

Revista trimestral

TECNOLOGÍA

en marcha

ISSN 0379-3982 Vol. 27 N°1 enero – marzo 2014

Contenido

Diseño de un amplificador operacional de transconductancia aplicando técnicas de optimización multiobjetivo

Design of an operational transconductance amplifier applying multiobjective optimization techniques

Roberto Pereira-Arroyo, Roberto Molina-Robles, Alfonso Chacón-Rodríguez..... 3

Evaluación de la velocidad de corrosión del acero al carbono mediante técnicas electroquímicas

Corrosion rate evaluation of the carbon steel trough electrochemical techniques

Jeimmy González-Masís, Luis Garita-Arce..... 13

Evaluación de posibles medidas para reducir las emisiones de fuentes móviles en Costa Rica, 2010-2015

Assessment of possible strategies to reduce mobile sources emissions in Costa Rica, 2010-2015 projection

Jorge Herrera-Murillo, José Félix Rojas-Marín, Susana Rodríguez-Román..... 23

Formación acelerada de gránulos productores de hidrógeno para el arranque de reactores UASB utilizando vinazas

Accelerated formation of hydrogen-producing granules for the start-up of UASB reactors using vinasses

César González-Ugalde, J. Esteban Durán-Herrera..... 38

Lineamientos para la manufactura de partes de alta precisión

Guidelines for high precision manufacturing

Natalia Robles-Obando 48

Evaluación electroquímica de soldaduras en tubos capilares de acero inoxidable Electrochemical evaluation of stainless steel welded tubes <i>Javier E. Rodríguez-Yáñez, Ericka Saborío-Leiva, Daniel Mora-Montoya</i>	57
Revisión de modelos teóricos de la dinámica de fluidos asociada al flujo de sangre A review of theoretical blood flow models <i>Gabriela Ortiz-León, Daniel Araya-Luna, Marta Vilchez-Monge</i>	66
Aislamiento e identificación de patógenos de la estirpe silvestre del ajo (<i>Allium sativum</i> L.) Isolation and identification of pathogens of wild garlic (<i>Allium sativum</i> L.) <i>Karina Astorga-Quirós, Claudia Zúñiga-Vega, William Rivera-Méndez</i>	77
Principales géneros de nematodos fitoparásitos asociados a plátano y piña en las regiones Huetar Norte y Huetar Atlántica de Costa Rica Major genera of plant parasitic nematodes associated with plantains and pineapple in the Huetar Norte and Huetar Atlántica regions of Costa Rica <i>Tomás de J. Guzmán-Hernández, Ingrid Varela-Benavides, Silvia Hernández-Villalobos, Joaquín Durán-Mora, Wayner Montero-Carmona</i>	85
Producción y exportación de melón (<i>Cucumis melo</i>) en Costa Rica Costa Rican melon (<i>Cucumis melo</i>) production and exports <i>José Eladio Monge-Pérez</i>	93
Cambios de uso del suelo y crecimiento urbano. Estudio de caso en los municipios conurbados de la Mancomunidad Metrópoli de Los Altos, Quetzaltenango, Guatemala Changes in land use and urban growth. Case study in the neighboring municipalities of the Commonwealth Metrópoli de Los Altos, Quetzaltenango, Guatemala <i>Héctor Obdulio Alvarado-Quiroa, Freddy Araya-Rodríguez</i>	104
Análisis de la situación del estado de la Gestión Integral de Residuos (GIR) en el cantón de Guácimo, Costa Rica Analysis of the solid waste management of Guácimo, Costa Rica <i>Roel Campos-Rodríguez, Silvia Soto-Córdoba</i>	114

Diseño de un amplificador operacional de transconductancia aplicando técnicas de optimización multiobjetivo

Design of an operational transconductance amplifier applying multiobjective optimization techniques

*Roberto Pereira-Arroyo¹
Roberto Molina-Robles²
Alfonso Chacón-Rodríguez³*

*Fecha de recepción: 19 de abril del 2013
Fecha de aprobación: 28 de junio del 2013*

Pereira-Arroyo, R; Molina-Robles, R; Chacón-Rodríguez, A. Diseño de un amplificador operacional de transconductancia aplicando técnicas de optimización multiobjetivo. *Tecnología en Marcha*. Vol. 27, N° 1. Pág 3-12

- 1 Escuela de Ingeniería en Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. Correo electrónico: rpereira@itcr.ac.cr.
- 2 Escuela de Ingeniería en Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. Correo electrónico: alchacon@itcr.ac.cr.
- 3 Escuela de Ingeniería en Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. Correo electrónico: roberc_25@hotmail.com.

Palabras clave

Optimización multiobjetivo; amplificador operacional de transconductancia; algoritmos genéticos; CMOS.

Resumen

En este trabajo, el problema en cuestión consiste en el dimensionamiento de un Amplificador Operacional de Transconductancia (OTA). El frente de Pareto se introduce como un concepto útil de análisis con el fin de explorar el espacio de diseño de este tipo de circuitos analógicos. Se emplea un algoritmo genético (GA) para detectar automáticamente este frente, en un proceso que de manera eficiente encuentra parametrizaciones óptimas y sus valores correspondientes en un espacio agregado de aptitudes. Ya que el problema es tratado como una tarea de optimización multiobjetivo, las diferentes medidas del amplificador como la transconductancia, razón de cambio de salida, el rango lineal y la capacitancia de entrada se utilizan como funciones de aptitud. Por último, se presentan los resultados de simulación, utilizando una tecnología CMOS estándar de $0,5\mu\text{m}$.

Keywords

Multiobjective optimization; operational transconductance amplifier; genetic algorithms; CMOS.

Abstract

In this paper, the problem at hand consists in the sizing of an Operational Transconductance Amplifier (OTA). The Pareto front is introduced as a useful analysis concept in order to explore the design space of such analog circuit. A genetic algorithm (GA) is employed to automatically detect this front in a process that efficiently finds optimal parameterizations and their corresponding values in an aggregate fitness space. Since the problem is treated as a multi-objective optimization task, different measures of the amplifier like the transconductance, the slew rate, the linear range and the input capacitance are used as fitness functions. Finally, simulation results are presented, using a standard $0,5\mu\text{m}$ CMOS technology.

Introducción

Este documento presenta una estrategia de optimización automatizada aplicada al proceso de diseño de un Amplificador Operacional de Transconductancia (OTA), aprovechando la potencia y versatilidad de los algoritmos genéticos (GA). Algunos enfoques atan el problema de optimización de la topología específica de un circuito y de sus parámetros, lo que hace necesaria una búsqueda relativamente exhaustiva del espacio de parámetros. (MacEachern, 1999; Hassan, Anis y Elmasry, 2005). Los algoritmos genéticos, por otro lado, funcionan en un nivel de abstracción más alto, en el que no es necesaria información específica sobre el circuito que se está optimizando; el algoritmo genético solo requiere un conjunto de valores de aptitud (por ejemplo, números reales), que representa algunos de los

parámetros del circuito tales como el consumo de energía, área de silicio o su velocidad de respuesta. El optimizador propuesto utiliza el algoritmo genético llamado PESA (Algoritmo de selección por envolvente de Pareto), y se basa en un simulador de circuitos estándar (por ejemplo, Eldo, Spectre u otra versión de Spice) para hacer frente a la complejidad de los parámetros físicos del transistor MOS y la topología del circuito (Corme & Knowles, 2000). Parámetros del circuito, como tensiones de alimentación, las corrientes de polarización, anchura y longitud de transistores, son generados por el algoritmo genético y se pasan al simulador, donde se lleva a cabo el cálculo de los valores de aptitud. Por lo tanto, el diseñador puede cambiar ya sea el algoritmo de optimización o los modelos de simulación sin mucho esfuerzo.

La herramienta de optimización se aplicó en el diseño de varios OTA, con el fin de utilizarlos para diseñar una unidad de detección del ritmo cardíaco humano, incorporados comúnmente dentro de los marcapasos. Para esta unidad, se diseñaron filtros bicuadráticos y amplificadores utilizando varios OTA.

Características de los circuitos OTA

Los OTA son dispositivos que producen una salida de corriente a partir de una entrada diferencial de tensión. Su comportamiento ideal se caracteriza por una muy alta impedancia de entrada y de salida (infinitas), tal como se muestra en la figura 1. La función de transferencia del OTA se conoce como *transconductancia* y se denota como G_m .

La estructura del OTA está compuesta por dos etapas. La primera es un amplificador con entrada diferencial, la cual provee fluctuaciones de corriente como respuesta al voltaje de entrada (V^+ y V^-). La segunda etapa está compuesta por espejos de corriente que combinan estas fluctuaciones de corriente y las redirige hacia una única salida. La tecnología CMOS se utiliza ampliamente en el diseño de OTA debido a su bajo consumo de potencia, su

capacidad para desarrollar entradas diferenciales con impedancias infinitas (incluso a lazo abierto) y la posibilidad de alcanzar valores muy bajos de transconductancia.

Es importante mencionar que la transconductancia, en función de la entrada diferencial de tensión, no es lineal. Esto es ocasionado por las ecuaciones que describen a los transistores MOSFET en sus regiones de operación (Tsividis, 2002). Como la región de inversión débil está dominada por factores exponenciales y la región de inversión fuerte por factores cuadráticos, se recomienda lograr que los transistores del diseño funcionen en la zona de inversión moderada, pues ofrece el mejor compromiso entre amplitud de la zona linealizable y el consumo de potencia, acorde con Chacón (2009).

Para poder incrementar la linealidad del OTA existen mejoras que pueden ser utilizadas en el par diferencial (Krummenacher y Joehl, 1988, Nedungadi y Viswanathan, 1984). De ellas, una versión modificada del diseño de Krummenacher (1988) implementada por Chacón (2009) fue empleada en la arquitectura del OTA sujeto de ser optimizado. La estructura de entrada del OTA se presenta en la figura 2.

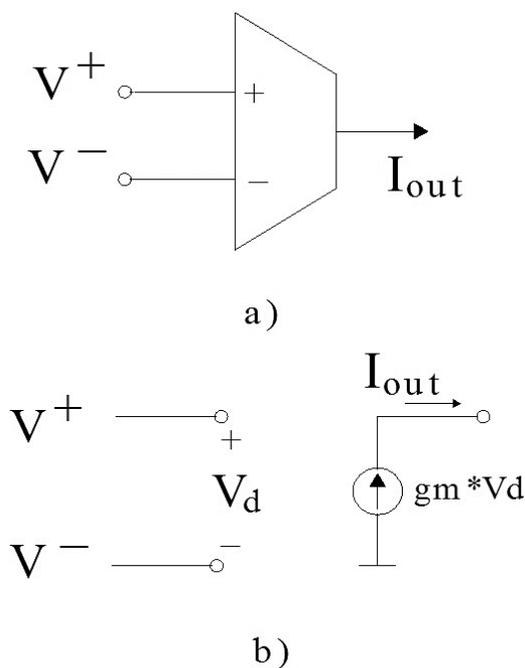


Figura 1. a) Representación de un OTA ideal. b) Circuito equivalente de pequeña señal. (Bracho, 2005)

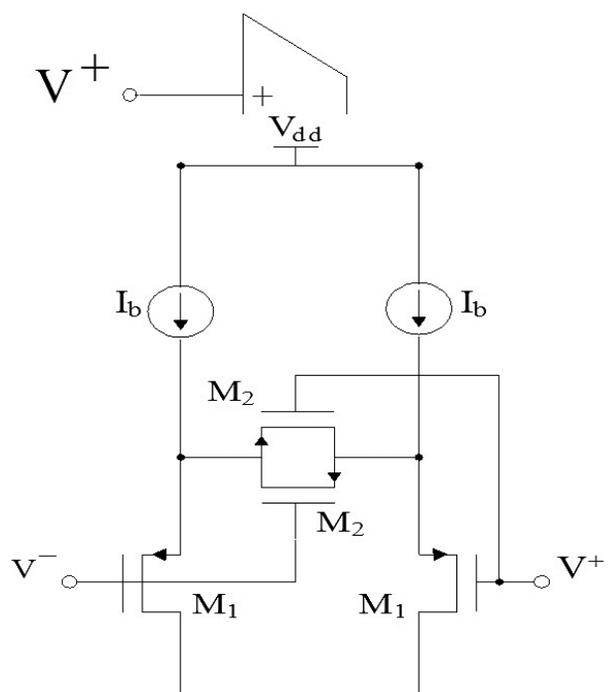


Figura 2. Etapa de entrada del OTA implementado.

La etapa de salida de corriente utiliza espejos para añadir las corrientes I^+ e I^- para obtener I_{out} . Arnaud (2004) muestra que el uso de espejos de corriente con arreglos serie-paralelo de transistores permite que la transconductancia se pueda escalar a valores más pequeños sin afectar su rango lineal y, a la vez, facilitando el trazado (*layout*) de los circuitos.

El circuito completo diseñado se muestra en la figura 3, en el que los transistores etiquetados como M_1 , M_3 y M_5 están formados por un arreglo de tres transistores unitarios conectados en serie, mientras que los transistores etiquetados M_2 son un arreglo de 18 transistores en conexión en serie también. Esto se hace con el fin de reducir los efectos de difusión lateral y mitigar los problemas de disparidad (*mismatch*) (Razavi, agosto 2000).

Los transistores M_1 se utilizan como el par de entrada diferencial; los transistores M_2 se llaman el difusor simétrico, que son responsables de la mejora de la respuesta lineal de la corriente de salida según explica Krummenacher (1988); los transistores M_3 forman los espejos de corriente que escalan la

transconductancia del circuito y los transistores M_5 se utilizan para copiar una de las ramas de corriente en el otro lado para obtener un dispositivo de terminación única. La transconductancia de salida G_m puede ser expresada, muy aproximadamente, por la siguiente ecuación:

$$G_m = \frac{g_{m1}}{m \left(1 + \frac{g_{m1}}{4g_{m2}} \right)} \quad (1)$$

donde m representa el factor de escala debido al espejo de corriente inferior; mientras g_{m1} y g_{m2} representan la transconductancia de los transistores M_1 y M_2 de la figura 3, respectivamente.

Otras ecuaciones comúnmente involucradas en diseño analógico CMOS calculado a mano se muestran en el siguiente conjunto (Tsividis, 2002, Chacón, 2009). Estas ecuaciones se derivan del modelo de EKV y se aplican a todas las regiones de operación de los transistores:

$$g_{mi} = \frac{I_{bi}}{m\phi_i} \frac{1}{f(x)} \quad (2)$$

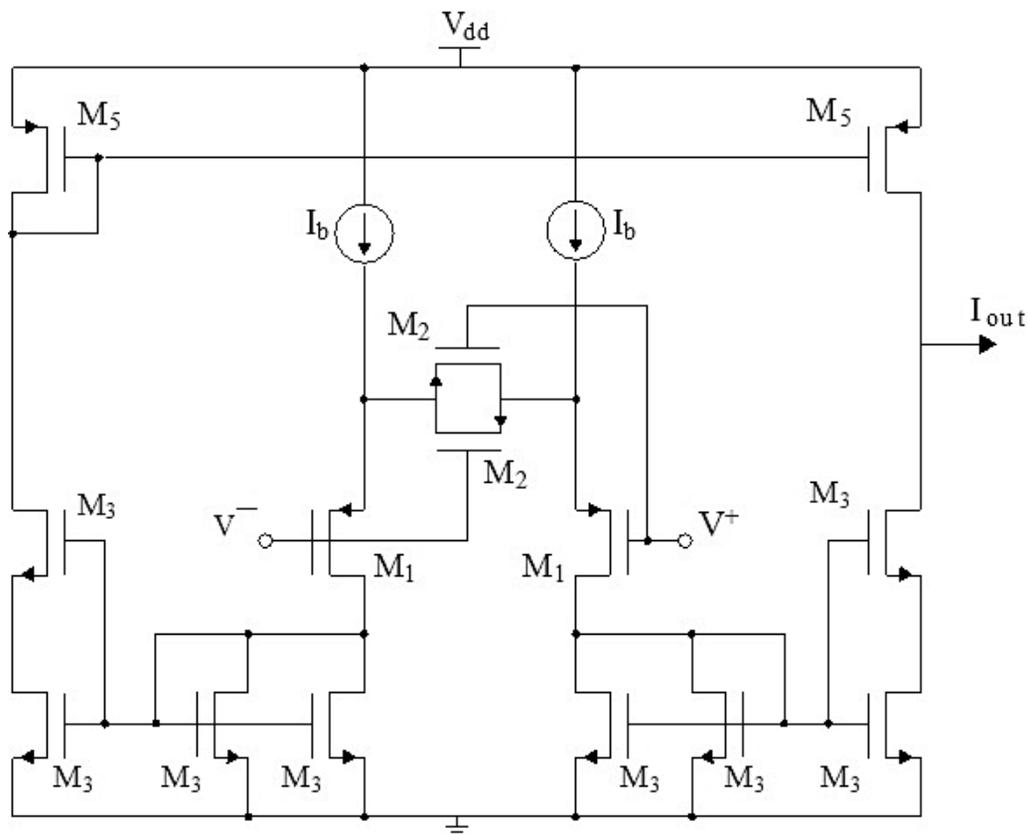


Figura 3. Esquema del circuito completo del OTA implementado.

$$f(x) = \sqrt{1 + 0.5\sqrt{x} + x} \quad (3)$$

$$x_i = \frac{I_{b_i}}{I_{z_i}} \quad (4)$$

$$I_{z_i} = 2 \frac{W_i}{L_i} C_{ox} n \phi_t^2 \quad (5)$$

donde I_{b_i} representa la corriente de polarización de CC mostrada en la figura 2, I_{z_i} es la corriente de normalización, μ , C_{ox} y n son parámetros de la tecnología de fabricación, W/L representa las dimensiones de los transistores y ϕ_t es el voltaje térmico. De las ecuaciones anteriores se puede observar que cuando el ingeniero ha de satisfacer requisitos específicos dentro de los objetivos, es necesario tener en cuenta muchos y diferentes parámetros durante el proceso de diseño. El procedimiento de diseño usual consiste en modificar algunos valores del circuito (como las dimensiones de los transistores) y, a continuación, ajustar el resto de los parámetros para cumplir los requisitos. Sin embargo, a veces este proceso tarda varias iteraciones de ensayos de prueba y error para optimizar los resultados.

La mayoría de las simulaciones y experimentos que se han ejecutado mostraron que el rango lineal ΔV es directamente dependiente de la corriente de polarización y de las dimensiones de los transistores M_1 y M_2 de la figura 3.

Filtros G_m -C: resumen y consideraciones sobre su slew rate

A. Filtros G_m -C

Los OTA se utilizan especialmente en filtros con constantes de tiempo muy grandes, que requieren alta resistencia o muy baja capacidad (Arnaud, abril 2004). El OTA presentado en la figura 3 se utilizó en el diseño de un filtro de primer orden, como el mostrado en la figura 4. El objetivo de este filtro es obtener una unidad básica y simple, que pueda ser replicada con el fin de implementar una estructura más compleja.

La función de transferencia del filtro es como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1 + s \frac{C}{G_m}} \quad (7)$$

y el polo donde se encuentra la frecuencia de corte se define como:

$$\omega_c = \frac{C}{G_m} \quad (8)$$

B. Razón de cambio de salida (Slew rate)

Otro parámetro importante en el diseño de filtros es su *slew rate*, ya que puede afectar al rendimiento real del ancho de banda del filtro. Se define como la máxima razón de cambio en el voltaje de salida que el filtro puede entregar. Si cualquier señal de entrada requiere una mayor tasa, entonces el filtro no será capaz de producir la respuesta de salida correcta. Esta razón (SR) para un filtro G_m -C se define como (Razavi, agosto 2000):

$$SR = \left. \frac{dV_o}{dt} \right|_{V_{o\max}} = \frac{I_{o\max}}{C} \quad (9)$$

La corriente de salida máxima posible se obtiene cuando ambos valores de I_b son dirigidos al nodo de salida. Estas corrientes pueden ser escaladas por los espejos también, así la ecuación (10) representa el cálculo de la velocidad de subida para el filtro que se muestra en la figura 4:

$$SR = \frac{2 * I_b}{m * C} \quad (10)$$

Combinando las ecuaciones (8) y (10) es posible definir la velocidad de respuesta en términos de variables de OTA y la frecuencia de corte f_c deseada.

C. Especificaciones de diseño

El diseño inicial del OTA utilizó transistores unitarios de $3\mu\text{m}/8\mu\text{m}$ para todo el circuito y una I_b de 26nA , con el fin de obtener una transconductancia de

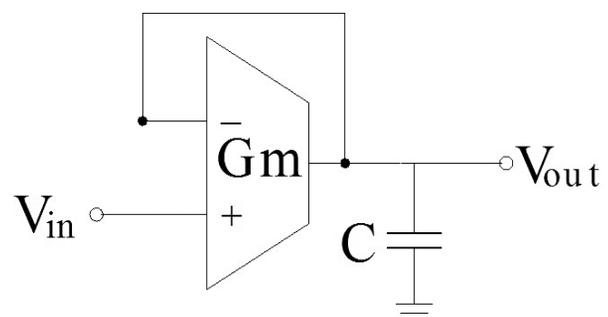


Figura 4. Esquema de un filtro G_m -C de primer orden

34nS. Con estos parámetros, los resultados obtenidos son los que se muestran en el cuadro 1.

Cuadro 1. Resultados de la simulación del OTA inicial.

Medida	Valor
Máximo G_m (nS)	36,57
Rango Lineal ΔV (mV)	± 260
Slew rate (mV/ μ s)	1,954
Consumo de Potencia (nW)	174,93
Capacitancia de Entrada (fF)	267,79

El objetivo de la herramienta era reducir el valor de transconductancia y la capacidad de entrada del OTA y al mismo tiempo aumentar el rango lineal al menos hasta ± 500 mV. El *slew rate* del circuito debe ser 2,75 mV/ μ s para el correcto funcionamiento del filtro en el que este OTA se aplicará. A fin de lograr esto, la herramienta de optimización ha trabajado con los siguientes parámetros del circuito: I_b , L_1 , L_2 , L_3 , L_5 , W_1 , W_2 , W_3 y W_5 . En la figura 5 se presenta el diagrama de bloques de la herramienta de optimización diseñada para resolver el problema en cuestión. Los objetivos impuestos al correr la herramienta fueron: a) aumentar el rango lineal y velocidad de respuesta, y b) disminuir tanto la capacidad de entrada como la transconductancia.

Algoritmos genéticos para la optimización multiobjetivo de circuitos

La función de aptitud agregada F para un circuito A con una parametrización u se define como:

$$F(A_u) = \Phi(f_1(A_u), f_2(A_u), \dots, f_n(A_u)) \quad (12)$$

donde cada función de aptitud individual $f_i(A_u)$ se define como monótonamente creciente con la aptitud que describe el comportamiento del circuito. En otras palabras, el algoritmo genético optimiza los parámetros de aptitud buscando el valor más alto posible para cada uno de ellos. Así que para este caso era necesario que el rango lineal y la velocidad de subida fueran tan altos como fuese posible, y por lo tanto sus valores de aptitud respectivos resultaron directamente proporcionales. Por el contrario, la capacidad de entrada y la transconductancia debían ser lo más bajos posibles, y por lo tanto sus valores de aptitud resultaron inversamente proporcionales. Las funciones f_i abarcan un espacio de aptitud multidimensional, donde cada punto representa el rendimiento de un circuito parametrizado con un punto u en el espacio de parámetros.

La forma general de Φ se supone desconocida, pero tiene que aumentar monótonamente con valores crecientes de todas las funciones de aptitud f_i . Esta condición garantiza que un punto en el espacio de aptitudes puede ser considerado más apto que todos los demás puntos cuyos valores sean menores en todas las dimensiones. En la figura 6, por ejemplo,

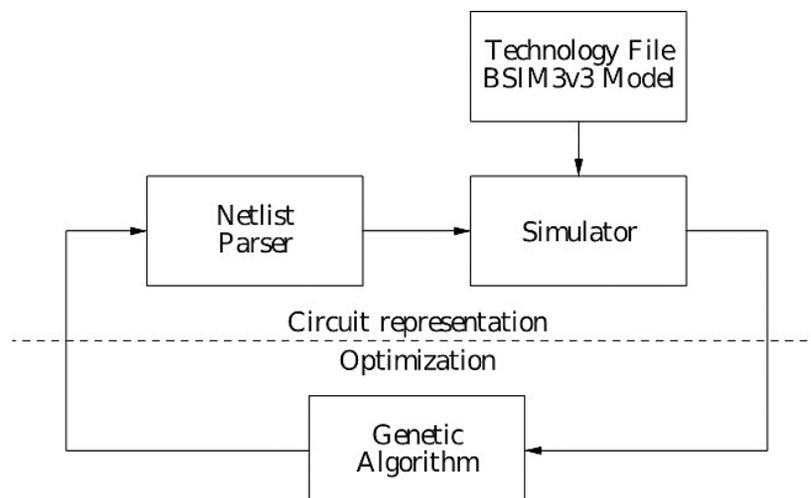


Figura 5. Herramienta de optimización basada en algoritmos genéticos.

el punto q_1 es más apto que el punto q_4 y todos los otros elementos dentro del rectángulo gris. En este contexto, el punto q_1 se dice que domina a q_4 . Todos los puntos no dominados en un conjunto definen el frente de Pareto de ese conjunto. En el ejemplo de la figura 6 este frente está definido por los puntos q_1, q_2 y q_3 . Elegir una parametrización que no está en el frente es siempre una mala elección, ya que hay otro punto en el frente con una mejor aptitud agregada. Los conceptos anteriores se pueden expresar matemáticamente mediante la ecuación siguiente:

$$\hat{P} = \left\{ u \in P_A, f(A_u) \mid \neg \exists v \in P_A : f(A_v) \succ f(A_u) \right\} \quad (13)$$

donde \hat{P} es el frente Pareto, f es el vector de funciones de aptitud $[f_1, \dots, f_n]^T$ y P_A es el espacio de parámetros del circuito A. La relación de orden parcial " \succ " en f describe la propiedad de dominación definida como:

$$f(A_v) \succ f(A_u) \Leftrightarrow \forall_i : f_i(A_v) \geq f_i(A_u) \wedge \exists_i : f_i(A_v) > f_i(A_u) \quad (14)$$

El proceso de evaluación puede por lo tanto ser considerado como un proceso de mapeo que transforma el espacio de parámetros válido P_A en una región conectada en el espacio de *fitness* $[f_1, \dots, f_n]^T$. El frente de Pareto es la frontera de esta región delimitada por los óptimos parciales (Müller-Gritschneider, junio 2009). Cualquier algoritmo que encuentra el frente de Pareto para un conjunto de puntos de forma física implementa las ecuaciones

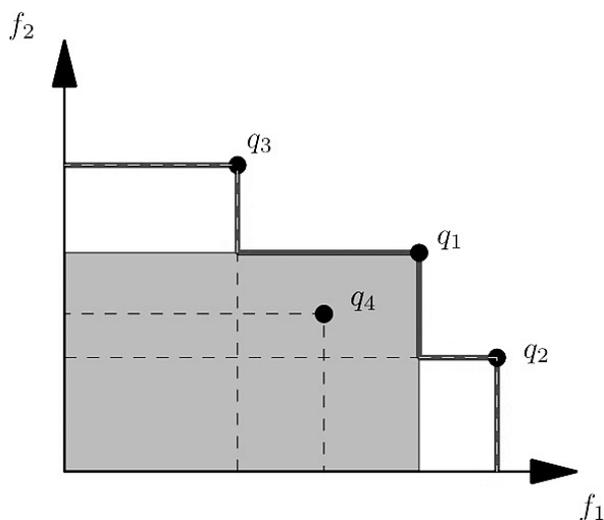


Figura 6. Frente de Pareto.

