados expresan competencias básicas en el manejo de la computadora de escritorio; esto desentona cuando la gran cantidad de docentes afirma no conocer otro tipo de recursos tecnológicos educativos ni su manejo.

Los datos señalan que muchos educadores no obtienen las competencias básicas en el uso de TIC en la formación inicial ni por formación continua por parte del MEP. Esto puede ser un indicador de que los esfuerzos y presupuestos que el país ha invertido en este tema no necesariamente se traducen en capacitaciones pertinentes para los educadores. En el caso específico de la formación inicial, la mitad de los entrevistados indica que aunque sí recibió instrucción en recursos tecnológicos, las habilidades desarrolladas fueron muy poco útiles.

En el caso de lo que sucede en la clase de matemática, los docentes expresan poco o nada de uso de los recursos tecnológicos en este espacio, y la mayoría afirma que no se cuenta con el recurso tecnológico o laboratorios.

Un tema de reflexión es que más de la mitad de los profesores expresa tener la habilidad (completamente) para poder incorporar los recursos tecnológicos al quehacer educativo. Junto a esto también resalta el hecho de que este mismo grupo de profesores no considere relevante la didáctica específica ni la teoría sobre la incorporación de recursos tecnológicos sino que, más bien, da prioridad a aprender actividades lúdicas y *software* específico.

Próximos estudios deberán profundizar en los temas que se abordan en la formación continua respecto al uso de recursos tecnológicos y cuáles habilidades y competencias se desarrollan, con el fin de contrastarlo con lo que ocurre en el aula de matemática.

Bibliografía

- Alfaro, A., Alpízar, M. & Chaves, E. (2012). Recursos Metodológicos Utilizados por Docentes de I y II Ciclos de la Educación General Básica en la Dirección Regional de Heredia, al impartir los Temas de Probabilidad y Estadística. *Revista UNICIENCIA*, 26(1-2), 135-151. Obtenido de <http://www.revistas.una.ac.cr/index.php/uniciencia/article/download/3869/3710>
- Ávila, P. (2008). Los docentes de la educación básica y la tecnología. *Tecnología y Comunicación Educativas*, 22(46), 48-56. Obtenido de <http://tyce.ilce.edu.mx/tyce/46/pdfs/articulo4.pdf>
- Colorado, B.L. & Edel, R. (2012). La usabilidad de TIC en la práctica educativa. RED. *Revista de Educación a Distancia*, 11(30). Publicación en línea. Obtenido de <http://estudiosterritoriales.org/articulo.oa?id=54723291004>
- Gonzaga, W. (2005). Las estrategias didácticas en la formación de docentes de educación primaria. *Revista Electrónica Actualidades Investigativas en Educación*, 5(1), 1-23. Obtenido de <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/447/44750103.pdf>
- Monje, J. & Méndez, V. (2006). El papel de la computadora en la escuela: contraste entre teoría y práctica en docentes costarricenses de primaria y secundaria. *Revista Educación*, 30(2), 47-62. Obtenido de <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/440/44030204.pdf>
- Moral, M. & Villalustre, L. (2010). Formación del profesor 2.0: desarrollo de competencias tecnológicas para la escuela 2.0. Magister: *Revista miscelánea de investigación*, 23(1), 59-70. Obtenido de <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3403432>

- Morales, Y. (2010). En búsqueda de las competencias tecnológicas en la formación de formadores en matemáticas. *Cuadernos de Investigación y Formación en Educación Matemática*, 5(6), 63-80. Obtenido de <http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/cifem/article/download/6923/6609>
- Morales, Y. (2011). Arguments for the definition of the ICT skills for prospective teachers: university student perception about the role of teachers of Mathematics in secondary. *Ciência & Educação*, 17(3), 757-769. Obtenido de <http://www.scielo.br/pdf/ciedu/v17n3/a15v17n3.pdf>
- OEI. (2010). *Metas educativas 2021. La educación que queremos para la generación de los bicentenarios*. Documento en línea. Obtenido de <http://www.oei.es/metas2021/todo.pdf>
- Programa Estado de la Nación. (2015). Quinto Informe Estado de la Educación. San José: PEN.
- UNESCO. (2008). *Los estándares UNESCO de Competencia en TIC para Docentes*. Documento en línea. Obtenido de <http://www.eduteka.org/pdfdir/UNESCOEstandaresDocentes.php>

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

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

Important note

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

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