(13) y (14). Dado que el espacio de parámetros P_A generalmente contiene un número infinito de parametrizaciones, el siguiente problema consiste en la elección de un conjunto representativo de muestras de P_A , de tal manera que su frente de Pareto puede suponerse que es una aproximación fiable del frente correspondiente al espacio de diseño completo. Un enfoque ingenuo sería muestrear periódicamente los valores de cada parámetro, dado que el número de evaluaciones necesarias aumentará exponencialmente con el número de parámetros. Por ejemplo, un circuito con siete parámetros (variables de diseño), cada uno muestreado cinco veces, requeriría $5^7 = 78,125$ evaluaciones. Para evitar esta búsqueda por fuerza bruta de parámetros, se emplea el algoritmo evolutivo multiobjetivo PESA. Este enfoque genético suprime el cálculo de parametrizaciones inútiles y se concentra en el análisis de aquellas regiones del espacio de parámetros que proporcionan resultados prometedores. Incluso si este algoritmo también discretiza el espacio de parámetros, a través de una representación numérica con un número finito de bits, la resolución utilizada para cada parámetro puede ser tan alta como sea necesaria, sin la amenaza de una explosión exponencial del espacio de búsqueda. El número de evaluaciones requeridas es entonces proporcional al número de bits utilizados para representar una parametrización.

Resultados

La figura 7 muestra el frente de Pareto tridimensional del OTA previamente mostrado. Este frente contiene 1500 elementos (parametrizaciones) y fue generado por el algoritmo genético PESA. El gráfico muestra el compromiso entre las tres funciones de aptitud, donde el tratar de maximizar una de ellas, implica disminuir las otras.

El cuadro 2 contiene una lista de algunos de los resultados seleccionados dados por la herramienta de optimización. Estos resultados contienen casos con amplio rango lineal, transconductancias bajas y capacitancias bajas. La condición de óptimo *slew rate* se logra con bajos valores de G_m .

La figura 8 presenta los resultados de la simulación para el mejor de los casos que se encontró en esta corrida. La figura muestra la respuesta de corriente de salida para un barrido de tensión de entrada de $-1V$ a $+1V$.

El cuadro 3 muestra una comparación de las simulaciones obtenidas para el caso del mejor OTA y el OTA inicial. Cuando se reduce la transconductancia, por ende se reduce el tamaño de los capacitores (para mantener el polo en el mismo lugar), produciendo una reducción del área del circuito. Todas las otras especificaciones de diseño también fueron

mejoradas: se redujeron la capacidad de entrada y el consumo de energía, mientras que el intervalo lineal y la velocidad de respuesta se han mejorado en gran medida. Finalmente, el cuadro 4 contiene las dimensiones de los transistores unitarios propuestos como resultado de correr la herramienta de optimización.

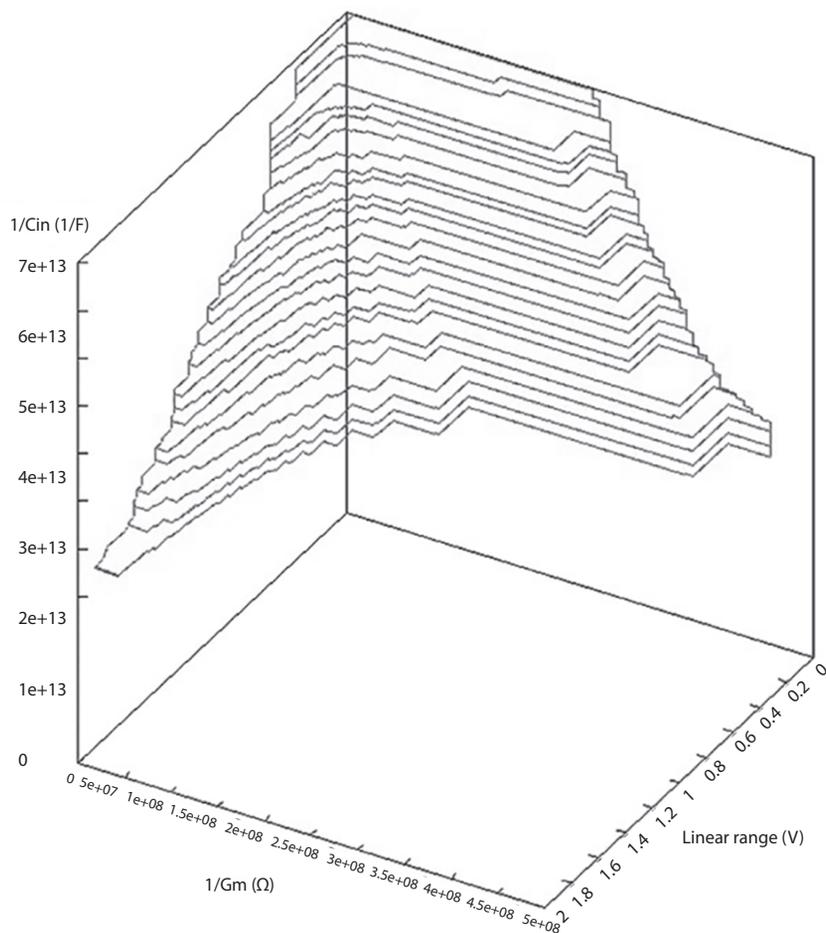


Figura 7. Frente de Pareto del OTA diseñado. El gráfico contiene tres aptitudes: capacidad de entrada, transconductancia y rango de tensión lineal.

Cuadro 2. Datos representativos dados por la herramienta de optimización.

G_m (nS)	ΔV (mV)	C_{in} (fF)	Slew rate (mV/ μ s)	I_b (nA)
33,55	± 949	235,58	2,131	87,226
40,90	± 581	86,35	1,748	64,871
44,80	± 624	93,40	2,054	52,097
28,90	± 549	94,63	2,473	39,323
18,0	± 504	85,74	3,971	26,548
16,55	± 506	88,64	4,319	20,161

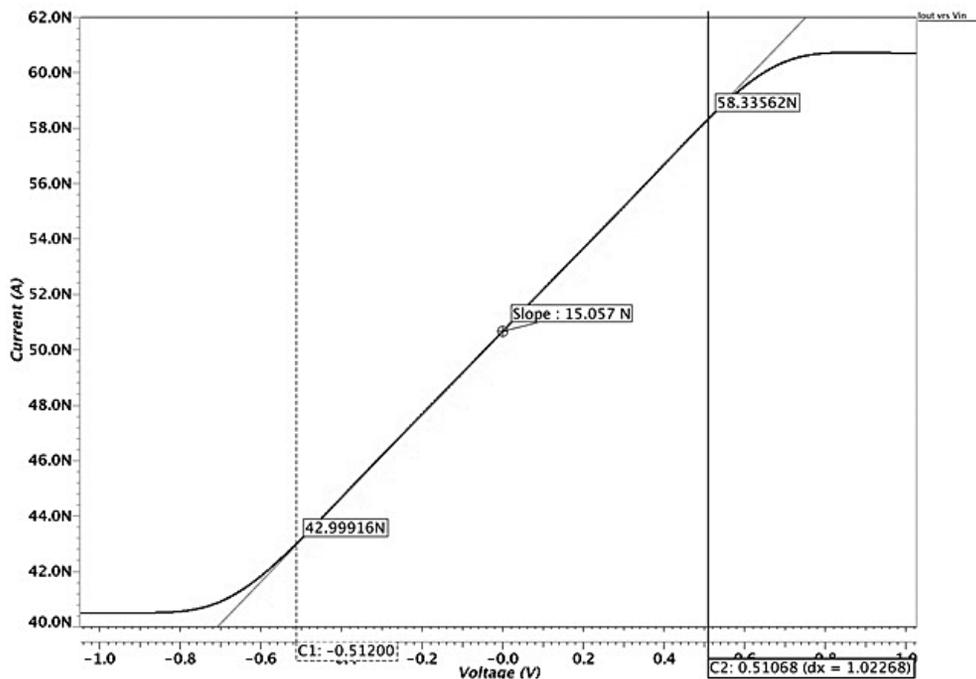


Figura 8. Curva de corriente de salida como una función de la tensión de entrada. La pendiente de esta curva da la transconductancia del circuito.

Cuadro 3. Resultados de la simulación del mejor OTA obtenido.

Medida	Mejor OTA	OTA Inicial
Máximo G_m (nS)	15,077	36,57
Rango Lineal ΔV (mV)	± 512	± 260
Slew rate (mV/ μ s)	3,676	1,954
Consumo de Potencia (nW)	144,3	174,93
Capacitancia de Entrada (fF)	89,63	267,79

Cuadro 4. Dimensiones de transistores unitarios del mejor OTA encontrado.

Parámetro	Valor
L_1 (μ m)	7,2
L_2 (μ m)	8
L_3 (μ m)	2,1
L_5 (μ m)	2,1
W_1 (μ m)	1,5
W_2 (μ m)	1,5
W_3 (μ m)	5,1
W_5 (μ m)	5,1

Conclusiones

Este trabajo presenta la aplicación de una estrategia automatizada con optimización multiobjetivo para diseñar y mejorar un circuito de OTA. La herramienta EDA (Electronic Design Automation) está destinada a ayudar en la puesta a punto del circuito y el proceso de mejora a través de la generación de parametrizaciones optimizadas.

Este mecanismo no solo reduce en gran medida el tiempo necesario para diseñar y simular este tipo de circuito sino que también permite una solución óptima. El diseño basado en cálculo a mano se queda atrás frente a estas ventajas, aun con menor precisión que las herramientas automatizadas. Sin embargo, los criterios de selección del mejor de los casos sigue siendo trabajo del diseñador, ya que el frente de Pareto ofrece un mapa de puntos optimizados.

Una comparación entre los valores del cuadro 3 muestra cómo la herramienta EDA efectivamente ha mejorado el funcionamiento del circuito en cada aspecto que se pretende conseguir:

Bibliografía

- Arnaud, A. (abril 2004). *Very large time constant gm-c filters*. (Tesis Doctoral). Instituto de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.
- Baru, M. (2009). Analog design methodologies when every nanoampere counts. En: *CMOS ET Workshop Vancouver*.
- Bracho, S. (2005). Amp.operacionales de transconductancia. Recuperado de: <http://www.teisa.unican.es/teisa/classes/docencia/bracho/1685/AmpOp.pdf>
- Chacón, A. (2009). *Circuitos integrados de bajo consumo para detección y localización de disparos de armas de fuego*. (Tesis doctoral). Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Electrónica, Universidad Mar del Plata, Mar del Plata, Argentina.
- Corne, D. & Knowles, J. (2000). The pareto envelope-based selection algorithm for multiobjective optimization. En: *PPSN VI: Proceedings of the International Conference on Parallel Problem Solving from Nature*, 839-848.
- Hassan, H., Anis, M. & Elmasry, M. (2005). MOS current mode circuits: analysis, design, and variability. *IEEE Trans. VLSI Syst.* 13(8): 885-898.
- Krummenacher, F. & Joehl, N. (1988). A 4-mhz cmos continuous-time filter with on-chip automatic tuning. *IEEE J. Solid-State Circuits* 23(3): 750-758.
- MacEachern, L.A. (1999). Constrained circuit optimization via library table genetic algorithms. En: *Proc. IEEE Int. Symp. Circuits and Systems ISCAS '99*, 6, 310-313.
- Müller-Gritschneider, D. (junio 2009). Deterministic performance space exploration of analog integrated circuits considering process variations and operating conditions. (Tesis doctoral). Technical University Munich, Munich, Alemania.
- Nedungadi, A. & Viswanathan, T. (1984). Design of linear cmos transconductance elements. *IEEE Trans. Circuits Syst.* 31(10): 891-894.
- Razavi, B. (agosto 2000). *Design of Analog CMOS Integrated Circuits*. 1a. ed. McGraw-Hill Science/Engineering/Math.
- Tsividis, Y., Czarnul, Z. & Fang, S.C. (1986). MOS transconductors and integrators with high linearity. *Electronics Letters* 22(5): 245-246.
- Tsividis, Y. (2002). *Mixed Analog-Digital VLSI Devices and Technology*. Columbia University, USA: World Scientific Publishing.

Evaluación de la velocidad de corrosión del acero al carbono mediante técnicas electroquímicas

Corrosion rate evaluation of the carbon steel through electrochemical techniques

*Jeimmy González-Masís¹
Luis Garita-Arce²*

*Fecha de recepción: 18 de Julio del 2013
Fecha de aprobación: 15 de agosto del 2013*

González-Masís, J; Garita-Arce, L. Evaluación de la velocidad de corrosión del acero al carbono mediante técnicas electroquímicas. *Tecnología en Marcha*. Vol. 27, N° 1. Pág 13-22

- 1 Licenciada en Ingeniería de los Materiales del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Teléfono: 8652-1215. Correo electrónico: jeimygonz@yahoo.com. Investigadora en el Centro de Investigación en Corrosión (CICorr) del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). Costa Rica.
- 2 Licenciado en Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica. Teléfono: (506) 2297-4020. Correo electrónico: lgaritaar@ice.go.cr. Investigador en el Centro de Investigación en Corrosión (CICorr) del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). Costa Rica.

Palabras clave

Ruido electroquímico (RE); resistencia a la polarización lineal (RPL); monitor electroquímico de corrosión atmosférica (MECA); humedad relativa crítica.

Resumen

Usualmente los estudios de corrosión atmosférica se caracterizan por su larga duración, meses e incluso años. Sin embargo, se han desarrollado las técnicas electroquímicas, recientes en comparación con otros métodos y que permiten obtener datos en tiempo real, incluyendo velocidad de corrosión. En esta investigación se valoran los ensayos de ruido electroquímico y resistencia a la polarización lineal, de manera que se analizaron los datos obtenidos, se establecieron relaciones entre la forma de los gráficos y el tipo de corrosión, así como la relación entre los datos de corrosión y las condiciones atmosféricas para hallar, finalmente, que existe un comportamiento más acorde cuando se utiliza el ensayo de resistencia a la polarización lineal con el monitor electroquímico tres electrodos tipo peineta.

Key words

Electrochemical noise (EN); lineal polarization resistance (LPR); electrochemical monitor of atmospheric corrosion; critical relative humidity.

Abstract

Usually the atmospheric corrosion studies are characterized by their long duration, months and even years. However electrochemical techniques have been developed, recent in comparison to other methods, allowing obtain real-time data, including corrosion rate. In this research electrochemical noise and lineal polarization resistance tests are valued, so obtained data were analyzed, relations were established between the graphics form and the corrosion type, as well as the relationship between the corrosion data and atmospheric conditions, to find, finally, there is a more consistent behavior when the lineal polarization resistance test is used with the three comb-type electrodes electrochemical monitor.

Introducción

El mecanismo de corrosión atmosférica es de naturaleza electroquímica, donde tienen lugar dos reacciones que ocurren en lugares distintos: ánodos y cátodos locales. El circuito eléctrico se complementa por el movimiento de aniones y cationes en el electrolito (medio líquido conductor).

El espesor de ese electrolito o capa de humedad juega un papel muy importante, en tanto que para espesores menores que 10µm las velocidades de corrosión son prácticamente despreciables, conforme crece el espesor de la película, aumenta la velocidad de corrosión hasta un punto máximo, aproximadamente 100µm. Para espesores mayores la velocidad de corrosión más bien disminuye porque el acceso del oxígeno desde la atmósfera hasta la superficie se dificulta (Otero, 2001).

En esta investigación se pretende evaluar la velocidad de corrosión del acero al carbono ASTM A36, aplicando las técnicas ruido electroquímico (RE) y

resistencia a la polarización lineal (RPL), mediante diferentes monitores electroquímicos expuestos en condiciones de humedad relativa y temperatura del laboratorio.

El ensayo de ruido electroquímico estudia las variaciones espontáneas en corriente y voltaje (conocidas como ruido) producidas por micropilas que se forman sobre la superficie del metal, y que preceden a la reacción electroquímica durante el proceso de corrosión (Arriaga, R., Malo, J., Tres, G., y Uruchurtu, J., 2001), por tanto no se requiere perturbar el sistema. El ensayo de resistencia a la polarización lineal, por su parte, consiste en aplicar un sobrepotencial respecto al potencial de equilibrio, para percibir la respuesta del electrodo frente a las reacciones de oxidación y de reducción en estas condiciones, y así conocer la evolución de la corrosión en el tiempo, haciendo uso de la ecuación Stern-Geary:

$$i_{\text{corr}} = \frac{b_a \cdot b_c}{R_p \cdot 2.3(b_a + b_c)}$$

donde:

i_{corr} : densidad de corriente de corrosión

R_p : resistencia a la polarización

b_a, b_c : constantes de Tafel, (constantes empíricas para el metal)

Para realizar estas mediciones, se requieren unos dispositivos denominados monitores electroquímicos de corrosión atmosférica (MECA), que pueden tener diferentes configuraciones, entre ellas se encuentran las probetas de tres electrodos idénticos y tres electrodos tipo peineta. Ambas poseen tres láminas de acero separadas entre sí por un aislante, una de las láminas (central) no se polariza y funciona como electrodo de referencia, las otras dos funcionan como electrodos de trabajo. La diferencia fundamental entre estos monitores es la forma y disposición de las láminas con que son construidos (figura 1).

Además estos MECA requieren de una capa de humedad en su superficie, que funcione como electrolito. Esto es indispensable principalmente cuando la humedad relativa atmosférica es muy baja, ya que para ciertos valores (según sea el metal) la velocidad de corrosión puede resultar casi despreciable (Otero, 2001). A estos valores de humedad se les conoce como humedad relativa crítica. En el caso del acero por ejemplo, se puede considerar un valor de 60% (Genescá, Salvador, Mariaca, y Uruchurtu, 1999). Por eso es necesario utilizar sustancias activadoras, que mantengan una capa de electrolito sobre la superficie y aseguren el cierre del circuito que se forma bajo cualquier condición de humedad; entre las más comunes están el hidróxido de sodio y el hidróxido de potasio, sustancias higroscópicas y corrosivas.

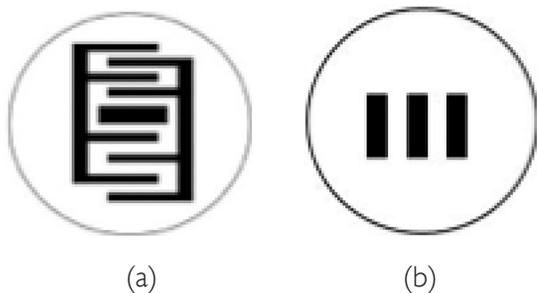


Figura 1. (a) Configuración del MECA tres electrodos tipo idénticos. (b) Configuración del MECA tres electrodos idénticos.

Materiales y métodos

Para emplear las técnicas electroquímicas RPL y RE, se construyeron dos monitores electroquímicos de configuraciones distintas: uno de tres electrodos tipo peineta y otro de tres electrodos idénticos. Se montaron tres pequeñas láminas de acero al carbono ASTM A36 separadas entre sí por un material aislante, y embebidas en una resina poliéster; en donde una cara de los electrodos se dejó expuesta al ambiente. La mezcla de la resina y las placas se depositaron en un molde y se dejaron secar durante seis horas. De esta manera, el monitor de tres electrodos idénticos resultó con un área de aproximadamente $0,33 \text{ cm}^2$, y el área del monitor de tres electrodos tipo peineta fue $3,69 \text{ cm}^2$.

Una vez listos, los monitores se lijaron y se limpiaron; posteriormente se activaron en dos ocasiones, dejándolos reposar inmersos en una solución alcalina de $0,1 \text{ M}$ de hidróxido de sodio, a una temperatura de 80°C sin agitación para la primera activación, y entre 85°C y 90°C con agitación para la segunda activación, y se dejaron secar por un lapso de aproximadamente dos horas, previo a la realización de los ensayos.

A partir de ahí se ejecutaron las pruebas de manera continua, realizando un análisis mediante inspección directa de los registros experimentales, para detener las pruebas en el momento en que se observe un comportamiento atípico. Se utilizó un potenciostato galvanostato de la marca ACM Instruments, Field Machine y se registraron los datos de temperatura y humedad relativa con un termohigrómetro.

Para la técnica de resistencia de polarización lineal se empleó un barrido de potencial desde los -20mV hasta 20mV , con respecto al potencial de circuito abierto, con una velocidad de barrido de 10mV por minuto, mientras que para el ensayo de ruido electroquímico se registraron los datos cada segundo, con un total de 1024 lecturas en cada prueba.

Resultados y discusión

Esta sección se divide en dos partes, tomando en cuenta que se realizaron dos activaciones hidrofílicas en total: primera corrida y segunda corrida de datos.

Primera corrida de datos

Los primeros ensayos de ruido electroquímico muestran comportamientos distintos entre las pro-

betas, al analizar el trazo de la figura 2 se puede apreciar la pequeña amplitud de las fluctuaciones, lo cual se relaciona con el comportamiento de los sistemas pasivos, según el análisis propuesto por Aballe et al. (2002); el monitor tres electrodos idénticos, por el contrario, muestra tránsitos con mayores variaciones (figura 3), por tanto se puede asociar estos gráficos con fenómenos de corrosión localizada.

En cuanto a los primeros ensayos de resistencia a la polarización lineal, los gráficos también son muy distintos. Para el MECA tres electrodos tipo peineta, la corriente aumenta casi proporcionalmente con el potencial (figura 4), lo que se aproxima a una curva

teórica para el ensayo de RPL, pues tal como indican Corte y Peña (2010), la línea recta es ideal. Por el contrario, para el MECA tres electrodos idénticos la corriente y el potencial aplicado no varían conjuntamente, esto podría deberse a que el sobrepotencial es mucho mayor al potencial de equilibrio, tal como menciona Corte y Peña (2010).

La última prueba realizada con el MECA tres electrodos tipo peineta fue RPL (figura 5), luego de aproximadamente 58 horas de haber realizado el primer ensayo. A partir de esta no se realizaron más corridas, debido al comportamiento atípico de la

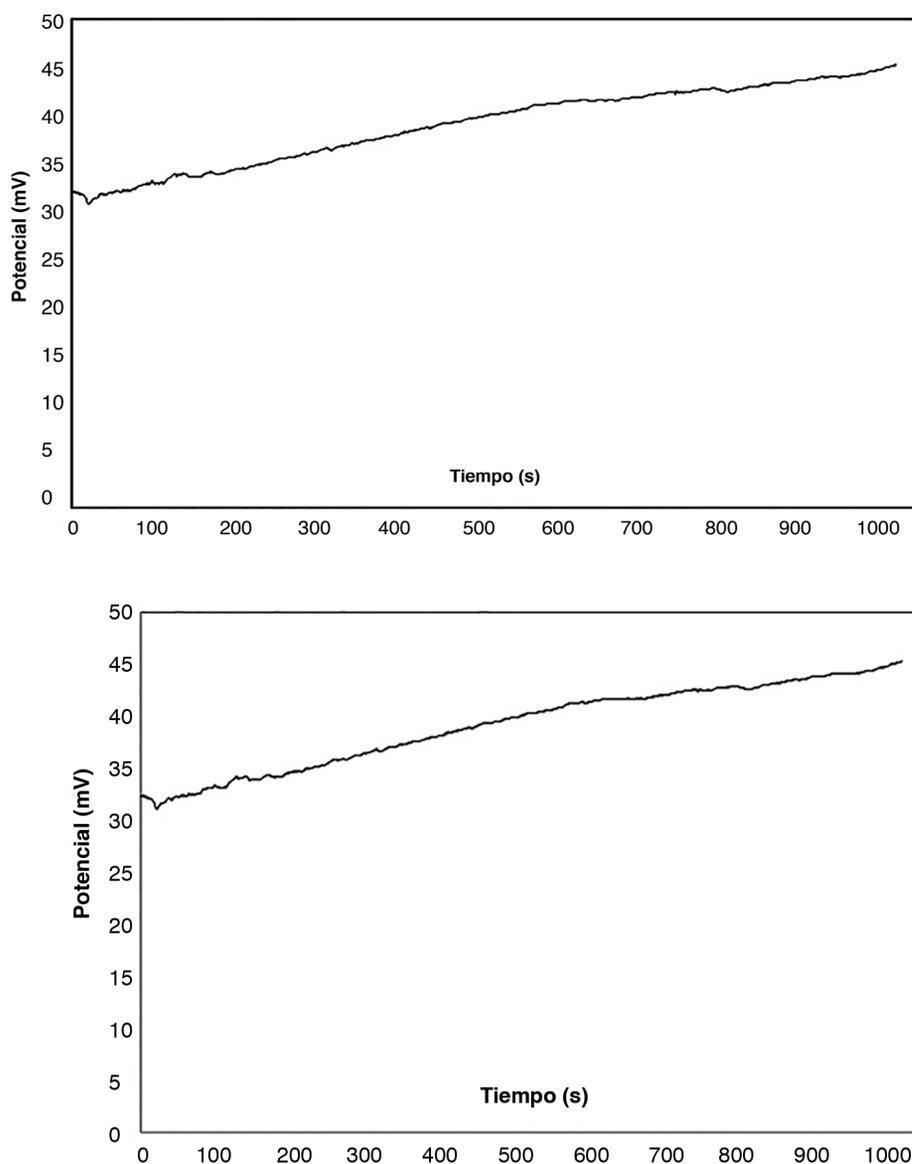


Figura 2. Registro de corriente y voltaje en el tiempo, ensayo RE para el MECA tres electrodos tipo peineta.

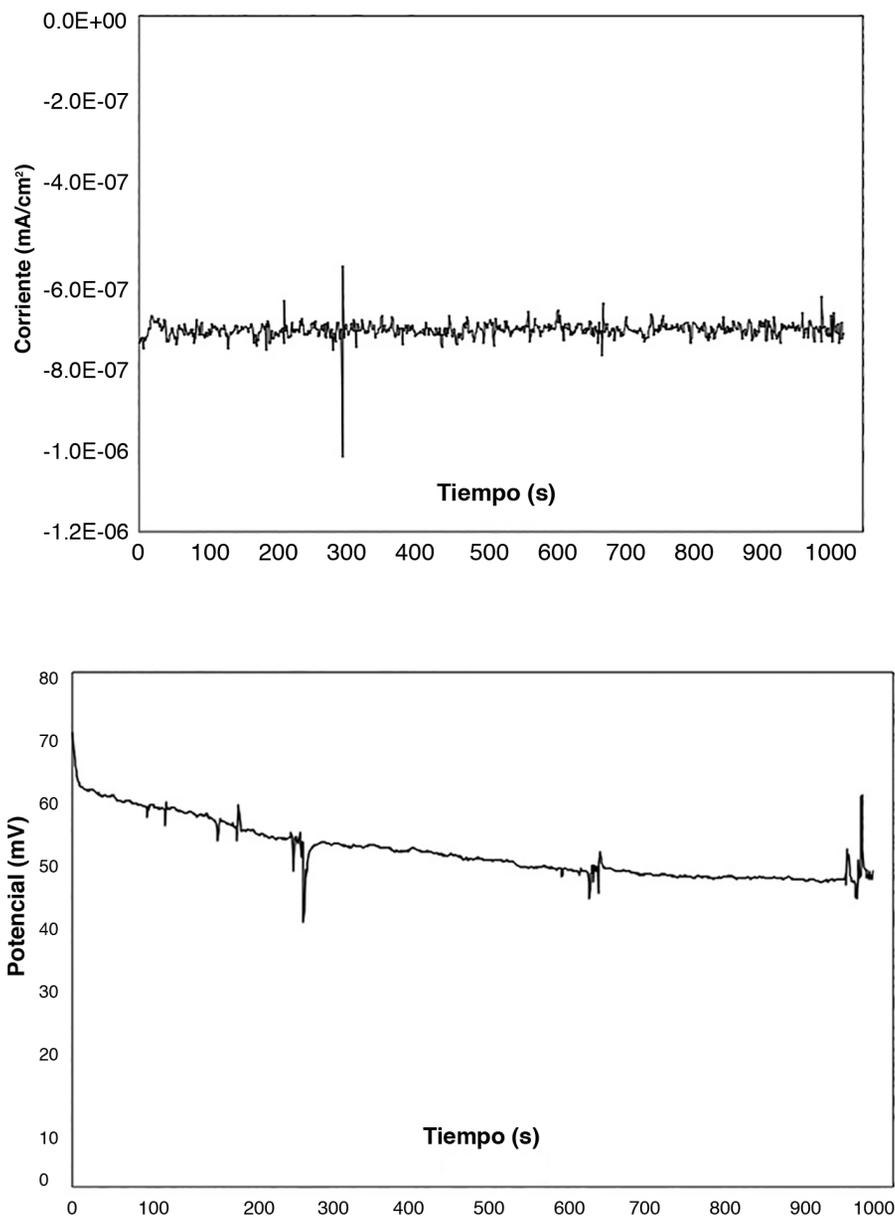


Figura 3. Registro de corriente y voltaje en el tiempo, ensayo RE para el MECA tres electrodos idénticos.

curva. Se lograron realizar 22 ensayos en total con este monitor; más eficiente si se compara con el monitor tres electrodos idénticos, con el que sólo se lograron realizar 17 ensayos durante 50 horas aproximadamente.

En cuanto a las condiciones atmosféricas, es importante resaltar, a partir de las figuras 6 y 7, que el valor de resistencia de polarización (R_p) y de resistencia al ruido (R_n), tienden a variar con los cambios de humedad relativa, de manera que cuando ésta dis-

minuye, las resistencias aumentan y simultáneamente disminuye la velocidad de corrosión.

De esta manera, en el gráfico de la figura 6 se observa, aproximadamente a las 18 horas, el mayor valor de humedad relativa registrada en la serie de datos (66%) y el valor de resistencia a la polarización lineal más bajo; a ese mismo punto corresponde, en el gráfico de la figura 8, la mayor velocidad de corrosión registrada. En esa misma figura también se puede apreciar una disminución en la velocidad de corrosión, según la línea de tendencia.

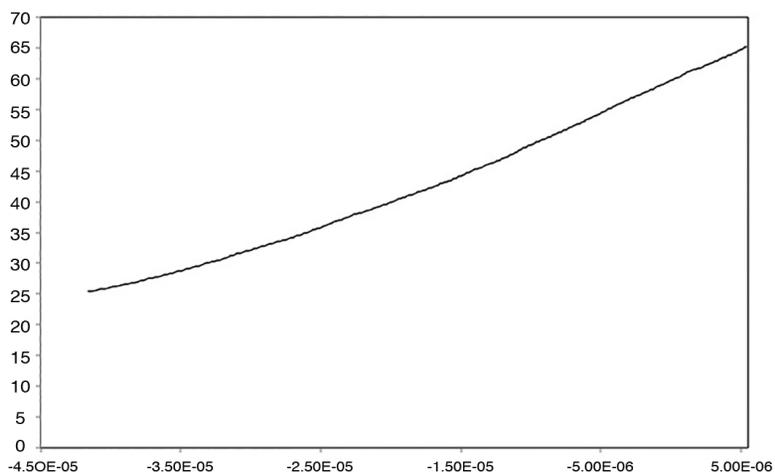


Figura 4. Curva generada en el ensayo RPL para el MECA tres electrodos tipo peineta.

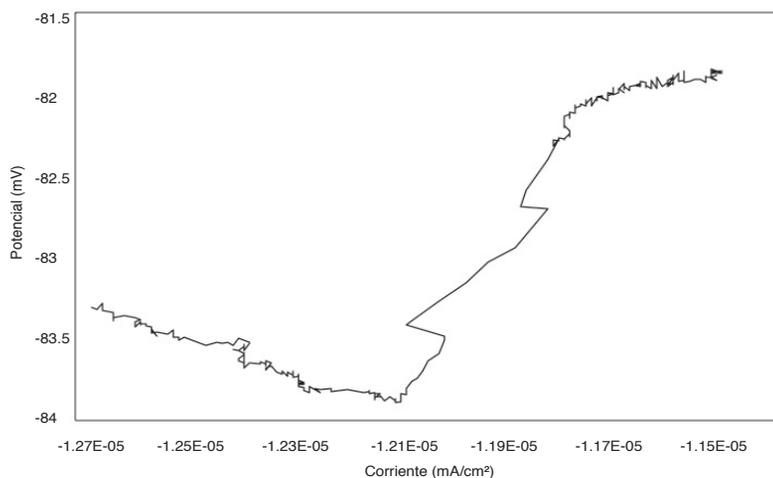


Figura 5. Curva generada en el ensayo RPL para el MECA tres electrodos tipo peineta.

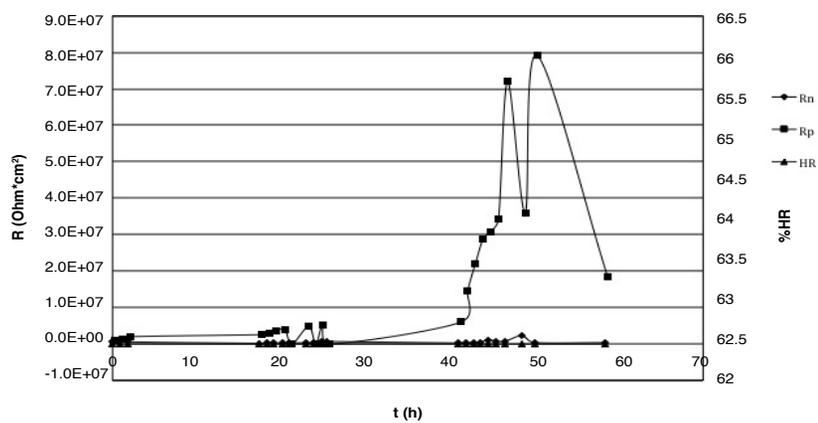


Figura 6. Resistencia de polarización, resistencia al ruido y humedad relativa con respecto al tiempo para el MECA tres electrodos tipo peineta.

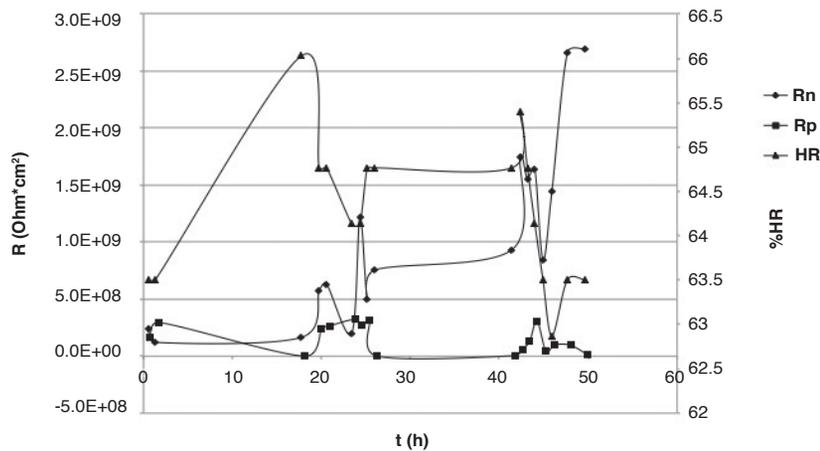


Figura 7. Resistencia de polarización, resistencia al ruido y humedad relativa con respecto al tiempo para el MECA tres electrodos idénticos.

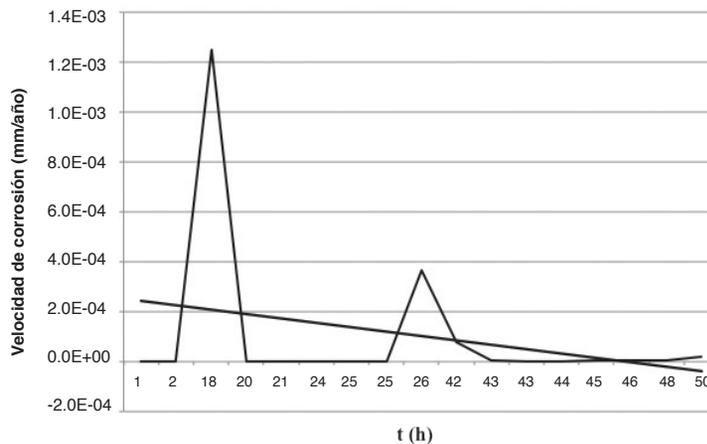


Figura 8. Velocidad de corrosión en el tiempo para el MECA tres electrodos idénticos, ensayo de RPL.

Segunda corrida de datos

Los ensayos iniciales de RE demuestran que en ambas probetas podrían tener lugar fenómenos de corrosión localizada, debido a que las variaciones son pequeñas, pero perceptibles.

En cuanto a los ensayos de RPL es importante hacer notar que para las pruebas iniciales luego de la segunda activación, se obtuvieron resultados que se encuentran dentro de los parámetros típicos, a diferencia de los eventos mostrados en los gráficos de los últimos ensayos de la primera corrida de datos, tal como se observa al comparar las figuras 5 (correspondiente a la primera activación) y 9, lo cual hace suponer que ya la probeta había perdido

el carácter hidrofílico hacia el final de esa primera corrida.

La probeta de tres electrodos idénticos fue la primera en presentar alteraciones evidentes en los curvas de los distintos gráficos, sobretodo de los ensayos de RPL, por eso se realizaron tan sólo 32 ensayos con este monitor; mientras que con el MECA tres electrodos tipo peineta se realizaron 100 ensayos.

En la figura 10, para la última prueba de RPL, el comportamiento atípico del MECA nuevamente se puede relacionar con la pérdida de su carácter hidrofílico.

Parece ser que la segunda activación de las probetas fue más exitosa que la primera porque con la primera activación sólo se pudieron realizar ensayos

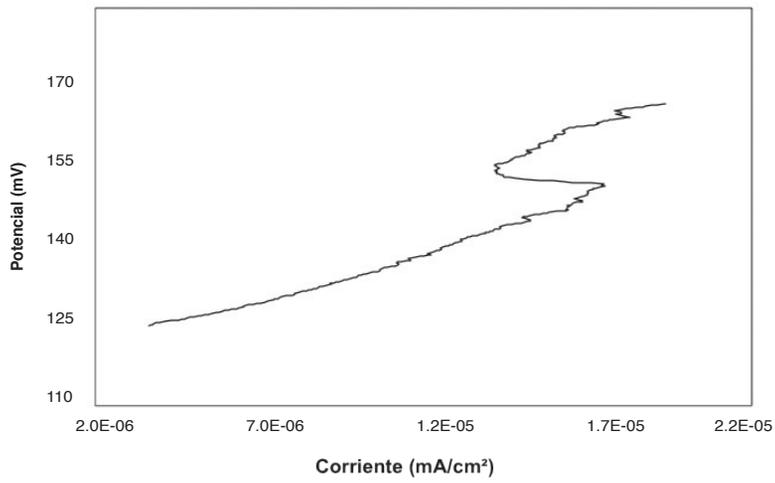


Figura 9. Curva generada en el ensayo RPL para el MECA tres electrodos tipo peineta.

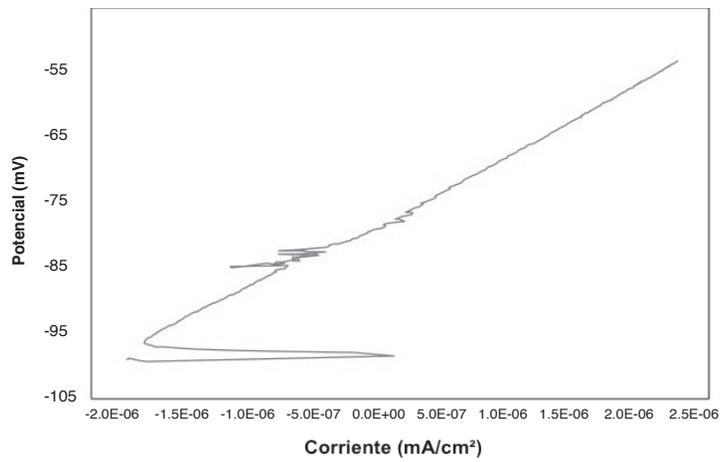


Figura 10. Curva generada en el ensayo de RPL para el MECA tres electrodos tipo peineta.

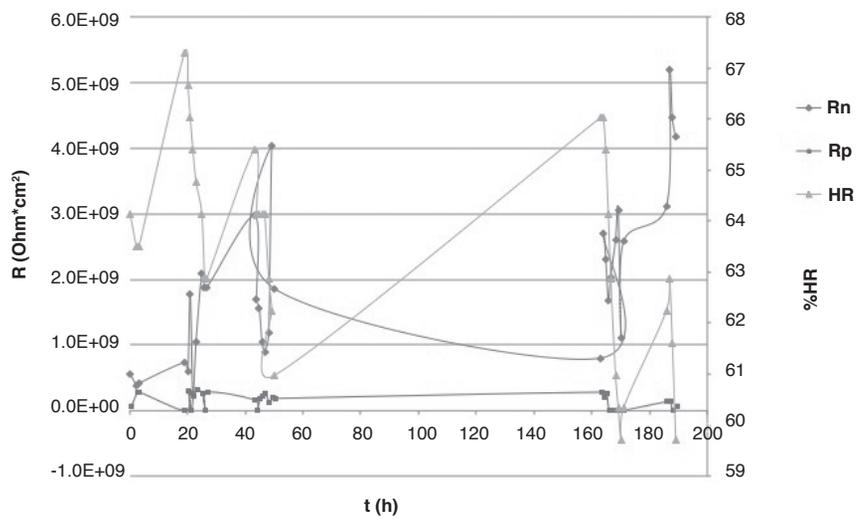


Figura 11. Resistencia a la polarización, resistencia al ruido y humedad relativa con respecto al tiempo para el MECA tres electrodos idénticos.

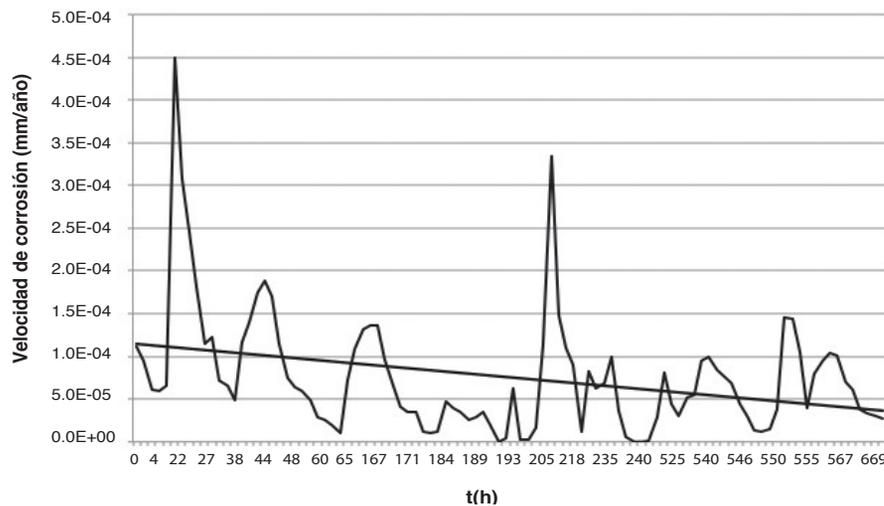


Figura 12. Velocidad de corrosión en el tiempo para el MECA tres electrodos peinetas, ensayo de RPL.

durante un máximo de 58 horas aproximadamente, mientras que para la segunda activación se realizó pruebas durante casi 672 horas. Entre los motivos que pudieron haber influido para que esto sucediera, se encuentran las condiciones de activación, ya que la temperatura de activación se aumentó de 5 a 10 °C para la segunda ocasión, y se efectuó una agitación continua de la sustancia.

Al analizar las condiciones atmosféricas, un aspecto importante a resaltar es que, tal como en la primera activación, los gráficos reflejan la tendencia de mayor afinidad entre la probeta de tres electrodos tipo peinetas y el ensayo de RPL, pues los datos de resistencia a la polarización (R_p) son los que sufren mayores variaciones durante esta prueba, de manera análoga, para el MECA de tres electrodos idénticos, la resistencia al ruido (R_n) es la que sufre mayores variaciones en relación con R_p . Esta tendencia se puede observar en el gráfico de la figura 11 (y figuras 6 y 7 para la primera corrida).

Además, nuevamente se demuestra que conforme la humedad relativa aumenta, la resistencia (sea R_p o R_n) disminuye, y por ende la velocidad de corrosión aumenta.

Al trazar líneas de tendencia central en los gráficos de distintas pruebas para ambos MECA, se observa que existe una ligera disminución en la tasa de corrosión, tal como se aprecia en la figura 12.

Es probable que la disminución en la velocidad de corrosión que se observa en la figura 12, se deba a

los productos de corrosión formados en la superficie de los MECA, los cuales se pueden observar a simple vista, dado que se acumulan y más bien llegan a comportarse como una especie de capa protectora, desacelerando el ataque (González, 1989).

Conclusiones

Con el MECA tres electrodos tipo peinetas se obtienen los mejores resultados según las pruebas realizadas, especialmente si se aplican los ensayos de resistencia a la polarización lineal.

Si se emplea la técnica de ruido electroquímico, el MECA tres electrodos idénticos brinda mejores resultados que el MECA tres electrodos tipo peinetas.

Durante el proceso de activación de las probetas, una temperatura de 85°C a 90°C y agitación continua provoca que la activación perdure por más tiempo (hasta 671 horas), con respecto a las condiciones de la primera corrida de datos, de 80°C sin agitación.

Ambos monitores electroquímicos responden a los cambios de las condiciones atmosféricas para ambos ensayos: en los puntos más bajos de humedad relativa, la resistencia es mayor (sea R_n o R_p), y la velocidad de corrosión disminuye.

Bibliografía

- Arriaga, R., Malo, J., Tres, G., y Uruchurtu, J. (2001). Monitoreo por ruido electroquímico de la corrosión del acero en una atmósfera contaminada. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 17(4), 172-173. Obtenido desde: <http://www.revistas.unam.mx/index.php/rica/article/view/25358>.
- Aballe, A., Bárcena, M., Botana, J. (2002). Ruido Electroquímico. *Métodos de análisis*. Oviedo, España: Septem Ediciones
- Bethencourt, M., Botana, F.J., González, L., y Sánchez, J.M. (2009). Medida de ruido electroquímico para el estudio de procesos de corrosión de aleaciones metálicas. *Revista de Metalurgia*, 45(2), 145-147. Obtenido desde: <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/artiart/view/158/156>
- Corte, D., y Peña, J. (2010). Obtención de curvas galvanostáticas y ensayos de resistencia a la polarización en varillas de construcción ASTM A42 en solución de agua al 3,5% de cloruro de sodio (Tesis de licenciatura). Obtenido desde: <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/10025>
- Genescá, J., Salvador, L., Mariaca, L., y Uruchurtu, J. (1999). *Corrosividad atmosférica (MICAT-México)*. México: Plaza y Valdés.
- González, J. (1989). *Control de la corrosión: estudio y medida por técnicas electroquímicas*. Madrid, España: GRAFIPREN, S.A.
- Norma ASTM G 199-09. Standard Guide for Electrochemical Noise Measurement. Estados Unidos: ASTM International.
- Norma ISO 9223-1992. Corrosion of metals and alloys. Corrosivity of atmospheres-Classification. Suiza: ISO.
- Otero, E. (2001). *Corrosión y degradación de materiales* (1ª Reimpresión). Madrid, España: Síntesis S.A.

Evaluación de posibles medidas para reducir las emisiones de fuentes móviles en Costa Rica, 2010-2015

Assessment of possible strategies to reduce mobile sources emissions in Costa Rica, 2010-2015 projection

Jorge Herrera-Murillo¹
José Félix Rojas-Marín²
Susana Rodríguez-Román³

Fecha de recepción: 06 de mayo del 2013
Fecha de aprobación: 19 de julio del 2013

Herrera-Murillo, J; Rojas-Marín, J; Rodríguez-Román, S. Evaluación de posibles medidas para reducir las emisiones de fuentes móviles en Costa Rica, 2010-2015. *Tecnología en Marcha*. Vol. 27, N° 1. Pág 23-37

- 1 Laboratorio de Análisis Ambiental, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional. Apartado 86-3000 Heredia, Costa Rica. Correo electrónico: jorge.herrera.murillo@una.cr.
- 2 Laboratorio de Análisis Ambiental, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional. Apartado 86-3000 Heredia, Costa Rica. Correo electrónico: jose.rojas.marin@una.cr.
- 3 Escuela de Química, Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San José. Costa Rica. Correo electrónico: susana.rodriguez@ucr.ac.cr.

Palabras clave

Fuentes móviles; emisiones; reducción; Costa Rica; contaminación del aire.

Resumen

Se evaluó el impacto de las posibles medidas para reducir las emisiones generadas por fuentes móviles en Costa Rica para ser ejecutadas en el periodo 2010-2015. La estimación de las emisiones se realizó utilizando los factores de emisión obtenidos del modelo Mobile 6 y los datos de actividad distribuidos por tipo de vehículo y combustible. El estudio determinó que la sustitución del 50% de las unidades de transporte público por vehículos más eficientes resulta ser la medida más eficaz para contrarrestar el incremento de las emisiones de NO_x y GOT, cercanas al 14,3% y 11,7% anual respectivamente.

Keywords

Mobile sources emissions ; Costa Rica ; emissions reduction ; air pollution.

Abstract

The impacts of the possible strategies to reduce the emissions from mobile sources in Costa Rica were evaluated for the 2010-2015 period. The total emissions were estimated using emission factors obtained from Mobile 6 model and activity data like fuel and vehicle type distribution. This study found that 50% substitution of public transport vehicles was the most effective measure to lower the annual rate increase for NO_x and Total Organic Gases (TOG). Both around 14,3% and 11,7% annually, respectively.

Introducción

Los vehículos de transporte son las principales fuentes de emisión de contaminantes del aire, especialmente en las zonas urbanas, así como el origen de la mayoría de los problemas de externalidades ambientales (Button, 1993). Las emisiones de contaminantes por las fuentes móviles carreteras están directamente relacionadas con las necesidades de movilidad particular y/o comercial de una región, las que a su vez son proporcionales al crecimiento poblacional y al comportamiento de la economía predominante en la zona (Parks y Hrunka, 2000).

El enfoque general que se utiliza para el cálculo de las emisiones generadas por este tipo de fuente contempla dos etapas. En primera instancia, se debe desarrollar un conjunto de factores de emisión que representen la tasa de emisión por unidad de actividad. Estos factores pueden definirse bajo condiciones controladas de laboratorio para ciclos de conducción predeterminados (Adler, 1997), mediante pruebas de manejo en tiempo real sobre carreteras, utilizando instrumentos a bordo que miden las emisiones generadas (Journard et al., 1995; Kelly y

Groblicki, 1993; Bishop y Stedman, 1990) o por el uso de software tales como MOBILE 6, IVE, etc.

La segunda etapa implica la determinación de una estimación de los vehículos y/o la actividad de tráfico. Estos datos de actividad se pueden derivar tanto de modelos como de conteos o encuestas de tráfico (Cardelino, 1998). Al igual que con las mediciones de emisiones a bordo, los datos de las encuestas son más deseables ya que proveen información sobre los patrones reales de transporte en los distintos tipos de caminos.

Si se considera que la flota vehicular registrada en Costa Rica hasta enero de 2010 corresponde a 1 079 331 unidades (1 vehículo por cada 4,2 habitantes), de las cuales un 63,8% son vehículos particulares y tan solo un 2,8% está destinado al transporte público (figura 1), se hace necesario planificar adecuadamente las políticas públicas que deberán ser implementadas con el fin de controlar las emisiones vehiculares y así garantizar el cumplimiento, tanto actual como futuro, de las normas de calidad del aire, sobre todo si se considera que:

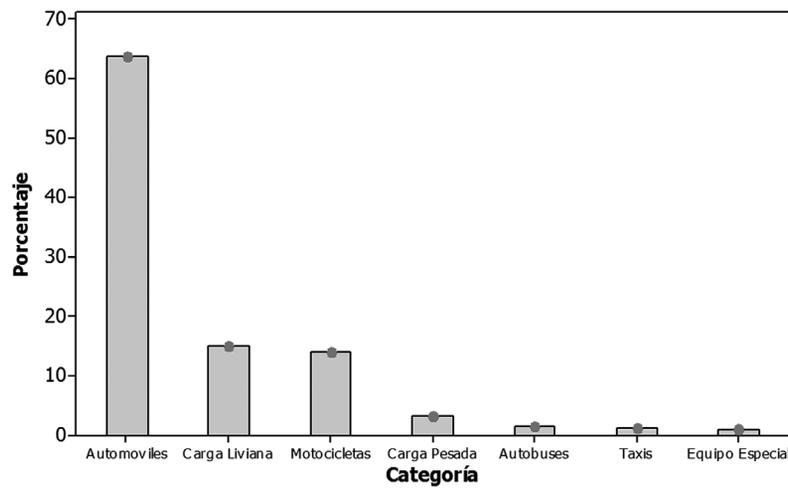


Figura 1. Composición porcentual por categoría de la flota vehicular de Costa Rica hasta enero 2010.

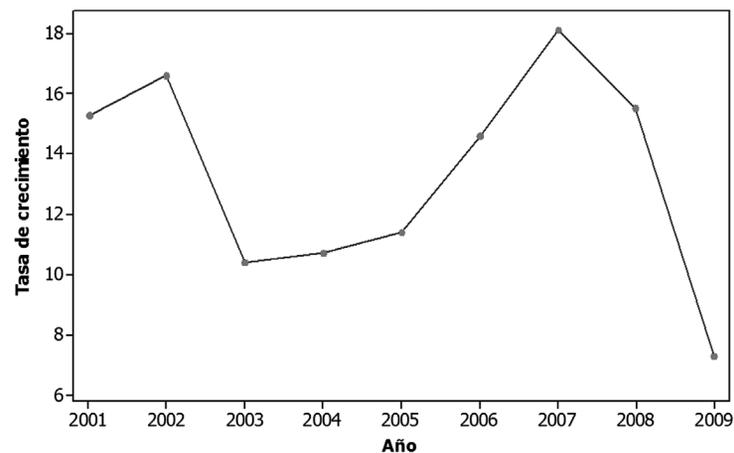


Figura 2. Comportamiento de la tasa de crecimiento anual de la flota vehicular de Costa Rica (serie de tiempo 2001-2009).

- Del total de unidades que integran la flota, 77,7% utiliza gasolina, mientras que 22,2% emplean diesel como combustible. De los vehículos a gasolina, el 20,8% son modelos 1990 y anteriores, que no cuentan con sistemas de control de emisiones; aproximadamente el 10,6% son modelos 1991-1992, vehículos que ya integran convertidores catalíticos de dos vías y permiten disminuir las emisiones de hidrocarburos y monóxido de carbono. Los vehículos que corresponden a modelos 1993 y posteriores (68,7% de la flota a gasolina) ya cuentan con convertidores catalíticos de tres vías y otros dispositivos anticontaminantes para reducir las emisiones de hidrocarburos, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno. En lo que se refiere a las unidades que utilizan diesel, alrededor del 28,1% son unidades año modelo 1993 y anteriores (sin control de emisiones). Cerca del 71,9% son vehículos que ya traen mejoras tecnológicas para cumplir con los estándares de emisión, tales como EPA 94 y EPA 98 respectivamente (INS, 2010).
- La tasa de crecimiento de la flota vehicular se ha mantenido cercana al 13,3% en el período 2001-2009 (figura 2). De las incorporaciones anuales a la flota, aproximadamente un promedio de

58,8% corresponde a vehículos usados, de los cuales 65% tienen una edad de hasta 5 años, 13% de 5 a 10 años, 16% de 10 a 15 años y 7% de más de 15 años.

- El tránsito privado ha venido creciendo a un ritmo del 8% anual y la infraestructura vial no ha sido desarrollada proporcionalmente. Esto está provocando la saturación del sistema vial con una fuerte congestión de tránsito, altas emisiones contaminantes sobre el ambiente, deseconomías por desperdicio de hidrocarburos, altos costos de operación de los vehículos y del tiempo de los usuarios y otros efectos indeseables de alto impacto (Flores, 2008).

En el presente artículo se evalúan algunas alternativas, en términos de reducción, que pueden ser implementadas con el fin de controlar las emisiones generadas por fuentes móviles carreteras en Costa Rica.

Metodología

Fuentes de información

Para realizar este análisis se partió de la información de la flota vehicular de Costa Rica registrada hasta enero del año 2010, suministrada por el Registro Nacional, en la que se indica: categoría del vehículo, tipo de combustible, año modelo, peso, etc. En el cuadro 1 se muestran otras fuentes de información utilizadas en este artículo.

Cálculo de las emisiones para los escenarios propuestos

Para estimar el potencial de emisiones del parque vehicular para cada uno de los escenarios propuestos, se obtuvieron los factores de emisión para los distintos contaminantes criterio a partir del software *Mobile 6*, que es un modelo computacional desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) y modificado de acuerdo con las condiciones imperantes en Costa Rica. Los factores de emisión obtenidos del modelo se estimaron por clase de vehículo, tipo de combustible y año modelo.

Los datos de actividad se tomaron de la encuesta del recorrido medio anual de los vehículos en circulación en el país elaborada por la Dirección Sectorial

de Energía (cuadro 2). En este estudio se utilizaron cuatro métodos de cálculo para el recorrido anual en kilómetros:

Método 1: Estimación según “sticker” y odómetro. Consiste en hacer un cálculo del recorrido tomando en cuenta la fecha del último cambio de aceite al automotor y la marca del odómetro al próximo cambio de aceite.

Método 2: Estimación según declaración de la marca del odómetro cuando se compró el automotor y el día de la entrevista. En este método de cálculo se consulta si el vehículo era nuevo o usado y si el conductor sabía la marca del odómetro el día de la compra.

Método 3: Estimación según declaración del rendimiento del vehículo en kilómetros por galón. En este método se le pregunta al conductor por el rendimiento en kilómetros por galón en forma general, en la ciudad y en carretera.

Método 4: Estimación según llamada posterior al conductor. Este método consiste en solicitar al conductor del automotor la posibilidad de llamarle varios días después para que declarara la marca del odómetro ese día; entonces, con la diferencia entre la marca del odómetro el día de la entrevista y la marca del odómetro el día de la llamada dividido por el número de días transcurridos entre ambas fechas se calcula un recorrido diario y la estimación anual respectiva.

Para obtener un dato único de recorrido anual en kilómetros para cada automotor, se calculó un promedio entre los datos que se estimaron según los cuatro métodos. Con los datos del recorrido diario, los días que circularon los vehículos durante el año del escenario y el número de vehículos de acuerdo a la distribución por año modelo, se obtuvieron los kilómetros recorridos (KRV) por tipo de vehículo y año modelo, a partir de la ecuación:

$$KRV_{ij} = (KD_j) (NV_{ij}) (DA_i) (I)$$

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].

Cuadro 1. Fuentes de información utilizadas en el estudio.

Tipo de información	Características	Fuente
Características fisicoquímicas de los combustibles	Diesel: -Contenido de azufre (2003-2009) Gasolina: -Contenido de azufre (2003-2009) -Presión de Vapor Reid (2003-2009) -Contenido de oxigenados (2003-2009)	Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE)
Datos meteorológicos	-Máximos y mínimos diarios de temperatura (2003-2009)	Instituto Meteorológico Nacional (IMN)
Datos económicos	-Tasa de inflación (1992-2009) -Producto Interno Bruto nacional (1992-2009)	Ministerio de Planificación y Política Económica (MIDEPLAN), Banco Central de Costa Rica (BCCR)
Datos de población	-Población de Costa Rica (1992-2015)	Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC)
Datos de importaciones de vehículos	-Importaciones de vehículos nuevos y usados (2009-2001) por año modelo	Dirección General de Aduanas, Ministerio de Hacienda
Datos de kilómetros totales recorridos por vehículos en Costa Rica	-Kilómetros anuales recorridos por la flota vehicular por categoría de vehículo y tipo de combustible.	Dirección Sectorial de Energía, Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones

Cuadro 2. Datos de actividad de la flota vehicular que circula en el área metropolitana de Costa Rica.

Categoría de vehículo	Kilómetros promedio recorridos en un año
Automóvil particular	20768
Carga liviana	27990
Carga pesada	38934
Taxis	86109
Buses	43417
Motos	16091

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].

A partir de los kilómetros recorridos (KRV) y los factores de emisión por tipo de vehículo, combustible y año modelo, se obtuvieron las emisiones de cada contaminante, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$E_{ijk} = (KRV_{ij}) (FE_{ijk}) / (1000000) \quad (2)$$

donde:

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

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

FE_{ijk} = Factor de emisión del tipo de vehículo i , año modelo j , del contaminante k [g/km]

1000000 = Factor de conversión de gramos a toneladas.

Proyección de la flota vehicular

La modelación del transporte es un proceso de desarrollo de modelos matemáticos aplicables al pronóstico de las características del sistema de transporte de una región, tales como: el volumen de las flotas vehiculares, la edad del parque vehicular, el nivel de saturación (autos/100 habitantes, %), viajes y tráfico, entre otras.

Algunas de las variables comúnmente empleadas para modelar el transporte son la densidad de población, la tasa de empleo, el Producto Interno Bruto (PIB), el ingreso per cápita y la inflación. El modelo de Quarmby y Bates (1970), por ejemplo, emplea dos variables independientes: el ingreso y la densidad residencial, para modelar las flotas de autos particulares, aunque reconoce la existencia de otros factores de interés como el tamaño de la localidad y el precio de los vehículos (Ortizar et al., 1994). Las relaciones básicas del modelo de Quarmby son:

$$\frac{P_0}{1 - P_0} = \alpha_0 I^{b_0} D^{c_0}$$

$$\frac{P_2}{P_1} = a_1 e^{(b_1 I)} D^{c_1} \quad (3)$$

$$P_0 + P_1 + P_2 = 1$$

donde:

P_i = Probabilidad de que una residencia posea i vehículos

I = Ingreso anual familiar

D = número de residentes por acre

a_i, b_i y c_i son los parámetros a estimar

α_0 = Índice de saturación, fracción

Sin embargo, la variable del ingreso per cápita no refleja la pérdida de poder adquisitivo del ingreso, que suele ser muy significativa en países como Costa Rica. El modelo de Quarmby y Bates considera el nivel de saturación la cual genera el efecto de límite del crecimiento del parque vehicular que se observa en países desarrollados altamente motorizados como Estados Unidos de Norteamérica. Estas estimaciones consideran tres características del parque vehicular a modelar: número de vehículos, distribución de los vehículos por tamaño y distribución de los vehículos por tipo de combustible.

Para el presente trabajo se tomaron como base los estudios realizados por el Instituto Mexicano del Petróleo, los cuales han supuesto que el crecimiento de los vehículos de uso comercial es proporcional al crecimiento de la relación PIB/persona (Gasca, 2005), suponiendo el crecimiento del PIB como una constante y tomando las proyecciones de crecimiento poblacional del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos de Costa Rica.

Escenarios evaluados

Las acciones consideradas en el presente trabajo como posibles iniciativas para la reducción y el control de emisiones de fuentes móviles en Costa Rica se indican a continuación:

- Acción 1: Reducir el contenido de azufre en el diesel de 400 a 100 ppm para el año 2015.
- Acción 2: Reemplazo del 100% de unidades de autobuses y taxis con edades superiores a los 10 años para el periodo 2010-2015.
- Acción 3: Aplicación de medidas de restricción vehicular de un día por semana de acuerdo con el número de placa del vehículo.
- Acción 4: Prohibición de importación de vehículos usados con más de cinco años de antigüedad a partir del año 2010.
- Acción 5: Incentivar el uso de gas licuado de petróleo o unidades de alto rendimiento en el 50% de las unidades de transporte público para el año 2015.

Resultados

Evolución de la flota vehicular 2010-2015

Con el fin de elaborar un modelo para pronosticar el crecimiento de la flota vehicular al año 2015, se estimó el comportamiento del PIB del país a partir de los datos de la serie histórica 1992-2009, obtenida del Ministerio de Planificación y Política Económica y los pronósticos publicados por el Banco Central de Costa Rica para los años 2010 y 2011. En el cuadro 3 se presentan los datos empleados para el pronóstico del PIB. Para mejorar el pronóstico se utilizó la inflación como variable de ajuste de la jornada financiera.

Se aplicaron 11 modelos de series de tiempo para identificar el que mejor describe el comportamiento

Cuadro 3. Datos empleados para el pronóstico del PIB.

Año	Inflación (%)	Variación del PIB (fracción)
1992	16,97	0,0915
1993	9,04	0,0741
1994	19,86	0,0473
1995	22,57	0,0392
1996	13,89	0,0089
1997	11,20	0,0558
1998	12,36	0,0840
1999	10,11	0,0822
2000	10,25	0,0180
2001	10,96	0,0108
2002	9,68	0,0290
2003	9,87	0,0640
2004	13,13	0,0426
2005	14,07	0,0589
2006	9,43	0,0878
2007	10,81	0,0795
2008	13,9	0,0282
2009	4,05	-0,0128
2010	8,44	0,0400

de la variación del PIB: (a) recorrido aleatorio con tendencia, (b) media constante, (c) tendencia lineal = $2,837 - 0,00139 t$, (d) suavizado exponencial simple con $\alpha = 0,0328$, (e) suavizado exponencial lineal de Brown con $\alpha = 0,0146$, (f) suavizado exponencial lineal de Holt con $\alpha = 0,2519$ y $\beta = 0,1424$, (g) ARIMA (2,0,1) con constante, (h) ARIMA (2,0,2) con constante, (i) ARIMA (2,1,1), (j) ARIMA (2,0,0) con constante, (k) ARIMA (2,1,1) con constante. Para identificar el modelo apropiado se utilizaron métodos estadísticos de medición de la precisión del pronóstico.

En el análisis estadístico de la precisión del pronóstico se calcularon los estadísticos del error:

$$EM = \frac{\sum_{t=1}^n e_t}{n}$$

$$EMA = \frac{\sum_{t=1}^n |e_t|}{n}$$

$$RECM = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n e_t^2}{n}} \quad (4)$$

donde:

EM = Error medio.

EMA = Error medio absoluto.

RECM = Raíz del error cuadrado medio.

e_t = error del pronóstico al periodo de tiempo t .

n = número de observaciones en el periodo de observación.

De manera que el mejor modelo será aquel que presente el valor más cercano a cero del EM y el valor más pequeño de los estadísticos EMA y RECM. El cuadro 4 resume los valores de estos estadísticos para los modelos probados, en donde se observa que el modelo (G) presenta el menor valor del RECM y del EMA. En forma adicional, el cuadro 4 contiene los resultados de las pruebas, en donde se identificó que el error no es significativo a un nivel de 95% de confianza para los modelos de (G) a (K). Se puede identificar en la figura 3 que el modelo (G) se ajusta a los datos y presenta una sensibilidad adecuada a los cambios bruscos del PIB. En el presente estudio, la sensibilidad y ajuste del modelo a los datos tiene alta relevancia, debido a que la variable endógena Variación PIB se empleará como variable exógena o explicatoria para las proyecciones de las emisiones contaminantes de escenarios a corto y mediano plazo. Por lo tanto, se seleccionó el modelo (G) de ARIMA (2,0,1) con constante como el más apropiado para pronosticar las variaciones del PIB.

En el cuadro 5 se muestran los resultados del pronóstico del cambio en el PIB nacional de Costa Rica para el período 2010-2015, así como los intervalos de confianza al 95%. Se puede observar que los intervalos se hacen más amplios conforme el pronóstico se aleja en el tiempo.

Si se plantea la hipótesis de que el crecimiento del parque vehicular en Costa Rica dependerá del volumen de ventas automotrices, las cuales están directamente relacionadas con la capacidad

Cuadro 4. Estadísticos de error para los modelos probados para el pronóstico del PIB.

Modelo	RECM	EMA	EM	RUNS	RUNM	AUTO	MEAN	VAR
(A)	0,03277	0,02751	$-7,71 \times 10^{-19}$	OK	OK	OK	OK	OK
(B)	0,02945	0,02503	$-5,48 \times 10^{-18}$	*	OK	OK	OK	OK
(C)	0,02922	0,02410	$-5,37 \times 10^{-17}$	*	OK	OK	OK	OK
(D)	0,03009	0,02545	0,00202	*	OK	OK	OK	OK
(E)	0,03012	0,02549	0,00212	*	OK	OK	OK	OK
(F)	0,03398	0,02882	0,00293	*	OK	OK	OK	OK
(G)	0,01920	0,01394	-0,00066	OK	OK	OK	OK	OK
(H)	0,01827	0,01264	0,00136	OK	OK	OK	OK	OK
(I)	0,02119	0,01695	0,00018	OK	OK	OK	OK	OK
(J)	0,02134	0,01710	0,00050	OK	OK	OK	OK	OK
(K)	0,02068	0,01555	0,00060	OK	OK	OK	OK	OK

RUNS = Test para excesivas ejecuciones arriba y abajo

RUNM = Test para excesivas ejecuciones por encima y por debajo de la mediana

AUTO = Test de Box-Pierce para excesivas autocorrelaciones

MEAN = Test para la diferencia en la media de la 1ª mitad a la 2ª mitad

VAR = Test para la diferencia en la varianza en la 1ª mitad a la 2ª mitad

OK = no significativa ($p \geq 0,05$)

* = marginalmente significativa ($0,01 < p < 0,05$)

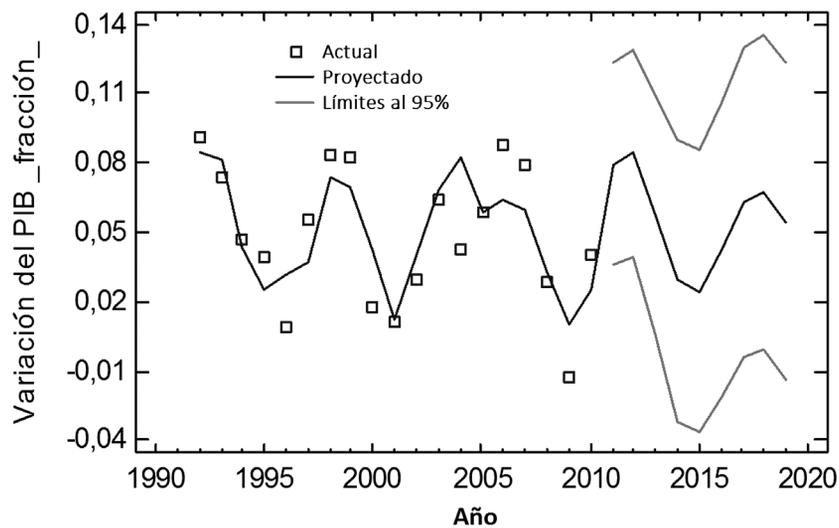


Figura 3. Proyección de la tasa de variación anual del PIB de Costa Rica (modelo ARIMA (2,0,1)).

Cuadro 5. Valores pronosticados del PIB con intervalos al 95% de confianza.

Período	Predicción	L. inferior	L. superior
2011	0,0736	0,0357	0,1103
2012	0,08264	0,0448	0,1205
2013	0,06544	0,0204	0,1105
2014	0,03866	-0,0165	0,0938
2015	0,0239	-0,0331	0,0808

económica de la población (cantidad de dinero que posee la población asociado al valor que ese dinero tiene en el mercado), se puede hacer un análisis de regresión múltiple que asocie las ventas nacionales al PIB, la tasa de inflación y la población del país.

En el cuadro 6 se resumen los estadísticos correspondientes al ajuste de los diferentes modelos de regresión y en ella se puede observar que individualmente, la variable B (tasa de inflación) es la que tiene el valor más alto de ECM, el valor de R² ajustado y coeficiente de Durbin-Watson más bajo.

Cuadro 6. Resultados del ajuste del modelo de regresión lineal para las ventas de vehículos.

EMA	R ² ajustado (%)	Estadístico Durbin Watson	Variables incluidas
16002,2	57,5	1,5698	A
26746,4	0,0	0,6286	B
19484,3	38,4	1,4744	C
14759,4	63,1	1,3077	A,B
7401,7	88,7	2,9964	A,C
24865,8	43,2	1,2245	B,C
3066,98	99,4	2,9499	A,B,C

A= Producto Interno Bruto, B= Tasa de Inflación, C= Población.

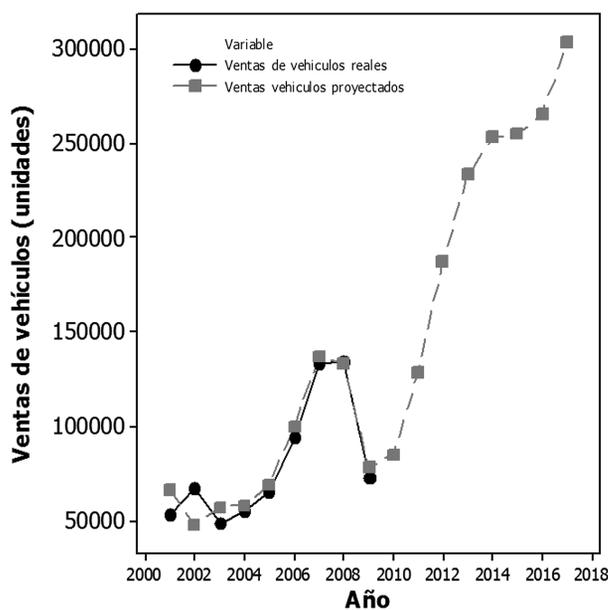


Figura 4. Proyección de las ventas anuales de vehículos en Costa Rica (2010-2015).

Estas condiciones significan que la tasa de inflación es la variable que menos explica las ventas nacionales de autos. El modelo de regresión que incluye las variables PIB, inflación y población es la que cumple con los criterios de mejor combinación. Esta combinación genera valores de R² ajustado más altos y los menores valores de ECM. El modelo de regresión múltiple resultante está dado por la ecuación 5 y la figura 4 muestra la evolución y el modelo ajustado de las ventas nacionales.

$$\text{Ventas nacionales} = 1\,543\,480 + 0,459 \text{ PIB} - 0,537 \text{ Población} + 1232,3 \text{ Tasa Inflación} \quad (5)$$

Los modelos de regresión de las flotas vehiculares permiten proyectar el volumen total de cada tipo de vehículo. Para complementar la proyección del parque vehicular se requiere conocer la distribución por edad de la flota. Para pronosticar esta información se deben conocer las curvas de retiro,

que describen la velocidad a la cual se retiran las unidades. Estas curvas son específicas para cada tipo de vehículo dado el diferente uso que se les da y la tecnología que incorporan. Las curvas de retiro incluso pueden cambiar con el año modelo para vehículos del mismo tipo, debido al diseño de estos.

Utilizando los datos de distribución de la flota vehicular por categorías para el período 2001-2010 se corrieron pruebas de selección de modelos de regresión, empleando las tres variables explicatorias: PIB, inflación y población. Estos modelos describen el crecimiento del parque de cada tipo de vehículo y se exponen en el cuadro 7. El cuadro 8 contiene los valores proyectados para la flota vehicular por categoría de vehículo para el periodo 2011-2017.

Empleando las bases de datos de la flota vehicular del 2001 al 2010 por año modelo y tipo de vehículo para Costa Rica se identificaron las curvas de retiro características del parque vehicular. Al analizar estas curvas se propusieron los modelos para determinar

el número de vehículos de un año modelo dado para el año calendario que se desee. Las curvas de retiro se definieron por el modelo generalizado:

$$flota_{i,j,t} = f(flota_{i,j,t-1}, edad_{i,j,t}, er_i) \quad (6)$$

donde:

Flota i,j,t = Número de vehículos de tipo i del año modelo j en el año calendario t

Flota $i,j,t-1$ = Número de vehículos de tipo i del año modelo j en el año calendario $t-1$

Edad i,j,t = Edad de los vehículos de tipo i del año modelo j al año calendario t

er_i = Edad típica de retiro de los vehículos del tipo i

Edad = año calendario – año modelo = $t - j$

Por lo que se puede observar en la ecuación (6), se está proponiendo una ecuación para cada tipo de

Cuadro 7. Modelos de regresión múltiple para las distintas categorías de vehículos en la flota.

Categoría	Modelo de regresión	EMA	R ² ajustado
Aut. particulares	-3689350 - 0,168PIB + 1,0424Población-5162,2Inflación	19153,8	96,37
Taxis	-73292 - 0,00334PIB + 0,0207Población - 102,6Inflación	380,5	96,88
Autobuses	-89420 - 0,00407PIB + 0,0253Población - 125,09Inflación	464,3	96,81
Motocicletas	-807111 - 0,0367PIB + 0,228Población - 1129,35 Inflación	4190,3	97,03
Carga liviana	-871793 - 0,0397PIB + 0,246Población - 1219,84 Inflación	4526,1	96,55
Carga pesada	-191665 - 0,00873PIB + 0,0541Población - 268,2 Inflación	995,2	97,58

Cuadro 8. Proyección de las flotas vehiculares de 2011 a 2017.

Año	Vehículos particulares	Carga liviana	Motocicletas	Autobuses	Taxis	Carga pesada
2011	694395	164025	151721	16997	13802	36062
2012	718423	169704	156976	17582	14279	37311
2013	746942	176444	163214	18275	14845	38792
2014	785526	185562	171653	19212	15612	40797
2015	830223	196124	181429	20298	16500	43119
2016	872007	205997	190568	21312	17330	45289
2017	904629	213707	197704	22105	17978	46984

vehículo y para cada año modelo. Siendo seis tipos de vehículos y hasta 40 años modelo (escenario 2015), resultan 240 ecuaciones de curvas de retiro por construir. En la figura 5 se muestra el comportamiento de estas curvas de retiro para tres años distintos y varias clases de vehículos.

Con base en los modelos de las curvas de retiro descritas y los modelos econométricos, así como en las estimaciones de las incorporaciones, se construyeron los parques vehiculares por tipo de vehículo y año modelo para los escenarios propuestos.

Escenario 1: Reducir el contenido de azufre en el diesel de 400 a 100 ppm para 2015

Se analizó el impacto de la distribución y consumo de diesel con concentraciones cercanas a 100 ppm a partir de 2015. Con este propósito se establecieron dos escenarios: escenario 0, que consiste en el estado de las emisiones contaminantes proyectadas a 2015 con diesel de 400 ppm, y el escenario 1, que corresponde al estado de las emisiones contaminantes proyectadas a 2015 con diesel de 100 ppm de azufre. Los efectos de esta medida se determinaron obteniendo la diferencia neta entre las emisiones de azufre en forma de óxidos de azufre cuando se consume diesel con 400 ppm de azufre y diesel con 100 ppm, aplicando para ello el software Mobile 6. Si se analizan los resultados obtenidos (cuadro 9) se puede ver que esta medida produciría una reducción del 75% (1201 ton) en las emisiones de dióxido de azufre. Esta reducción en las emisiones se sumaría al esfuerzo realizado en el año 2007, cuando el contenido de azufre en diesel se disminuyó de 3500 a 400 ppm (figura 6).

Escenario 2: Reemplazo del 100% de unidades de autobuses y taxis con edades superiores a los 15 años para 2015

Con este escenario se propone la sustitución de 7015 unidades de autobuses (104 que operan con gasolina y 6911 con diesel) y 6696 taxis (6137 que operan con gasolina y 559 con diesel) que tengan una edad promedio mayor o igual a 15 años para el año 2015. La sustitución de las unidades se plantea bajo dos posibilidades: primero un reemplazo del total de las unidades en el año 2015 o en forma alternativa, y segundo, una sustitución gradual en partes iguales en el período comprendido entre 2013-2015.

Con el propósito de evaluar el impacto de esta medida se establecieron tres escenarios: el escenario 0, que consiste en el estado de las emisiones contaminantes proyectadas a 2015 sin la sustitución

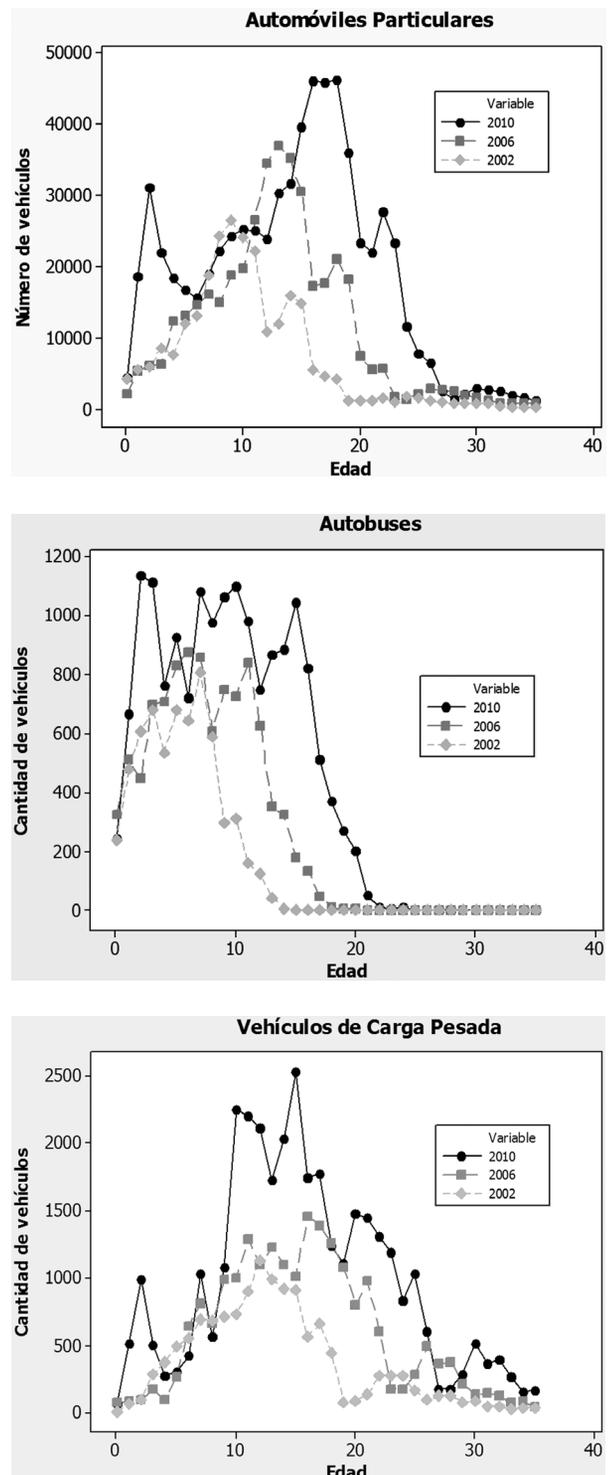


Figura 5. Curvas de retiro de vehículos en Costa Rica para tres años diferentes.

Cuadro 9. Emisiones de SO₂ (toneladas) generadas bajo los dos escenarios planteados en materia de combustibles por las unidades de la flota que operan con diesel.

	Autobuses	Taxis	Carga pesada	Carga liviana	Automóviles particulares	Total
Diesel con S 400 ppm	301	43	332	723	204	1603
Diesel con S 100 ppm	76	11	83	181	51	402

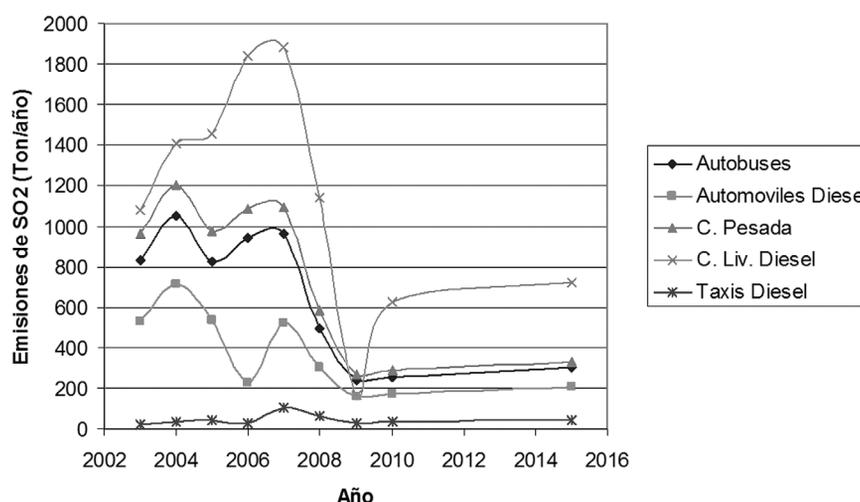


Figura 6. Comportamiento de las emisiones anuales de dióxido de azufre en Costa Rica por categoría de vehículo.

Cuadro 10. Emisiones generadas (toneladas) producto de los distintos escenarios de intervención en la flota de autobuses y taxis.

	GOT	CO	NOx
2015 sin sustitución	4848	16104	23249
2015 con sustitución 100% en 2015	1946	9243	13732
2015 con sustitución en el período 2013-2015	2361	10736	18397

de las unidades; el escenario 1, que implica el estado de las emisiones contaminantes proyectadas a 2015 con la sustitución total en ese año; y el escenario 2, que conlleva el estado de las emisiones proyectadas a 2015 pero con un sustitución anual gradual de iguales proporciones del 2013-2015. Los efectos se calculan obteniendo la diferencia neta entre las

emisiones contaminantes que dejan de emitirse al retirar las unidades de los años modelo más antiguos. Se proyectó la flota vehicular de acuerdo a las curvas de retiro para determinar las cantidades y edad de las unidades por sustituir. Los resultados obtenidos se muestran en el cuadro 10. Tal como se puede observar en dicha tabla, el escenario de realizar la sustitución del 100% de las unidades de autobuses y taxis con edades mayores a 15 años para el 2015, en un período de tiempo de un año, representa la mayor reducción de emisiones de contaminantes, con un 47,8% en comparación con el 35,2% de la sustitución parcial a tres años.

La implementación de la medida en los autobuses representa un 54% del total de la reducción de la emisión de contaminantes bajo el escenario de sustitución total del 100% en el 2015, mientras que la contribución de los taxis corresponde a un 45% para las unidades que operan con gasolina y tan sólo un 0,7% para las de diesel.

Escenario 3: Aplicación de medidas de restricción vehicular de un día por semana de acuerdo con el número de placa del vehículo

En el alcance de esta acción se propone el establecimiento de un sistema de restricción a la circulación orientado en dos alternativas: i) restricción de un día a la semana a todos los vehículos de la flota de acuerdo con el número de terminación de la placa, y ii) restricción de circulación de un día a la semana solo a las unidades de la flota con más de 10 años de antigüedad.

Se empleó el método econométrico para proyectar la flota vehicular para el año 2015 que dejan de circular. Las edades se proyectaron en función de las curvas específicas de retiro. Posteriormente se realizaron las correcciones correspondientes a los datos de kilómetros recorridos totales por tipo de vehículo y combustible, considerando la restricción de circulación de un día a la semana.

Tal como se puede observar en el cuadro 11, el establecimiento de un sistema de restricción vehicular causaría un impacto más significativo en las emisiones de PM₁₀ y SO₂ con tasas de reducción cercanas al 22%, en comparación con un 15% en promedio para los contaminantes restantes. En forma adicional, los automóviles particulares y vehículos de carga liviana presentan los mayores

niveles de reducción (20%) en promedio para los contaminantes analizados al entrar en vigencia la restricción vehicular.

Al examinar los dos modelos de restricción propuesta se puede observar que no se obtiene una ventaja adicional significativa al aumentar la restricción a toda la flota, ya que, por ejemplo, en el caso de carga liviana, carga pesada y automóviles particulares el efecto es de tan solo un 2% adicional, por lo que en primera instancia se recomienda la restricción solo a las unidades con una edad mayor a 10 años al 2015.

Escenario 4: Prohibición de importación de vehículos usados con más de cinco años de antigüedad a partir del año 2010

Bajo este escenario, se evaluó el impacto de establecer controles más estrictos sobre la importación de vehículos usados, específicamente sobre su edad promedio al ingresar al país, como medida para revertir la tendencia de envejecimiento de la flota vehicular. Con este fin se plantearon dos posibilidades de restricción: cinco o diez años de antigüedad como edad máxima de los vehículos al ingresar al país.

Para realizar este análisis se utilizaron modelos econométricos ajustados y las curvas de retiro para

Cuadro 11. Estimación de las emisiones generadas (toneladas/año) por el establecimiento de una medida de restricción vehicular bajo dos escenarios distintos.

Tipo de vehículo	GOT			CO			NOx			PM ₁₀			SO ₂		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Autobuses	1 431	1 515	1 669	5 125	5 417	5 977	17 115	18 091	19 959	129,8	138,1	194	258	273	301
Taxis	2 726	2 754	3 179	8 684	8 840	10 127	2 880	2 965	3 290	39,8	43,4	47	41,5	46,2	49
Carga liviana	6 580	6 714	10 561	78 056	79 462	91 019	22 043	23 262	25 703	489	524	720	758	805	739
Carga pesada	1 280	1 299	1 493	6 825	6 975	7 961	10 989	11 240	12 815	247,9	256,2	289	284,4	291,8	332
Automóviles particulares	54 495	54 695	61 773	148 741	152 396	163 037	45 966	47 947	48 186	339	357	450	117	123	289
Motocicletas	13 306	14 664	15 516	50 214	55 839	55 841	2 339	2 645	2 728	58,1	65,9	68	63,6	71,9	74,1

Escenario 1: restricción de un día a todas las unidades de la flota.

Escenario 2: restricción de un día solo a unidades con edad mayor a 10 años.

Escenario 3: sin restricción vehicular.

estimar la distribución de la flota vehicular por edades al año 2015, bajo las tres condiciones planteadas en el alcance del presente escenario. Tal como puede observarse en el cuadro 12, resulta más conveniente, en términos de reducción de emisiones, limitar la importación de vehículos con más de 5 años de antigüedad, ya que mientras bajo esta condición se genera una reducción promedio de 2,71% en las emisiones, si se restringe a 10 años el descenso es de tan solo el 1,40% en promedio. Dentro de los contaminantes contemplados, esta medida favorece considerablemente el control de los gases orgánicos totales y los óxidos de nitrógeno mayoritariamente, con disminuciones de 2,59 y 3,39% respectivamente. En el caso de los gases orgánicos, los principales descensos se presentan en las emisiones de las motocicletas (6,80%), taxis (4,59%) y vehículos de carga liviana (2,97%), mientras que para el caso de los óxidos de nitrógeno las principales reducciones se presentan en los taxis (5,28%) y los vehículos particulares (4,52%).

Al analizar los resultados se puede considerar que las categorías de vehículos que más contribuyen al descenso de las emisiones al restringir la edad de ingreso a 5 años son los taxis (3,53%), motocicletas (3,47%), carga liviana (2,47%) y carga pesada (2,38%).

para el año 2015, dando prioridad de sustitución a todas aquellas que tengan más de 15 años promedio de edad. Las nuevas unidades podrán ser reemplazadas por: (a) unidades que operan con gas licuado de petróleo o (b) vehículos de tecnologías más limpias. La sustitución se iniciaría en el año 2012 y finalizaría en 2014.

En el caso de los autobuses, se plantea incorporar como vehículos más limpias unidades EURO-IV. Para estimar las emisiones de estas unidades, se obtuvieron los factores de emisión de la norma oficial mexicana NOM-044-SEMARNAT-2006. La conversión de unidades se realizó considerando un rendimiento de combustible de 2,3 km/l de acuerdo con estudios recientes (SMADF, 2006). El resto de los factores de emisión se obtuvo ponderando los resultados del modelo Mobile 6 y por balance de materia. Para los taxis se consideraron unidades TIER-2 para utilizarlas en reemplazo de los vehículos. Los factores de emisión aplicables al programa TIER-2 se presentan en el cuadro 13. El resto de los factores se obtuvo por balance de materia y del modelo *Mobile 6*.

En el cuadro 14 se puede observar que con el reemplazo de las unidades más antiguas por unidades que operan con GLP se obtiene en promedio una reducción del 45% en las emisiones,

Cuadro 12. Emisiones de contaminantes (toneladas/año) generadas al año 2015 bajo distintos escenarios de regulación de la importación de vehículos usados.

	GOT	CO	NO _x	PM ₁₀	SO ₂
Sin regulación a las importaciones	94 191	336 676	112 681	1 767	1 784
Edad máxima de ingreso 5 años	91 751	329 104	108 948	1 762	1 763
Edad máxima de ingreso 10 años	93 148	331 382	110 971	1 765	1776

Escenario 5: Incentivar el uso de gas licuado de petróleo o unidades de alto rendimiento en el 50% de las unidades de transporte público para el año 2015

Dentro de este escenario se plantea sustituir el 50% de las unidades de transporte público (taxis y autobuses) que se proyecta se encuentren en operación

Cuadro 13. Factores de emisión (g/km) para taxis TIER-2.

TIER 2				Mobile 6	
CO	GOT	NO _x	PM ₁₀	NH ₃	SO ₂
2,610	0,056	0,043	0,006	0,0632	0,0042

Cuadro 14. Emisiones de contaminantes (toneladas/año) generadas al año 2015 bajo distintos escenarios de renovación del 50% de las unidades destinadas al transporte público.

Categorías		GOT	CO	NOx	SO ₂	PM ₁₀
Autobuses	50% operando con GLP	1097	3221	10266	142	76
	50% unidades alta eficiencia	1330	4864	9402	153	84
	Sin sustitución	1669	5977	19959	301	194
Taxis gasolina	50% operando con GLP	367	2420	938	2	6
	50% unidades TIER-2	240	3939	637	5	10
	Sin sustitución	2901	9909	2739	6	17
Taxis diesel	50% operando con GLP	205	197	468	37	26
	50% unidades alta eficiencia	204	200	458	43	30
	Sin sustitución	278	218	551	43	30

mayor a la registrada si la sustitución se realiza con unidades nuevas de alta tecnología, donde se disminuye tan solo un 36%. Las reducciones de emisiones más importantes se presentan en autobuses, principalmente en PM₁₀ (60,8%), SO₂ (52,8%) y NOx (48,6%).

El estado de las emisiones generadas por fuentes móviles en Costa Rica a mediano plazo (año 2015) considerando que no se aplicara acción alguna para cambiar las tendencias actuales de emisiones contaminantes, indica una ralentización del crecimiento de los volúmenes de emisiones contaminantes. Mientras que durante los seis años del periodo entre el año 2006 y el año 2012 las emisiones de NOx crecen a una tasa promedio de 2,6% anual, durante los tres años del periodo 2012-2015 las emisiones se incrementarán a una tasa promedio de 3,5% anual, de acuerdo con las proyecciones desarrolladas en este trabajo.

Bibliografía

Adler, U. (1997). *Bosch Automotive Handbook*. 4 ed. Stuttgart: Robert Bosch GmbH.

Bishop, G.A. & Stedman, D.H. (1990). On-road carbon-monoxide emission measurement comparisons for the 1988-1989

Colorado oxy-fuels program. *Environmental Science and Technology* 24(6): 843-847.

Button, K. (1993). *Transport, the Environment and Economic Policy*. Aldershot, UK: Edward Elgar.

Cardelino, C. (1998). Daily variability of motor vehicle emissions derived from traffic counter data. *Journal of the Air & Waste Management Association* 48(7): 637-645.

Gasca, J.R. (2005). Escenarios de emisiones y medidas de mitigación de gases de efecto invernadero en sectores clave (Transporte y Desechos). México: Instituto Mexicano del Petróleo.

Joumard, R., Jost, P., Hickman, J. & Hassel, D. (1995). Hot passenger car emissions modelling as a function of instantaneous speed and acceleration. *Science of the Total Environment* 169(1-3): 167-174.

Kelly, N.A. & Groblicki, P.J. (1993). Real-world emissions from a modern production vehicle driven in Los Angeles. *Journal of the Air & Waste Management Association* 43(10): 1351-1357.

Ortizar, J.D. & Willumsen, L.G. (1994). *Modelling transport*. 2 ed. UK: John Wiley & Sons.

Parks, P. & Hrunka, G. (2000). Creating a market for reduced carbon monoxide emissions from mobile sources. *Environmental Science & Policy* 3, 47-54.

SMADF (2006). *Pruebas de Campo de Autobuses de Tecnologías Alternativas en la Ciudad de México, Reporte Final*. México: s.n.

Formación acelerada de gránulos productores de hidrógeno para el arranque de reactores UASB utilizando vinazas

Accelerated formation of hydrogen-producing granules
for the start-up of UASB reactors using vinasses

*César González-Ugalde¹
J. Esteban Durán-Herrera²*

*Fecha de recepción: 06 de mayo del 2013
Fecha de aprobación: 11 de junio del 2013*

González-Ugalde, C; Durán-Herrera, J. Formación acelerada de gránulos productores de hidrógeno para el arranque de reactores UASB utilizando vinazas. *Tecnología en Marcha*, Vol. 27, N° 1. Pág 38-47

- 1 Ingeniero Químico. Emerson Electric Costa Rica. Correo electrónico: cesar_gu24@hotmail.com.
- 2 Doctor en Ingeniería Química, Profesor Catedrático, Escuela de Ingeniería Química, Universidad de Costa Rica. Correo electrónico: esteban.duranherrera@ucr.ac.cr.

Palabras clave

Hidrógeno; fermentación anaerobia; gránulos productores de hidrógeno; vinazas; reactor UASB.

Resumen

Se estudió la formación de gránulos productores de hidrógeno en un reactor CSTR, con el fin de transferirlos luego un reactor UASB y así acortar el tiempo de arranque del mismo. El sustrato utilizado fueron vinazas provenientes de una agroindustria nacional productora de etanol a partir de melazas de caña de azúcar y su fermentación anaerobia se llevó a cabo bajo condiciones mesofílicas. Los lodos para realizar la inoculación del sistema se tomaron de un reactor UASB de una planta de tratamiento de agua industrial, a los cuales se les realizó un tratamiento térmico con el objetivo de inhibir el crecimiento de bacterias metanogénicas. Se generaron curvas de crecimiento de materia viable y no viable total, con las cuales se determinó que la fase de crecimiento exponencial de las bacterias en cultivo mixto pre-tratadas térmicamente se encontraba entre las 20 y las 120 h. Finalmente, la fermentación anaeróbica de las vinazas durante 70 horas en modo "batch" (por lotes) y posteriormente durante 7 días en modo continuo tipo CSTR demostró ser un procedimiento efectivo para acelerar la formación de los gránulos productores de hidrógeno, lográndose obtener gránulos con un tamaño promedio de 1,24 mm. La alta eficiencia del proceso se le atribuye a la elevada transferencia de masa que se obtiene en el reactor CSTR.

Keywords

Hydrogen; anaerobic fermentation; hydrogen-producing granules; vinasses; UASB reactor.

Abstract

Hydrogen-producing granules formation was studied in a CSTR. The aim of this process is to later transfer the mixed liquor to a UASB reactor to reduce its start-up period. Vinasses from a national bioethanol-producing industry (from sugar cane) were used as substrate and their anaerobic fermentation was carried out under mesophilic conditions. The seed sludge was collected from an UASB reactor operated in an industrial wastewater treatment plant and it was heat treated to inactivate methanogenic bacteria. Total viable and non-viable material growth curves were generated and it was determined that the exponential growth phase of the thermally pre-treated mixed culture was between 20 and 120 h. Finally, the anaerobic fermentation of the vinasses in batch mode for 70 hours, and then in continuous CSTR mode for 7 days, showed to be an effective method for accelerating the formation of hydrogen-producing granules. Using this method, granules with an average size of 1.24 mm were achieved. The good efficiency of the process is attributed to high mass transfer in the CSTR reactor.

Introducción

En la actualidad, la humanidad enfrenta dos grandes retos producto del desarrollo no planificado de los últimos años. En primer lugar, disminuir el alto impacto ambiental que generan la mayoría de sus actividades, en particular las de índole industrial; y por otro lado, asegurarse la disponibilidad de energía suficiente para satisfacer la alta demanda actual y futura. En este sentido, el desarrollo de un portador de energía limpia y renovable que no utilice combustibles fósiles es uno de los retos tecnológicos de mayor interés a nivel mundial. Una de las opciones más atractivas es la utilización a gran escala de hidrógeno (H_2) como un portador de energía reciclable. Sin embargo, en la actualidad la producción industrial de H_2 consume grandes cantidades de combustibles fósiles (por ejemplo, gas natural), dando lugar a grandes emisiones de CO_2 . Es por este motivo que la producción de H_2 a partir de fuentes de energía renovables, en lugar de combustibles fósiles, ha suscitado gran interés en la comunidad científica y ambientalista.

El interés fundamental en el empleo de hidrógeno es que ofrece un enorme potencial como portador de energía sostenible, pues no genera gases de efecto invernadero, produciendo solamente agua cuando se da su combustión; adicionalmente, presenta un alto poder calorífico (122 kJ/g) y su valor energético es 2,75 veces más alto que el de los hidrocarburos (Jung et al., 2010). Este gas es empleado por muchas industrias a nivel mundial para una gran variedad de aplicaciones y usos, desde las industrias químicas y de refinería hasta las de metalurgia, vidrio y electrónicas (Ramachandran y Menon, 1998).

Dentro de los usos industriales del hidrógeno gaseoso se pueden citar: como reactivo en procesos de hidrogenación (para producir compuestos de menor peso molecular, saturar compuestos, romper hidrocarburos, remover compuestos sulfurados o nitrogenados), como colector de oxígeno molecular (remover trazas de O_2 para prevenir la oxidación y la corrosión), como portador de energía (combustible en motores de cohetes, celdas de combustible, combustible para motores de combustión interna), para mejorar las operaciones de soldadura y corte con plasma, y como refrigerante en generadores eléctricos debido a sus propiedades físicas únicas (Ramachandran y Menon, 1998; Praxair Technology, Inc., 2013; Verhelst, 2014).

Una alternativa con grandes expectativas es la producción de hidrógeno a partir de rutas de conversión de biomasa (fuente renovable de energía) mediante procesos biológicos. Entre estas rutas está la fermentación anaerobia, la cual consiste en la digestión de material orgánico por medio de microorganismos en ausencia de oxígeno. Entre las ventajas de este proceso está su capacidad de utilizar cualquier sustrato rico en carbohidratos, sus altas tasas de producción de hidrógeno (en comparación con otros procesos biológicos), es menos costoso que otros métodos que requieren de energía lumínica, y que las comunidades microbianas están disponibles en aguas residuales, compost anaeróbico o lodos profundos (Manish y Banerjee, 2008).

La utilización de reactores anaeróbicos de flujo ascendente UASB (del inglés Up-flow Anaerobic Sludge Blanket) para tratar aguas residuales altamente contaminadas, y a la vez producir hidrógeno, es una tecnología que está despertando gran interés, ya que ataca de una manera integrada los problemas ambiental y energético anteriormente mencionados. Los reactores UASB generalmente presentan un desempeño bueno y estable en la producción fermentativa de hidrógeno una vez que se han formado los gránulos productores de hidrógeno (GPH); sin embargo, el largo período de arranque para el desarrollo de los GPH sigue siendo un gran obstáculo para aplicaciones prácticas. Se cree que las colisiones celulares y su multiplicación (formación de flóculos de células), juegan un papel importante en el paso inicial de la formación de GPH. Los gránulos productores de hidrógeno, a diferencia de los gránulos metanogénicos, son una masa simple compuesta principalmente de acidógenos productores de hidrógeno, los cuales crecen rápidamente. No obstante, como en los reactores UASB no existe un mezclado mecánico, la capacidad de transferencia de masa es limitada; además, se necesita cierto tiempo para el lavado de la biomasa no activa (Jung et al., 2011).

Se ha reportado que en fermentaciones anaeróbicas que se lleven a cabo en reactores del tipo tanque completamente agitado CSTR (del inglés Continuous Stirred Tank Reactor) los microorganismos productores de hidrógeno se pueden flocular rápidamente a pesar de la existencia de altas fuerzas cortantes (Fang et al., 2002; Zhang et al., 2004; Zhang et al., 2007). Con base en lo anterior, Jung y

colaboradores (2011) sugirieron un método para reducir el tiempo de arranque del reactor UASB, el cual consiste en primeramente formar los gránulos en un reactor CSTR para luego transferirlos al reactor UASB. Siguiendo esta metodología, los investigadores lograron formar en 7 días de operación de un CSTR, gránulos con un tamaño de partícula promedio igual al proporcionado por un reactor UASB luego de 50 días de operación. El sustrato utilizado fueron aguas residuales de la manufactura de bebidas de café.

El objetivo principal de la presente investigación fue estudiar la formación de gránulos productores de hidrógeno en un reactor CSTR, con el fin de transferirlos luego a un reactor UASB y así acortar el tiempo de arranque de este último (González y Durán, en prensa). Para lograr tal objetivo, se realizaron dos réplicas experimentales, tanto para la obtención de las curvas de crecimiento de materia viable y no viable total, como para el arranque de la fermentación anaerobia de vinazas por medio del reactor tipo CSTR. El sustrato utilizado fueron vinazas provenientes de una agroindustria nacional productora de etanol a partir de melazas de caña de azúcar. La composición y carga orgánica de las vinazas (~70 000 mg DQO/L y elevados contenidos de Ca^{2+} , Mg^{2+} y Fe^{2+}) la convierten en un sustrato factible para la producción de H_2 . La presente publicación corresponde a un estudio exploratorio inicial, por lo que no se estudió aún mediante algún tipo de diseño estadístico, el efecto de variables de operación en la formación de los gránulos. Sin embargo, cabe resaltar que según el conocimiento de los autores, esta es la primera investigación que se lleva a cabo en Costa Rica explorando la posibilidad de utilizar vinazas para la producción fermentativa de biohidrógeno.

Materiales y métodos

Caracterización de las vinazas

En esta investigación se utilizaron vinazas procedentes de la planta de destilación de etanol del Ingenio Taboga, ubicado en Cañas, Guanacaste. La vinaza se usó sin la adición de nutrientes externos y se mantuvo refrigerada a 4 °C hasta que fuera a utilizarse; la concentración se ajustó a 20 000 mg DQO/L por medio de dilución con agua de la cañería. Se realizó una caracterización a la vinaza según los parámetros

de análisis obligatorio para vertidos de aguas residuales (MINAE, 2007), por medio de métodos estándar (APHA, 1999). Así mismo, se hizo un análisis de composición química en el cual se determinó la cantidad de N, P, Ca, Mg, K, S, Fe, Cu, Zn, Mn y B presentes. El nitrógeno se determinó por digestión húmeda con ácido sulfúrico y determinación colorimétrica en un analizador de inyección de flujo (FIA); el resto de elementos se determinaron por digestión con mezcla nitroclorhídrica y determinación por espectrofotometría de emisión atómica con plasma. Ambos análisis fueron realizados por el Laboratorio de Suelos y Foliarens del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica.

Caracterización de los lodos para inóculo

Los lodos para inocular se tomaron de un reactor UASB a escala industrial de la planta de tratamiento anaerobia de aguas residuales de la empresa *Alimentos Prosalud S.A.*, ubicada en Barranca, Puntarenas. A estos lodos se les realizó un pretratamiento térmico en baño maría a 100 °C durante 30 minutos (Woo y Song, 2010) con el objetivo de inhibir (destruir) las bacterias no productoras de hidrógeno. Se eligió el pretratamiento térmico pues es el más ampliamente usado en los estudios de producción fermentativa de hidrógeno (Wang y Wan, 2009). A los lodos tratados térmicamente se les determinaron los sólidos suspendidos volátiles, sólidos suspendidos totales y densidad aparente con base en métodos estándar (APHA, 1999). Adicionalmente, en la Facultad de Microbiología de la Universidad de Costa Rica se realizó una caracterización cualitativa de las cepas presentes en los lodos anaerobios por tinción de Gram luego de un tiempo de incubación de 72 horas a 37 °C, y por placas de Petri con medio de cultivo Agar sangre con base Brucella, suplementado con hemina y vitamina K1, tanto en atmósfera aerobia como anaerobia, luego de un tiempo de incubación de 48 horas a 37 °C.

Curvas de crecimiento de materia viable y no viable total

Se obtuvieron curvas de crecimiento de materia viable y no viable total en un cultivo de los lodos anaerobios tratados térmicamente, bajo las mismas condiciones de trabajo que fueron utilizadas en el proceso de formación de gránulos en el reactor CSTR. Con esto se determinó el tiempo necesario

para alcanzar la fase de crecimiento exponencial de las bacterias en cultivo mixto, y con ello saber el momento propicio para cambiar la operación del reactor CSTR de modo batch a continuo durante su arranque. La cantidad de materia viable y no viable total se cuantificó según Rodríguez y colaboradores (2005) por medio de mediciones de absorbancia (BioMate 3) de la mezcla a 600 nm. En la prueba se utilizó un erlenmeyer de 250 mL de volumen de trabajo con tapón de hule y conexiones para muestreo, el cual fue inoculado con un volumen de lodos pretratados equivalente a un 30% del volumen de trabajo (Jung et al., 2011) y se completó el volumen de reacción con vinaza diluida. El erlenmeyer se purgó con nitrógeno durante 10 minutos para brindar condiciones anaerobias, para luego mantenerlo con una agitación de 130 rpm y una temperatura de 35 °C en una incubadora.

Formación acelerada de gránulos productores de hidrógeno (GPH) en un CSTR

Para el estudio de la formación de gránulos formadores de hidrógeno se utilizó un erlenmeyer con un volumen de trabajo de 5,0 L como reactor tipo CSTR, el cual fue inoculado con lodos pretratados equivalentes a un 30% del volumen de trabajo (Jung et al., 2011) y se completó el volumen de reacción con vinaza diluida. El pH inicial se ajustó en aproximadamente 8,0 por medio de una solución de hidróxido de sodio 3M. Luego de purgar con nitrógeno durante 10 minutos para obtener condiciones anaerobias, la mezcla se mantuvo con agitación y a 37 °C por medio de una plantilla eléctrica (IKA C-MAG HS 7). La operación de este reactor tipo CSRT se inició en modo "batch" (por lotes) durante 70 horas hasta alcanzar la fase de crecimiento

exponencial (con base en los resultados obtenidos con las curvas de crecimiento). Al término de este período se cambió a modo continuo con un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 12 horas. El pH de operación se controló por medio de la adición de 10 g de NaHCO₃ por litro de vinaza cruda empleada y se mantuvo en aproximadamente 5,5. El biogás producido se recolectó y cuantificó en una probeta invertida llena de agua tal y como se aprecia en el esquema del arreglo experimental de la figura 1. El contenido de hidrógeno en el biogás se determinó por medio de un cromatógrafo de gases (Agilent technologies 6890 N) equipado con un detector de conductividad térmica y la columna capilar Carboxen-1010 PLOT. La temperatura del puerto de inyección y del detector fue 200 y 230 °C, respectivamente; la temperatura inicial y máxima de la columna fue 100 y 250 °C, respectivamente, con rampas de temperatura de 15 °C/min. Se utilizó nitrógeno como gas acarreador a un flujo de 4 mL/min y presión de 4,97 psi. Finalmente, la determinación del tamaño de los gránulos productores de hidrógeno (GPH) se hizo por medio de los microscopios biológicos trinoculares Nikon Eclipse E400 y Labophot, además de un vernier digital.

Resultados experimentales y su discusión

Caracterización de las vinazas

En el cuadro 1 se muestran los resultados de la caracterización físicoquímica de la vinaza empleada como sustrato en el presente proyecto. La vinaza presenta valores de pH ácidos y la mayor parte de sus sólidos corresponden a sólidos disueltos, los cuales son absorbidos por los microorganismos y

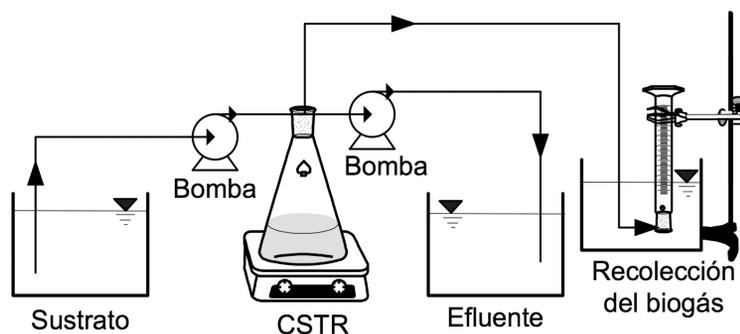


Figura 1. Representación esquemática del equipo empleado para la formación de gránulos productores de hidrógeno en un reactor tipo CSTR

Cuadro 1. Características fisicoquímicas de la vinaza utilizada como sustrato.

Parámetro	Valor
pH	4,19 ± 0,04
Sólidos Totales	(72956 ± 9) mg/L
Sólidos Disueltos	(69740 ± 9) mg/L
Sólidos Suspendedos Totales	(3216 ± 6) mg/L
Sólidos Sedimentables	(2,4 ± 0,2) mL/L
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	(69100 ± 1400) mg/L
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	(40300 ± 1600) mg/L
Grasas y aceites	(19 ± 1) mg/L
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	menor a 0,05 mg/L
Sulfitos (SO ₃ ²⁻)	menor a 0,5 mg/L
Fósforo (como P ₂ O ₅)	0,054 kg/m ³
Nitrógeno total (como N)	1,27 kg/m ³
Potasio (como K ₂ O)	3,53 kg/m ³
Calcio (como CaO)	0,91 kg/m ³
Magnesio (como MgO)	0,52 kg/m ³
Hierro (Fe)	0,09 kg/m ³
Cobre (Cu)	0,0009 kg/m ³
Zinc (Zn)	0,0012 kg/m ³
Manganeso (Mn)	0,0049 kg/m ³
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	1,63 kg/m ³
Grados Brix	5,0 °

almacenados en su interior para su posterior uso durante el metabolismo; las partículas en suspensión, las cuales se encuentran en baja concentración, son adsorbidas por los conglomerados biológicos, los cuales las utilizan poco a poco para obtener energía de ellas. La presencia casi nula de sólidos sedimentables hizo posible el bombeo continuo de este sustrato por medio de bombas peristálticas a flujos del orden de mililitros por minuto, sin generar problemas por taponamientos.

La relación DBO₅/DQO igual a 0,58 hace de esta vinaza un sustrato factible para la producción fermentativa de hidrógeno, ya que si tal relación es mayor a 0,5, se considera que dichas aguas son fácilmente tratables por medio de procesos biológicos; si esta relación es menor a 0,3, el agua residual puede tener compuestos tóxicos o se pueden

necesitar microorganismos aclimatados para su estabilización (Crites y Tchobanoglous, 2000).

En cuanto a los macronutrientes presentes en la vinaza, el potasio y el nitrógeno son los que se encuentran en mayor cantidad, seguidos por el calcio; el hierro el que posee la mayor concentración entre los micronutrientes. Lo anterior es de vital importancia dado que estas sustancias son necesarias para el crecimiento y la reproducción de la masa celular. Adicionalmente, se ha reportado que la presencia de cationes divalentes como Ca²⁺, Fe²⁺ y Mg²⁺ puede promover la formación de GPH, ya que los microorganismos generalmente presentan superficies con carga negativa, lo cual disminuye la posibilidad de formación de agregados bajo condiciones naturales, y dichos cationes pueden otorgar una adhesión efectiva e irreversible de los microorganismos por medio de la alteración del estado iónico de la superficie de la célula (Jung et al., 2010). A pesar de que existe cierto desacuerdo respecto a las proporciones recomendadas de los macro y micronutrientes, los valores mostrados en el cuadro 1 se encuentran dentro de los ámbitos reportados como óptimos por distintos investigadores (Wang y Wan, 2009).

La baja concentración de cobre y zinc representa otra ventaja, ya que dichos metales pesados en altas concentraciones pueden ser tóxicos para el sistema. La presencia de sulfato (segunda especie en mayor concentración) es una desventaja, pues este podría ser utilizado por las bacterias sulfatoreductoras como aceptor de electrones, consumiendo el H₂ (donador de electrones) y generando cantidades importantes de H₂S (Rodríguez, 2004); sin embargo, durante el desarrollo de este proyecto no se detectó a nivel olfativo la presencia de este compuesto. La concentración tolerable de los metales pesados mencionados con anterioridad depende de la presencia de sulfuros, ya que se pueden combinar para formar sales insolubles.

Caracterización de los lodos para inóculo

Por medio de la tinción de Gram, se encontró que tanto los lodos tratados térmicamente como los que no fueron tratados presentaron morfología microscópica mixta: Bacilos Gram positivos esporulados con esporas centrales, subterminales y terminales; Bacilos Gram negativos y Cocos Gram positivos. Por medio de placas de Agar sangre en

atmósfera aerobia, se encontró que ambas placas (antes y después del tratamiento térmico de los lodos) presentaron una morfología colonial mixta similar: Bacilos Gram negativos entéricos y no entéricos, *Bacillus* s.p., *Streptococcus* s.p. y *Staphylococcus* s.p.. Por otra parte, con placas de Agar sangre en atmósfera anaerobia con Neomicina, se encontró que ambas placas (antes y después del tratamiento térmico de los lodos) presentaron crecimiento de un *Clostridium* s.p. casi en cultivo puro e idéntico en ambos casos, formador de “swarming”.

Con base en el análisis bacteriano, se puede interpretar que el inóculo utilizado en este estudio estaba compuesto por géneros asociados con la fermentación anaerobia, los cuales incluyen tanto bacterias productoras de hidrógeno como las que lo consumen (Ramírez, 1992). El fenómeno de “swarming” presentado por las bacterias del género *Clostridium* s.p. equivale a un tipo de desplazamiento que exhiben algunas bacterias al crecer en medios de cultivo sólidos y que podría representar adaptaciones a condiciones ambientales propias para algunos micronichos determinados; este fenómeno se asocia con un comportamiento indeseable, el cual forma una película de crecimiento que obstaculiza el aislamiento de cualquier otro agente (Hernández y Rodríguez, 2009). A la luz de los resultados obtenidos, sería conveniente realizar en futuras investigaciones un análisis bacteriano más específico con el fin de identificar las especies (no solamente

los géneros) presentes en los lodos anaerobios, tanto en los inoculados al reactor, como en los que se obtienen luego del proceso fermentativo.

Adicionalmente, se determinó que los lodos inoculados al reactor CSTR tenían una concentración de sólidos suspendidos totales de 2,326 g/L, sólidos suspendidos volátiles de 1,708 g/L y una densidad aparente de 10,8 g/L.

Curvas de crecimiento de materia viable y no viable total

Con el objetivo de conocer el tiempo de crecimiento aproximado de las bacterias en cultivo mixto, se generaron las curvas de crecimiento bacteriano mostradas en la figura 2, donde se puede apreciar que alrededor de las 20 y 120 h se encuentra la fase de crecimiento exponencial. En esta fase las células se dividen regularmente a un ritmo constante, por lo que el grado de desarrollo es máximo (Rodríguez, 2006). Basados en estos resultados, se seleccionó un tiempo igual a 70 horas como parámetro de referencia para cambiar el modo de operación de “batch” a continuo en la etapa de arranque del reactor CSTR y lograr de esta forma optimizar la formación de GPH.

Formación acelerada de gránulos productores de hidrógeno (GPH) en un CSTR

La figura 3 muestra las variaciones diarias en la generación de biogás e hidrógeno molecular durante la

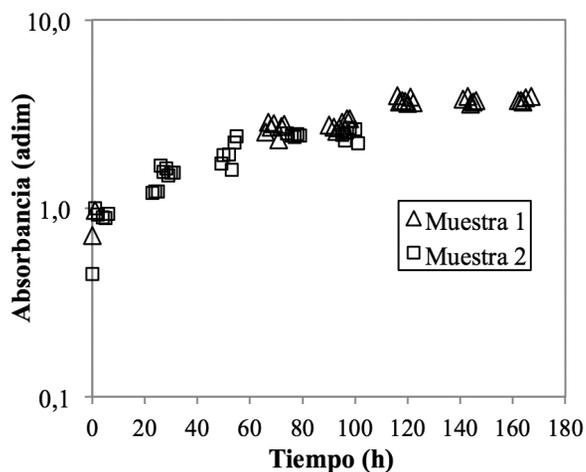


Figura 2. Curvas de crecimiento de materia viable y no viable total en los lodos anaerobios tratados térmicamente

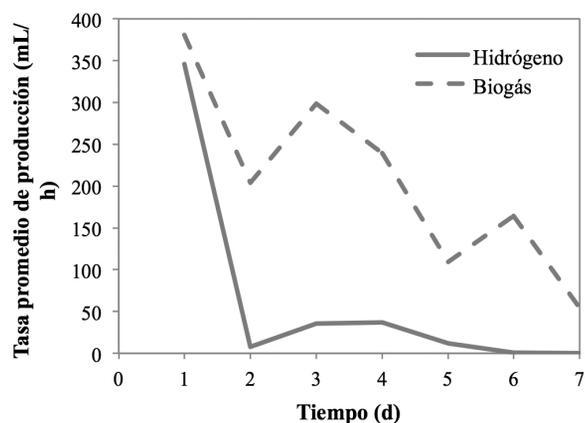


Figura 3. Tasa promedio de producción de biogás y de hidrógeno molecular respecto al tiempo durante el arranque del proceso de fermentación en un reactor CSTR

formación de GPH en el reactor CSTR a un TRH de 12 horas. Tal como se aprecia, tanto la tasa de producción de biogás como la de hidrógeno presentan una disminución súbita al pasar de modo "batch" a continuo (luego de un periodo de 3 días); la tasa de producción de biogás presenta variaciones descendentes aleatorias hasta llegar a un valor de aproximadamente 55,0 mL/h, mientras que el hidrógeno disminuye hasta valores entre 0,108 y 0,713 mL/h.

Se cree que el bajo desempeño en el reactor CSTR durante los últimos días puede deberse a la actividad de bacterias no productoras de hidrógeno presentes en el inóculo o en el sustrato, especialmente de bacterias lácticas (Jung et al., 2010), o bien, debido al lavado excesivo de biomasa en el reactor. Sin embargo, los GPH formados hasta el día 7 presentaron excelentes características de tamaño, lo cual se discutirá en el siguiente párrafo. Además, cuando estos GPH se utilizaron para iniciar la operación de un reactor UASB, la producción de H₂ en éste fue inmediata tal y como se reporta en González y Durán (en prensa). Es importante mencionar que en ninguno de los análisis realizados a las muestras de biogás producido se detectó la presencia de metano. Este resultado demuestra la efectividad del pretratamiento térmico empleado para inhibir a las bacterias metanogénicas en los lodos de inoculación.

En el cuadro 2 y la figura 4 se muestran los resultados obtenidos en la determinación del tamaño de

Cuadro 2. Tamaño de gránulos productores de hidrógeno formados luego de 7 días de operación en un reactor CSTR.

Dimensiones	Mínimo	Máximo	Promedio
Largo (µm)	207,8	2538,0	1278,8
Ancho (µm)	237,3	2168,8	1188,5

los gránulos productores de hidrógeno al finalizar la operación de 7 días del reactor CSTR. Con base en los datos obtenidos se puede concluir que el arranque por medio del uso de un reactor CSTR ayuda en gran manera a disminuir el tiempo de formación de los GPH, donde al cabo de 7 días de operación se obtuvieron gránulos con un tamaño promedio de 1,24 mm (1,28 mm de largo × 1,19 mm de ancho). Esta alta velocidad de formación de gránulos se le atribuye a la agitación mecánica con que cuenta el reactor CSTR, la cual aumenta la transferencia de masa durante el proceso de su formación. Siguiendo esta misma metodología, Jung et al. (2011) reportan haber obtenido un tamaño promedio de partícula de 0,42 mm luego de los 7 días de operación utilizando aguas residuales de la manufactura del café. El mayor tamaño de gránulos obtenidos en este estudio se pudo deber a las favorables

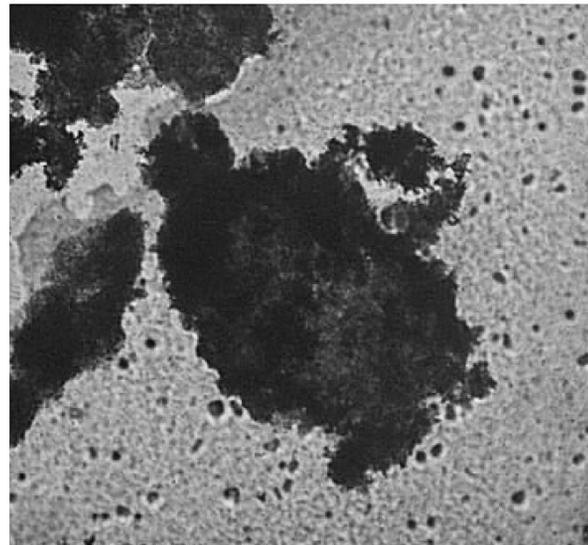
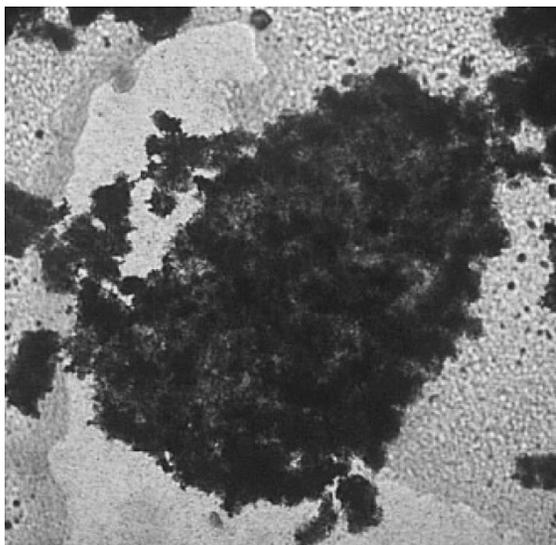


Figura 4. Gránulos productores de hidrógeno formados en el reactor CSTR (Objetivo del microscopio en 4X)

características fisicoquímicas de la vinaza empleada. En contraste, siguiendo un arranque tradicional de un reactor UASB, Jung et al. (2011) obtuvieron el mismo tamaño de partícula hasta luego de 50 días de operación; y Mu y Yu (2006) reportan gránulos de 0,4-0,5 mm luego de 140 días de arranque de un reactor UASB alimentado con agua residual sintética rica en sacarosa.

Dado que los GPH son una masa simple compuesta principalmente de acidógenos productores de hidrógeno, el tamaño de los mismos es proporcional a la generación de dicho gas, y por ende, al consumo del sustrato a degradar que funciona como fuente primaria de nutrientes para las bacterias involucradas en este proceso. Adicionalmente, el tamaño de los GPH influye directamente en el TRH del reactor, por lo que contar con gránulos de buen tamaño hace que utilizar largos TRH pueda ser innecesario (Jung et al., 2011).

Conclusiones

Los resultados obtenidos en este estudio demuestran que es posible utilizar las vinazas de la producción de bioetanol a partir de melazas de caña de azúcar para producir hidrógeno molecular mediante la fermentación anaerobia de éstas. La composición química y características físicas de estas vinazas las hacen un excelente sustrato.

La producción de hidrógeno por medio de fermentación anaerobia de vinazas evidencia ser una posible manera integrada de abarcar los problemas ambiental y energético que enfrenta la humanidad actualmente, por lo que es indispensable mejorar los existentes, y encontrar nuevos procesos y tecnologías viables para la producción industrial de hidrógeno molecular.

Por otro lado, el tratamiento térmico que se le realizó a los lodos anaerobios fue efectivo en lo que respecta a la inhibición del crecimiento de las bacterias metanogénicas, por lo que se recomienda continuar usando este método en futuras investigaciones y aplicaciones.

La fermentación anaeróbica de las vinazas durante 70 horas en modo batch y posteriormente durante 7 días en modo continuo tipo CSTR demostró ser un procedimiento efectivo para acelerar la formación de los gránulos productores de hidrógeno,

lográndose obtener gránulos con un tamaño promedio de 1,24 mm. La alta eficiencia del proceso se le atribuye a la considerable transferencia de masa que se obtiene en el reactor CSTR.

El presente estudio es el primero que se reporta en Costa Rica sobre la utilización de vinazas nacionales para la producción de biohidrógeno mediante fermentación anaeróbica utilizando lodos con cepas mixtas como inóculo. Los resultados favorables que se obtuvieron, y el hecho de que la presente investigación es un estudio exploratorio inicial, instan a continuar investigando sobre la posibilidad de tratar las vinazas mediante este método, y con los gases producidos, generar energía eléctrica (por ejemplo).

Agradecimientos

Los autores desean agradecer la colaboración brindada para realizar este proyecto al Ingenio Taboga, al Centro de Electroquímica y Energía Química y al Laboratorio de Productos Forestales de la Universidad de Costa Rica. Además al Ing. Rodolfo Wattson Gómez por sus valiosos comentarios.

Bibliografía

- APHA. (1999). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Washington, DC: American Public Health Association.
- Crites, R., Tchobanoglous, G. (2000). *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. Bogotá: McGraw-Hill Interamericana, S.A.
- Fang, H.H.P., Liu, H., Zhang, T. (2002). *Characterization of a hydrogen-producing granular sludge*. *Biotechnology and Bioengineering*, 78, 44–52.
- González, C., Durán, J.E. (en prensa). *Producción de hidrógeno a partir del tratamiento anaerobio de vinazas en un reactor UASB*. *Tecnología en Marcha*.
- Hernández, F., Rodríguez, E. (2009). *El fenómeno de "swarming" y otros tipos de desplazamiento bacteriano*. Recuperado de: <http://www.binasss.sa.cr/revistas/rccm/v14n1-2/art6.pdf>
- Jung, K., Kim, D., Shin, H. (2011). *A simple method to reduce the start-up period in a H₂-producing UASB reactor*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36, 1466–1473.
- Jung, K.W., Kim, D.H., Shin, H.S. (2010). *Continuous fermentative hydrogen production from coffee drink manufacturing wastewater by applying UASB reactor*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 13370–13378.
- Manish, S., Banerjee, R. (2008). *Comparison of biohydrogen production processes*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33, 279–286.

- MINAE. (2007). *Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales*. Decreto 33601. San José.
- Mu, Y., Yu, H. (2006). *Biological hydrogen production in a UASB reactor with granules. I: Physicochemical characteristics of hydrogen-producing granules*. *Biotechnology and Bioengineering*, 94, 980–987.
- Praxair Technology, Inc. (2013). *Uses and applications of hydrogen gas and liquid hydrogen by industry*. Recuperado de: <http://www.praxair.com/gases/buy-compressed-hydrogen-gas-or-liquid-hydrogen#?tab=applications>
- Ramachandran, R. & Menon, R. (1998). *An overview of industrial uses of hydrogen*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 23, 593-598.
- Ramírez, F. (1992). *Degradación anaerobia de acetamida*. Tesis para obtener el grado de Maestría en Biología Experimental. México D.F.: Universidad Autónoma Metropolitana. Recuperado de: <http://148.206.53.231/UAM7094.PDF>
- Rodríguez, E., Gamboa, M., Hernández, F., García, J. (2005). *Bacteriología General: Principios y prácticas de laboratorio*. San José: Editorial de la Universidad de Costa Rica.
- Rodríguez, F. (2006). *Prácticas de Microbiología*. San Juan: Universidad Miguel Hernández.
- Rodríguez, J. (2004). *Tratamiento anaerobio de aguas residuales*. Recuperado de: <http://www.ingenieroambiental.com/4014/tratamiento545.pdf>
- Verhelst, S. (2014). *Recent progress in the use of hydrogen as a fuel for internal combustion engines*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39, 1071-1085.
- Wang, J. & Wan, W. (2009). *Factors influencing fermentative hydrogen production: A review*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, 799–811.
- Woo, J.H. & Song, Y.C. (2010). *Influence of Temperature and Duration of Heat Treatment Used for Anaerobic Seed Sludge on Biohydrogen Fermentation*. *Journal of Civil Engineering*, 14, 141–147.
- Zhang, J.J., Li, X.Y., Oh, S.E. & Logan, B.E. (2004). *Physical and hydrodynamic properties of flocs produced during biological hydrogen production*. *Biotechnology and Bioengineering*, 88, 854–860.
- Zhang, Z.P., Show, K.Y., Tay, J.H., Liang, D.T., Lee, D.J. & Jiang, W.J. (2007). *Rapid formation of hydrogen-producing granules in an anaerobic continuous stirred tank reactor induced by acid incubation*. *Biotechnology and Bioengineering*, 96, 1040–1050.

Lineamientos para la manufactura de partes de alta precisión

Guidelines for high precision manufacturing

Natalia Robles-Obando^I

*Fecha de recepción: 21 de enero del 2014
Fecha de aprobación: 26 de abril del 2014*

Robles-Obando, N. Lineamientos para la manufactura de partes de alta precisión. *Tecnología en Marcha*, Vol. 27, N° 1. Pág 48-56

^I Profesor Adjunto, Escuela de Ingeniería en Producción Industrial, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica. Correo electrónico: nrobles@itcr.ac.cr. Tel. 2550-9207.

Palabras clave

Manufactura de partes; alta precisión.

Resumen

La asignación de tolerancias para las dimensiones de las partes tiene un efecto importante tanto en el costo de la manufactura como en su calidad. Una manufactura muy precisa implica designar tolerancias estrictas para las dimensiones, lo que se traduce en un alto costo del producto. Actualmente, la filosofía de calidad consiste en buscar la excelencia. La investigación que se resume en este artículo tuvo como objetivo establecer los factores que influyen en la mejora de las prácticas de manufactura de partes de acoples o ensambles.

Estos factores resultaron ser el ajuste requerido para el acople final, los equipos y herramientas disponibles para el maquinado, el sistema de producción, los equipos y métodos de medición, las condiciones ambientales durante el proceso, el tamaño de las partes, los métodos de manipulación, así como el material utilizado y los procesos o usos posteriores. En la investigación también se estudió el impacto de la filosofía de calidad usada para la manufactura, encontrando que la exactitud de la máquina determina en gran medida la capacidad de cumplimiento de los valores dimensionales especificados.

Key words

Parts machining; high precision.

Abstract

Tolerances for dimensions have a great impact in manufacturing costs and quality. When tolerances for dimensions are strict the manufacturing costs increase. Today's quality philosophy concentrates on search for excellence. This research objective was to determine the factors that influence the improvement of manufacturing practices of assemblies. Among the factors found are the assembly allowance or fit, the machining equipment and tools, the production system, the measurement equipment and methods, the environmental conditions of the process, the parts size and manipulation methods, the material and future use and process of the parts. The quality philosophy also was considered, in fact, it showed to have a great impact. The machine accuracy also had a great impact in achieving final dimensions.

Dimensiones y tolerancias

Bjorke (1989) define dimensión como una dimensión geométrica de longitud o ángulo, que tiene un elemento de referencia que puede ser la superficie de una parte pero también un centro de línea o un plano de referencia. El diseñador de la parte es el que determina el elemento de referencia, basado en un análisis de los requerimientos funcionales de las partes. La zona de tolerancia para la dimensión está definida por su tamaño y su posición en relación con el tamaño básico de la dimensión. El tamaño de la tolerancia es la diferencia entre los límites máximo y mínimo para la dimensión. Los estándares de los fundamentos para el diseño de productos y procesos, así como de los dibujos técnicos, están definidos en ASME Y14.5M-1994 y ASME Y14.5.2-2000GDTP. Fowlkes y Creveling (1995) indican que el tema de la geometría dimensional y tolerancia (GD&T) es un proceso de comunicación de especificaciones que se enfoca en el desarrollo de un modelo gráfico del diseño después de que el modelo analítico y físico ha sido desarrollado a través de tolerancias.

Wortman (2006) define una tolerancia bilateral cuando se permite hacia ambos lados del elemento de referencia una desviación positiva para la dimensión de la parte. Maghsoodloo (2000) señala que se designan tolerancias unilaterales cuando las desviaciones del valor especificado se permiten solo para un extremo, ya sea solo una desviación mayor, con un límite permisible superior, o por el contrario solo una desviación inferior, con un límite permisible solo inferior.

Hay procesos de manufactura, como los de maquinado de roscas, que usan tolerancias unilaterales en los diseños de sus partes debido a que la variación ocurre en una dirección. Bengtson (2008) sugiere que este hecho se debe reconocer para poder calibrar el parámetro objetivo en el maquinado. Maghsoodloo (2000) también indica la existencia de tolerancias asimétricas para el maquinado, que son casos donde la tolerancia especificada es mayor hacia un extremo que hacia el otro, es decir, cuando no hay proporcionalidad. Las tolerancias, unilaterales o asimétricas, representan la situación de muchas piezas, donde la desviación hacia un lado del valor de la dimensión meta es más perjudicial que hacia otro.

Bjorke (1989) considera que es imposible la manufactura de partes exactamente iguales, y más allá

tampoco es necesario. McMahon (1998), en sus guías para la simplificación y estandarización en el diseño de productos, estima que los diseñadores deben procurar evitar el uso de tolerancias ajustadas o acabados de superficie de alta calidad. Es por eso que Fowlkes y Creveling (1995) indican que designar el valor meta de la dimensión, así como el valor de sus tolerancias, implica balancear el costo del producto con la calidad.

Según Maghsoodloo (2000), ante tolerancias asimétricas, los diseñadores acostumbra reducir las a un solo valor y asignarlas entonces bilateralmente, o bien colocar el valor meta en medio de ambas tolerancias. En los casos de elementos acoplados, lo primordial es lograr el ajuste especificado para el acople y es en función de éste como se establecen las tolerancias para las partes. Tanto las tolerancias como los ajustes los establecen los ingenieros bajo la consideración de la incertidumbre del diseño y de la producción.

Mehta (2010) también indica que la práctica usual en el maquinado de partes, cuyos diseños establecen tolerancias del tipo unilateral, es colocar como objetivo dimensional meta el valor central entre el objetivo y la tolerancia unilateral. Este mismo autor considera que en ocasiones se usan las tolerancias como si fueran límites permisibles para la especificación dimensional. Dicha práctica se realiza bajo el concepto de que todo lo que se encuentre entre el valor meta y el límite permitido cumple con las especificaciones y por ende no corresponde a un defecto, propio de la filosofía de Cero Defectos. Esta práctica confunde el sentido de la asignación de una tolerancia a una dimensión. Burton (2012) apunta que las filosofías de mejoramiento actuales se basan en un concepto de búsqueda de la excelencia.

Fowlkes y Creveling (1995) afirman que las tolerancias que se asignan a las dimensiones impactan tanto el costo como la calidad de la manufactura y llegan a impactar incluso el nivel de satisfacción del cliente. Creveling (1997) sugiere contabilizar en el costo del ciclo de vida del producto los costos incurridos por las reparaciones o incluso la reposición del producto, que son los costos de un desempeño desviado del cumplimiento del objetivo, a pesar de estar dentro de la tolerancia permitida para la dimensión. La satisfacción del cliente se ve afectada al no cumplir la parte con las especificaciones. Creveling (1997) considera la función de pérdida de la calidad de Taguchi para la toma de decisiones respecto a las

tolerancias. De esta manera, los esfuerzos de mejora deben estar orientados a reducir la variación entre el desempeño meta y el real, para que la pérdida sea cada vez más pequeña. La función pérdida de calidad de Taguchi contrasta con el pensamiento que solo penaliza cuando se está fuera de las especificaciones. Taguchi, en sus imperativos para la calidad, propone que las tolerancias se definan antes de la manufactura, pues de esta forma se podría determinar la función de pérdida de la calidad antes de la manufactura. Al-Ansary y Deiab (1997) presentan una investigación del balance de estos aspectos, buscando optimizar la designación de las tolerancias que impliquen cumplir con aspectos de calidad al menor costo posible.

La obtención de resultados más cercanos a los meta es una tarea que según Lin y otros (1997) solo puede darse cuando se ha conseguido cierto nivel de capacidad del proceso, pues solo cuando un proceso ha logrado tener capacidad, necesariamente mediante la inversión en aspectos como la planta, el equipo, la maquinaria o la capacitación al personal, es cuando podrá tener resultados más precisos o alta precisión en la manufactura. Un proceso se cataloga como capaz cuando su dispersión tiene forma de campana y su rango de variación es menor a lo que los límites de la especificación permiten para el producto.

Metodología de la investigación

Con base en los hallazgos de la investigación de las prácticas actuales de manufactura de partes, y según lo encontrado en la revisión de la literatura, se establecerán los factores o lineamientos por considerar para la mejora de las prácticas y posteriormente se presentarán en un modelo para guiar la manufactura bajo la consideración de estos.

Factores por considerar en la manufactura de partes

A continuación se presentan los factores que en la investigación se identificaron como importantes para la mejora de las prácticas de manufactura de partes de acoples o ensamblajes.

1. Ajuste requerido para el acople final

Los estándares de geometría dimensional y tolerancia (GT&D) establecen cinco tipos básicos de

ajustes. La American Society of Mechanical Engineers (ASME), en sus estándares, como el ASME Y 14-5-2009, presentan las tolerancias para especificaciones para distintos tipos de ajustes, por ejemplo holgado, medio, ajustado, etc.). Estos estándares son una herramienta para el diseño, pues permiten uniformidad en las especificaciones e interpretaciones y según la ASME reducen el trabajo de manufactura por esta claridad en el diseño. Existen otras normas para el diseño, como ISO 286, aunque las de la ASME son las preferidas.

Este detalle es fundamental, pues generalmente el ajuste final es el que determina su calidad. Los diseños usualmente se plasman en planos, que para el caso de los ensamblajes deben considerar la tolerancia del ensamble final y no solo el reporte aislado de cada pieza.

Un aspecto que se debe destacar respecto al ajuste de los acoples de piezas es que en la investigación se encontró la necesidad de mejorar el dominio de esta técnica para comprender a cabalidad el concepto de la tolerancia del ajuste y el traslado de esa tolerancia hacia las partes del acople.

2. Equipos y herramientas para el maquinado

La capacidad de maquinado está dada por la precisión de la herramienta, incluso más allá de si el maquinado es CNC o es en máquina convencional. En la investigación se encontró que si bien el maquinado CNC conlleva una serie de bondades, no es necesariamente determinante al hablar de lograr o no una dimensión final. La habilidad del operador es determinante siendo éste el que saca provecho de las herramientas disponibles.

Hay que destacar que el factor anterior está ligado al sistema de producción; ya sea un sistema por proceso o taller o un sistema de producción repetitivo. La maquinaria CNC requiere elaborar el programa para maquinar la parte, lo que es atractivo para altos volúmenes de producción pero no tanto para bajos.

3. Equipos para la medición

Los equipos de medición de dimensiones deben tener la capacidad de medir las especificaciones indicadas para poder garantizar que se revisará si se está logrando la precisión buscada. Este equipo requiere además un mantenimiento y calibración periódicos. Sin embargo, cabe destacar que el equipo calibrado

que no permita determinar las mediciones requeridas igualmente no es apto para el proceso. Por tanto, en general se puede decir que el equipo debe tener la resolución adecuada. Este equipo puede implicar desde medidores de altura hasta calibradores especiales (gages) según la pieza y la precisión de la dimensión final que se busca. Este factor se debe revisar desde el diseño de la parte pues la dimensión meta que se requiere debe poder medirse.

4. Métodos de medición

Además del equipo de medición, entra en juego el método de medición, pues pequeños detalles, como sujetar con la mano una pieza aplicando alguna fuerza mínima, pueden alterar la dimensión meta aunque no sea más que por un par de minutos.

Además, los métodos que se siguen al realizar las mediciones se deben estandarizar entre los operadores, para reducir la probabilidad de cometer errores debido al método seguido o diferencias entre operadores.

5. Condiciones ambientales

El control ambiental del proceso se aplica tanto para la producción como para la medición. Durante la medición se debe controlar el ambiente, porque cuando se habla de alta precisión (por ejemplo, de 1×10^{-4}) las dimensiones son sensibles a cambios. Si las piezas se almacenan en un ambiente caliente podrían también alterarse sus dimensiones. También la alta precisión de los equipos de medición para estos casos hace que requieran en su mayoría de un ambiente controlado. En la investigación se encontró bastante control de este aspecto en la práctica, sin embargo, por su impacto es importante recalcar la necesidad de controlar tanto el ambiente de trabajo como el de la medición.

6. Manipulación de las partes

Existe gran sensibilidad en la manipulación de las partes cuando sus dimensiones meta son de alta precisión, al extremo de que debe cuidarse incluso la sujeción de las piezas y evitar su caída. En los casos que implican una serie de procesos adicionales al maquinado, por ejemplo, procesos de soldadura, la posibilidad de sufrir una alteración o incluso desprendimientos es mayor (un caso patente de la necesidad de cuidar la manipulación la presentan los moldes).

7. Tamaño de las partes

En el caso de las partes de grandes dimensiones, el maquinado es más complejo; un caso pueden representarlo incluso algunos moldes para inyección de plásticos.

En estos casos se puede requerir extremar el cuidado en la manipulación y transporte de las piezas, a pesar de que en las de gran tamaño las precisiones no son tan altas. Usualmente su geometría es compleja o con partes soldadas y por eso se deben manipular con cuidado.

8. Procesos posteriores

Los procesos posteriores a los que se someterá la parte deben ser considerados desde el diseño. Por ejemplo, un molde que se usará en un proceso de inyección de plástico, si su geometría es compleja y contiene partes soldadas, su uso posterior a altas temperaturas deteriorará eventualmente las juntas de soldadura.

9. Material

Este factor, quizás elemental, es conveniente detallarlo. El acero se encuentra en una gran gama de posibles aleaciones, de manera que es importante reconocer el material con el que se trabajará al establecer la dimensión objetivo para la pieza, pues en algunos materiales se podrá trabajar con valores más precisos y en otros no tanto. En el caso de materiales como las resinas plásticas, también existen muchas posibles combinaciones, por lo que se debe revisar el material previamente a la manufactura. Además, el material incide en la selección de los equipos, maquinaria y herramientas por utilizar. Este factor puede ser externo cuando el cliente lo especifica o interno cuando está sujeto a la decisión del fabricante.

10. Filosofía de calidad

La filosofía de calidad se incluye porque define las características del producto final. Cuando se tiene una filosofía de calidad de cumplimiento del objetivo se buscará lograr la dimensión meta y no limitarse a estar dentro de los límites permitidos. Una búsqueda de cumplimiento con lo especificado es fundamental para un maquinado preciso. Sin embargo, la filosofía de calidad conlleva un costo de la calidad.

Actualmente, la tendencia en la filosofía de calidad consiste en la excelencia. Una filosofía de excelencia

conlleva un incremento en el costo de la manufactura, pero permite una reducción en los reclamos por el incumplimiento de los márgenes de ajuste. Los costos de reparaciones o reposiciones se han incrementado debido a políticas más exigentes de servicio al cliente y al aumento de las demandas legales por productos que incumplen las garantías ofrecidas por el fabricante, por lo que sobresale la importancia de una manufactura más precisa.

Modelo para la manufactura de partes de acoples

Para la mejora de las prácticas de manufactura conviene integrar los factores que se identificaron como importantes para la manufactura de partes de acoples o ensambles, en un modelo apropiado. En la figura 1 se esquematizan estos requisitos categorizados como aspectos internos, que obedecen a decisiones internas que se deben controlar; los aspectos externos corresponden a decisiones externas que no se pueden controlar pero que no se deben perder de vista pues los aspectos internos tienden a oscurecerlos. También se incluyen aspectos conexos, como el material, y aspectos tecnológicos, como la maquinaria y equipos, que ciertamente son de carácter interno pero que también obedecen a la tecnología disponible en el mercado.

Los aspectos internos se colocan en una segunda fase porque son aspectos sobre los que se tiene control. Precisamente en estos aspectos internos radica la mejora de las prácticas de manufactura mediante la búsqueda del balance de aspectos de la geometría de las partes, las tolerancias requeridas, el tamaño de los lotes de producción y los costos.

Prueba del modelo para la manufactura de partes de acoples

El modelo o guía se probó en un caso experimental de un acople comúnmente conocido como del pin que se inserta en un agujero (*shaft and hole*). El acople se muestra en la figura 2.

Para esta prueba muchos de los factores se darán por satisfechos sin mayor discusión, para poder valorar en mayor detalle el impacto de las tolerancias sobre la precisión de las dimensiones.

Aspectos externos:

- Ajuste final: Del estudio funcional se determinó una holgura "clearance" necesaria entre el pin y el agujero de 0,04mm.
- Tamaño de las partes: En unas piezas de 100mm se hace un agujero, según lo indicado en el plano, de 10,04mm, en el que se inserta un pin de 10mm.

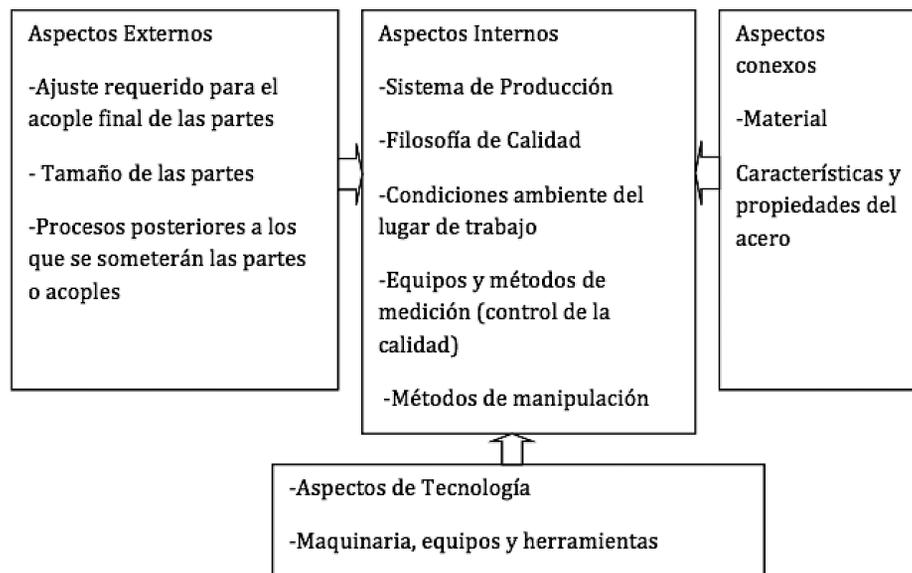


Figura 1. Modelo para mejorar las prácticas de manufactura de partes de acoples.

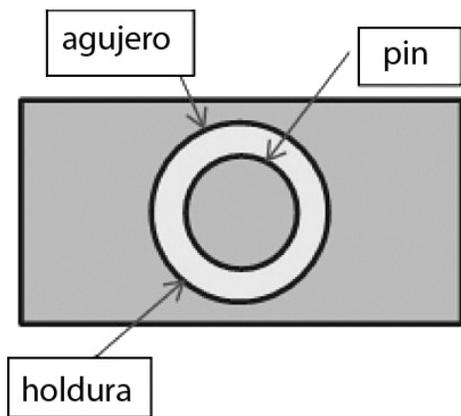


Figura 2. Caso del pin que se inserta en un agujero (vista superior).

- Procesos posteriores: Las partes no se someterán a procesos posteriores y en su uso no se expondrán a temperaturas extremas ni a golpes.

Aspectos conexos:

Material por procesar: Fue un acero O1 para fabricar las partes, por ser familiar para el operador de la maquinaria y adecuado para la herramienta disponible.

Aspectos de tecnología:

Equipos y herramientas: Se utilizó una fresadora CNC y una herramienta "fresa" de 5mm.

Aspectos internos:

- Manipulación de las partes: Para este caso las dimensiones y geometría de las partes, así como el bajo volumen de producción, permitieron una simple manipulación.
- Condiciones del ambiente: Las condiciones ambientales se mantuvieron a una temperatura de entre 20 y 25° C, la cual no afecta el nivel de precisión alcanzada en las partes.
- Equipo y método de medición. Se utilizó un vernier digital; sin embargo, es conveniente usar un equipo de mayor capacidad. Para la medición se controló la forma de sujeción de la pieza y la temperatura ambiente.
- Filosofía de calidad: Para evidenciar el impacto de la filosofía aplicada se simularon dos escenarios, uno bajo una filosofía de alto cumplimiento con el objetivo y otro que se limita a estar dentro

de los límites permitidos de tolerancia (Filosofía Cero Defectos).

Supóngase que los pines eran calibrados a 10mm, obligando al agujero a ser de 10,04 mm, de lo contrario el espacio libre no sería de 0,04mm. Por tanto, la especificación para el agujero sería de 10,04 -0 (para impedir diámetros inferiores a 10,04 mm). Sin embargo, para la manufactura conviene establecer un valor de tolerancia, pues de lo contrario una cantidad del producto estará fuera de especificación y se rechazará. El rango de la tolerancia de la máquina fresadora que hará el agujero puede usarse de referencia. Sin embargo, la filosofía de calidad que se siga influye bastante. A continuación se detalla el procedimiento para la designación del valor meta para la manufactura según estas dos filosofías de calidad. Para el ejemplo, se consideró inicialmente un rango de la tolerancia de 0,05 mm para la fresadora.

- Prueba 1: Filosofía de calidad: Cero Defectos

Con una tolerancia unilateral de la máquina de (+0,05 – 0) se establecería como valor máximo para la dimensión 10,09 y como límite mínimo 10,04. Si se usan estos valores como si fueran límites permisibles para la dimensión, buscando "Cero Defectos" el valor meta por maquinarse como dimensión para el agujero sería $(10,09+10,04)/2= 10,065$.

En un proceso bajo control, los diámetros de los agujeros presentarán un comportamiento de distribución de probabilidad normal (Teorema del Límite Central), con media μ y desviación estándar σ . Partiendo de la afirmación anterior se puede esperar que aproximadamente un 99,73 de los diámetros estará dentro del intervalo $\mu \pm 3\sigma$.

- Resultados esperados

Con el pin de 10mm y el agujero manufacturado a 10,065, el espacio libre promedio será de 10,065-10,00= 0,065 mm. Para un proceso estable y en control, la desviación de los diámetros de los agujeros se puede obtener del rango de tolerancia de la máquina. Asumiendo el proceso de producción de la máquina bajo control se tiene: $6\sigma= 0.05$, por lo que $\sigma=0,0083$.

- Prueba 2: Filosofía de Calidad: En el objetivo (On Target)

Si se utiliza la misma máquina pero se acerca el valor meta por maquinarse para la dimensión al objetivo

de 10,04, por ejemplo a 10,05, entonces el espacio libre sería de $10,05 - 10,00 = 0,05\text{mm}$, más cercano al buscado de 0,04.

-Resultados esperados

La desviación de los diámetros de los agujeros se mantendrá como $6\sigma = 0,05$, que resulta en $\sigma = 0,0083$. Para este nuevo caso, la probabilidad de tener agujeros con diámetros inferiores a 10,04 sería:

$Z = (10,04 - 10,05) / 0,0083 = -0,01 / 0,0083 = -1,2$ por lo que:

$P(X < 10,04) = 0,1150$

La figura 3 denota que si bien se acercó el valor meta de holgura "clearance" al especificado, ahora aproximadamente un 12% de las partes no tendrán la holgura requerida sino una donde el pin no podrá entrar. Lo anterior demuestra que es necesario reducir la desviación para lograr aproximarse al valor meta.

Otra forma de reducir la variabilidad sería mediante la mejora de los procesos de la maquinaria o bien cambiando a maquinaria más precisa, por ejemplo considere un centro de maquinado CNC con una fresadora de mayor precisión, que tenga un rango de tolerancia de 0,01 mm.

-Prueba 3: Filosofía de Calidad: En el objetivo (On Target)

Nuevamente, asumiendo esta tolerancia unilateral (+0,01 – 0) el límite máximo podría ser 10,05 y el límite mínimo 10,04, el valor meta para la dimensión del agujero sería entonces $(10,05 + 10,04) / 2 = 10,045\text{ mm}$.

-Resultados esperados

El espacio libre promedio resultará en $10,045 - 10,00 = 0,045\text{mm}$. Con la producción de la máquina bajo control se tiene: $6\sigma = 0,01$ por lo que $\sigma = 0,00167$, que es una desviación menor.

Discusión y conclusiones

Como resultado de la investigación de casos y literatura consultada, se estimó necesario tomar en cuenta en la manufactura factores tales como: el ajuste requerido para el acople final, los equipos y herramientas disponibles para el maquinado, el sistema de producción, los equipos y métodos de medición, las condiciones ambientales durante el proceso, el tamaño de las partes y su manipulación, así como el material utilizado, los procesos o usos posteriores y la filosofía de calidad adoptada para la manufactura.

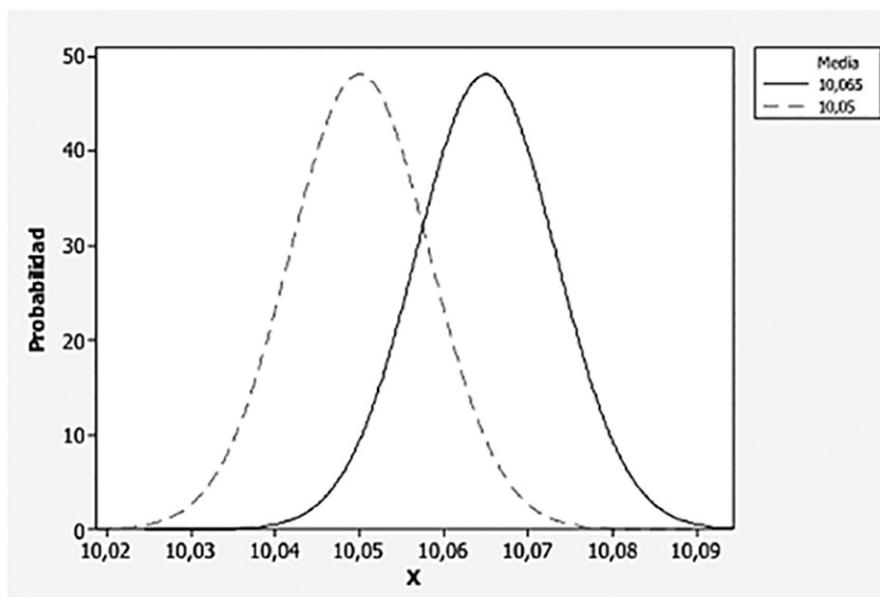


Figura 3. Distribución de diámetros de los agujeros (procesos controlados).

Cuadro 1. Comparación de las pruebas de asignación del valor meta por maquinarse para el agujero con diámetro meta de 10,04 mm.

Rango de tolerancia de la máquina	Filosofía de calidad para determinar el valor por maquinarse	Dimensión por maquinarse como meta	Holgura promedio (respecto a 10mm)	Probabilidad de un espacio libre menor a 0,04mm
0,05mm	Centrado entre límites (Cero Defectos)	10,065	0,065	<1%
0,05mm	En especificación meta (En Objetivo)	10,05	0,05	12%
0,01mm	En especificación meta (En Objetivo)	10,045	0,045	<1%

Los lineamientos incorporados en el modelo para la mejora de las prácticas de manufactura denotan tener la fortaleza necesaria, porque permiten enfocar los aspectos que inciden con mayor impacto sobre los resultados del proceso. Ello amerita, por lo tanto, poner a prueba el modelo en casos que reflejen circunstancias cotidianas.

La filosofía de excelencia de la calidad conlleva un incremento en el costo de la manufactura, pero también una reducción en los reclamos por el incumplimiento de los márgenes de ajuste, por lo que constituye un factor importante del modelo.

La prueba experimental del modelo, por razones de tiempo y espacio, brinda poco detalle de la participación de los factores, pero demostró consistencia, y además permitió mostrar que cambiar el concepto de tolerancia por límites permitidos para la especificación perjudica el cumplimiento de los valores meta, aumentando la cantidad de producto desviado del objetivo. Dicha práctica además desperdicia la capacidad de exactitud de la maquinaria.

La prueba también demostró que la exactitud de la maquinaria que se utilice influye directamente en la consecución del valor dimensional meta.

Bibliografía

Al-Ansary, M.D. & Deiab, I.M. (1997). Concurrent optimization of design and machining tolerances using the genetic algorithms method. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 37, Issue 12, December 1997, pp. 1721-1731, ISSN 0890-6955, 10.1016/S0890-6955(97)00033-3. Recuperado en febrero 2012 de: (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695597000333>)

Bengtson, D. (2008) Develop a Process Control Plan. *SME Manufacturing Engineering* Vol. 141, September. Recuperado el 15 de abril 2011 de: <http://www.sme.org/cgi-bin/find-articles.pl?&08sem003&ME&20080901&&SME&#article>

Bjorke, O. (1989) Computer-Aided Tolerancing. 2nd edition. ASME Press.

Burton, T. (2012). The generations of improvement. *Industrial Engineer IIE*, Vol. 44.

Creveling, C.M. (1997). *Tolerance Design. A Handbook for Developing Optimal Specifications*. Addison Wesley.

Fowlkes, W.Y. & Creveling, C.M. (1995). Engineering Methods for Robust Product Design. *Engineering Process Improvement Series*.

Guan, X., Wang, Y. & Tao, L. (2009). Machining scheme selection of digital manufacturing based on genetic algorithm and AHP. *Journal of intelligent manufacturing* Vol. 20, N° 6. Recuperado el 20 de febrero del 2012 de Springer Link

Groover, M. (2007) *Fundamentos de Manufactura Moderna: Materiales, Procesos y Sistemas*. McGraw Hill.

Lin, S., Wang, H. & Zhang, C. (1997). Optimal Tolerance Design for Integrated Design, Manufacturing and Inspection with Genetic Algorithms. *Advanced Tolerancing Techniques* 261-281.

Madsen, D. (2009). *Geometric Dimensioning and Tolerancing: based on ASME Y14.5-2009*. Goodheart-Wilcox Co.

Maghsoodloo, S. & Caleb Li, M. (2000). Optimal asymmetric tolerance design. *IIE Transactions* 32: 1127-1137. Recuperado en diciembre 2011 de Springer.

McMahon, C. & Browne J. (1998). *CAD CAM Principles, practice and manufacturing management*. 2 ed. Addison Wesley Longman.

Mehta, M. (2009). Kick down the goalpost. *Industrial Engineer IIE*. Vol. 42. October.

Wortman, B. (2006). *Certified Quality Engineer PRIMER*. Quality Council of Indiana.

Evaluación electroquímica de soldaduras en tubos capilares de acero inoxidable

Electrochemical evaluation of stainless steel welded tubes

Javier E. Rodríguez-Yáñez¹
Ericka Saborío-Leiva²
Daniel Mora-Montoya³

Fecha de recepción: 26 de abril del 2013
Fecha de aprobación: 13 de junio del 2013

Rodríguez-Yáñez, J; Saborío-Leiva, E; Mora-Montoya, D. Evaluación electroquímica de soldaduras en tubos capilares de acero inoxidable. *Tecnología en Marcha*. Vol. 27, N° 1. Pág 57-65

- 1 Centro de Investigación en Corrosión, Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). Apartado 10032-1000, San José. Teléfono: (506) 22205112. Correo electrónico: urutico@gmail.com.
- 2 Centro de Investigación en Corrosión, Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). Apartado 10032-1000, San José, Costa Rica. Teléfono: (506) 22205149. Correo electrónico: ESaborio@ice.go.cr.
- 3 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Apartado 159-7050, Cartago, Costa Rica. Teléfono: (506) 22853382. Correo electrónico: daniel.mora88@gmail.com.

Palabras clave

Acero inoxidable 316L; soldadura orbital autógena; Tafel; geotermia; decapado.

Resumen

La recuperación de capilares de acero 316L utilizados en pozos geotérmicos neutros, por medio de soldadura orbital autógena, se evalúa desde el punto de vista de su resistencia a la corrosión en las condiciones de utilización, mediante técnicas electroquímicas básicas.

En el pretratamiento se encuentra que es más conveniente realizar un decapado químico previo a la soldadura por 5 minutos. Mientras que posteriormente a la soldadura, la aplicación de tratamiento térmico de reducción de tensiones no se justifica desde el punto de vista de la resistencia a la corrosión.

También se plantea la comparación de los capilares soldados respecto a capilares nuevos y usados, teniendo los capilares soldados un comportamiento intermedio entre ambos.

Key words

316L Steel; orbital welding; Tafel; geothermal; pickling.

Abstract

The recovery of 316L steel capillaries used in neutral geothermal wells orbital welding by weld is evaluated from the point of view of its resistance to corrosion in the conditions of use, through basic electrochemical techniques.

In the pre-treatment is more convenient than carrying out a chemical pickling prior to welding for 5 minutes. While subsequent to the application of welding heat treatment of stress reduction is not justified from the standpoint of corrosion resistance.

There is also the comparison of capillaries capillary soldiers regarding new and used soldier's capillaries having an intermediate behavior between the two.

Introducción

El uso de los recursos geotérmicos para generar electricidad se ha incrementado en los últimos 20 años, siendo su principal desarrollador en Costa Rica el Centro de Servicio de Recursos Geotérmicos (CSRG) del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). El proceso implica la extracción de aguas y vapor sobrecalentados, mediante pozos en acuíferos profundos calentados por la actividad magmática. La estabilidad del proceso y su continuidad es una de las características principales de la generación geotérmica. Esa estabilidad depende de las políticas de explotación y del control de fenómenos secundarios como la formación de depósitos de carbonato de calcio (CaCO_3), que ocurre en la zona de ebullición de los pozos neutros como resultado de la sobresaturación de bicarbonatos (HCO_3^-).

Para evitar la formación de incrustaciones de carbonatos de calcio, en los pozos geotérmicos neutros se recurre a la aplicación de inhibidores en el fondo de estos. En general, estos inhibidores son compuestos de tipo poliacrilato. Para su aplicación se utilizan tubos capilares continuos de acero inoxidable AISI-SAE 316L, que resisten mejor las características químicas de los fluidos con pH neutros. La durabilidad de dichos capilares depende de muchas variables pero en general se les estima una vida útil de 1,5 a 3 años. Los capilares que se pueden recuperar son los que presentan obstrucciones debido a la cristalización de los inhibidores, no aquellos que fallan por esfuerzo o por corrosión bajo tensión (*stress corrosion cracking* o SCC). Es por eso que se plantearon metodologías de soldado de dichos capilares y sus condiciones comparativas de solda-

dura respecto a un capilar nuevo y un capilar usado, evaluándose las metodologías mediante ensayos electroquímicos.

El estudio del comportamiento del acero AISI-SAE 316L bajo las condiciones establecidas en este artículo es un tema muy específico. Se encontró que la bibliografía se enfoca en la corrosión en los procesos geotérmicos y otros en aceros de distintos tipos no siempre asociados a pruebas electroquímicas (Ellis, 1985; XU et. al, 2006; Whittake, 2009).

El acero AISI-SAE 316L, al utilizarse en procesos donde se incrementa el riesgo de sufrir corrosión, ha sido estudiado por medio de ensayos electroquímicos y gravimétricos, junto a otras aleaciones, para observar su desempeño. Entre los medios utilizados en las pruebas de corrosión se encuentran las salmueras geotérmicas, 2-Mercaptobenzimidazole y soluciones de bacteria oxidante de hierro y de bacteria reductora de sulfato (Mundhenk et. al, 2013; XU et. al, 2006).

Las salmueras geotérmicas varían según la naturaleza del yacimiento que les da origen, por lo tanto las comparaciones indicadas aquí deben ser valoradas en cada situación y siempre asociada a pozos geotérmicos de pH neutros (Ellis, 1985; Mora, 2006).

Materiales y metodología

Los capilares de acero inoxidable AISI- SAE 316L, con un diámetro exterior de 6,35 mm y 1,24 mm de espesor, utilizados en los pozos neutros del Campo Geotérmico Miravalles presentan la siguiente composición química, según los proveedores del CSRG (Mora Rodríguez, 2006).

Disoluciones

Antes del soldado de los capilares se efectúa una limpieza con acetona grado reactivo (95%) para la remoción de grasas o hidrocarburos, luego se aplica un decapado según la norma ASTM A 380-06, Sección 7.

En este estudio, el decapado se realizó con una disolución preparada a partir de HNO₃ concentrado (70% m/m y densidad 1,41 g/cm³) y HF concentrado (48% m/m y densidad 1,15 g/cm³), a fin de obtener una relación 24/5% m/v. Las muestras de acero inoxidable AISI-SAE316L fueron decapadas con dicha disolución a tiempos de 2, 5, 8, 10, 15, 20, 25, 30 minutos y comparadas con muestras del mismo acero nuevas y usadas (Mora Rodríguez, 2006; ASME, 2009; ASTM A 407, 2007).

Se utilizó una disolución reveladora de Ferroxil para obtener una referencia sobre la acumulación de óxido en la superficie del tubo capilar, siguiendo la norma ASTM A 380-06, Sección 7. La disolución se preparó con 30 g de K₄[Fe(CN)₆] (99%), 17,5 cm³ de HNO₃ concentrado y agua destilada c.s.p. 1000 cm³ (Mora Rodríguez, 2006; Davies et. al, 1998).

Posteriormente al decapado y soldado, las muestras se sometieron a tratamientos térmicos de alivio de tensiones a 410° C y 955° C. Los tratamientos térmicos (TT) se realizaron en un horno Lindberg Blue M 1200°C, modelo HTF55342C, durante 12 minutos. Los resultados se compararon con las muestras sin TT (Mora Rodríguez, 2006; Davies et. al, 1998).

Para el proceso de evaluación electroquímica del decapado se utilizó como electrolito una disolución neutra de NaNO₃ al 10% m/v, a partir de reactivo Sigma puro (99,5%), mientras que para los capilares soldados se usaron las disoluciones a las que están expuestos habitualmente en los pozos geotérmicos neutros: solución de poliacrilato de sodio al 5% y la salmuera neutra del pozo N°29.

La composición obtenida del proveedor respecto al poliacrilato solo indica que es una mezcla de ácidos policarboxílicos de sodio de la Bio-LabWater Additives Division (producto DP 3537) (Davies et. al, 1998). La salmuera del Pozo 29 presenta una composición química neutra, con valores medios de cloruros y sulfatos, pero con la mayor cantidad de bicarbonatos, con posibilidad de formación de incrustaciones. La composición de su fase líquida puede verse en el cuadro 2.

Todas las disoluciones se elaboraron con aguas de calidad tipo IV según la norma ASTM D 1193-06 (con conductividad menor a 5 µS/cm, pH entre 5 y 8, así como concentraciones de Na y Cl menores a 50 mg/l) (ASTM D 1193, 2011).

Cuadro 1. Composición química porcentual de los capilares de acero inoxidable AISI- SAE 316L.

Elemento	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
Porcentaje	0,03	0,6	1,7	17,5	13	2,6

Cuadro 2. Composición de la salmuera neutra del pozo PGM N°29, medidas de la fase líquida a 98° C.

Pozo	PGM-29
Fecha	20-feb-12
pH	7,35
Cond. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	13930
Na (ppm)	2838
K (ppm)	256
Ca (ppm)	79
Mg (ppm)	0,21
Fe total.(ppm)	<0,07
Cl (ppm)	4508
SO ₄ (ppm)	74
HCO ₃ (ppm)	161
F (ppm)	2,43
B (ppm)	66
H ₂ S (ppm)	<1
NH ₃ (ppm)	1,12
As (ppm)	10,0
SiO ₂ monomérica (ppm)	563
SiO ₂ Total (ppm)	591
S.T.D (ppm)	8700

Ensayos electroquímicos

Las metodologías utilizadas para la evaluación de la corrosión son las siguientes⁴ (Fontana, 1986; ASTM G 102, 2010; ASTM G 5, 2004):

1. Potencial de circuito abierto (E_{oc}), durante 10 minutos.
2. Resistencia de polarización lineal (R_p), mediante la aplicación de un barrido de potencial a 10 mV/min entre -20 mV y +20 mV respecto a E_{oc} .
3. Curvas de Tafel catódica y anódica, con un barrido de potencial de 50 mV/min, entre -250 mV y +250 mV, respecto a E_{oc} .

4. Curvas de Tafel anódicas cíclicas, con un barrido de potencial de 50 mV/min, entre 0 mV a +1000mV respecto E_{oc} , para los capilares soldados con TT.

Las evaluaciones se realizaron a temperatura ambiente (20° C), mientras que el electrodo de referencia utilizado es el de Calomel (SCE) y el contraelectrodo es de platino (Pt). Todos los potenciales son referidos al electrodo de SCE.

Para realizar las mediciones electroquímicas se utilizó un potenciostato-galvanostato marca Gamry, modelo Reference 600. Las velocidades de corrosión (V_{corr}) se calculan a partir de los valores de R_p , las áreas expuestas y las pendientes de Tafel, según la ecuación general de Stern- Geary (Fontana, 1986; Bard et al, 2001; Schweitzer, 1986).

Metalografías

Se realizó la evaluación metalográfica de los capilares de acero inoxidable 316L, inspeccionando la soldadura, zona afectada térmicamente, y el material base.

Las probetas fueron pulidas y atacadas electrolíticamente, usando como electrolito de pulido una solución de etanol al 95%, agua desionizada y ácido perclórico al 60%, con densidad 1,5 g/cm³ (relación 40/7/3 v/v) durante 40 s a 60 V. Como reactivo de ataque se utilizó una solución de ácido nítrico concentrado (60% y densidad: 1,37 g/cm³) durante 120 s a 1 V (ASM International Metal Handbook, 1990; González, 1989).

El análisis se efectuó utilizando un microscopio metalográfico marca Olympus, modelo GX41, y el software analizador de imágenes Paxit IA44, marca Leco.

Resultados y discusión

Proceso de decapado

Los valores generales obtenidos pueden apreciarse en el cuadro 3. En la mezcla decapante, el ácido nítrico (HNO₃) actúa como un oxidante de la superficie facilitando la formación de películas protectoras, mientras que el ácido fluorhídrico (HF) actúa como un ácido reductor eliminando los óxidos superficiales existentes y atacando el material base (Davies, 1998; Laugfgang, 2000). En ellas se observó que a partir de los 2 minutos de decapado, no se obser-

⁴ Hoja técnica y MSDS del inhibidor DP 3537 Mixture of PolycarboxylicAcids (Poliacrilato de sodio) BioLab®.

Cuadro 3. Valores obtenidos en los ensayos electroquímicos con solución de NaNO₃ al 10% sobre capilares de acero 316L nuevos, usados y decapados a distintos tiempos.

Tiempo de decapado	E _{oc} (mV vs SCE)	V _{corr} (μm/año)	V _{corr} (g/m ² año)
Nuevo	-386,1	0,135	1,0829
Usado	232,7	0,067	0,5368
2 min	27,94	0,100	0,8022
5 min	-0,06	0,088	0,7020
8 min	-4,9	0,053	0,4257
10 min	-10,28	0,065	0,5203
15 min	-61,48	0,120	0,9626
20 min	-153,5	0,112	0,8962
25 min	-155,4	0,140	1,1202
30 min	-181,1	0,171	1,3663

van más residuales de óxidos de hierro en la superficie que reaccionen con el reactivo de Ferroxil.

El proceso de decapado modifica los valores de E_{oc}, disminuyéndolos con el tiempo de decapado sobre el capilar usado, lo cual puede apreciarse en la figura 1. Los valores obtenidos son en todos los casos superiores, o más positivos, que los de un capilar nuevo, pero menores que el capilar usado, lo que indicaría un aumento de estabilidad de la superficie frente a la corrosión por el proceso de decapado en condiciones estáticas.

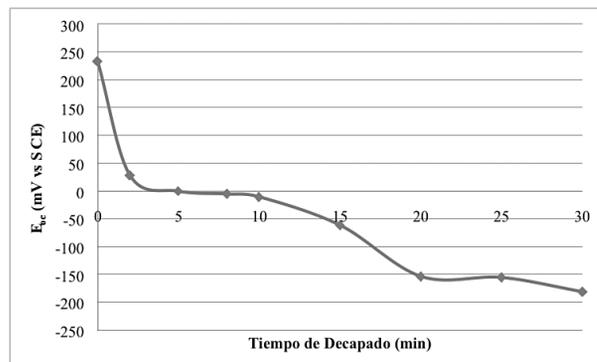


Figura 1. Variación del potencial de circuito abierto (E_{oc}) vs tiempo de decapado para capilares de acero 316L usados, en una disolución de NaNO₃ al 10% m/v, y HNO₃/HF 24/5 % m/v.

Para el cálculo de la velocidad de corrosión se hicieron evaluaciones de las pendientes de Tafel para el sistema decapado a 5 y 30 minutos, encontrando como una situación media los siguientes valores de β_{catódico} = 210 mV/dec y β_{anódico} = 240 mV/dec, lo cual plantea un valor de B = 0,0487 V, según Stern-Geary (ASME Code, Sección IX, 2009; ASTM G 102, 2010). Estos valores de pendientes de Tafel son elevados, planteando situaciones pasivas en ambos sentidos (anódico y catódico) para el acero 316L en las condiciones de evaluación de decapado.

Mientras que los E_{oc} tienden a disminuir, los valores de V_{corr} tienden a disminuir inicialmente para luego aumentar con el tiempo de decapado, lo cual indicaría que un exceso del tiempo de decapado se torna perjudicial para la superficie, haciéndola más susceptible a la corrosión (ver figuras 1 y 2). Esto estaría asociado a los efectos contrapuestos planteados para los reactivos decapantes. Los valores plantean que resultaría adecuado un tiempo de decapado de entre 5 y 10 minutos. Para los siguientes ensayos el tratamiento previo fue un decapado por 5 minutos con esta disolución.

Capilares de acero inoxidable AISI-SAE 316L soldados

Los valores obtenidos en los ensayos electroquímicos con salmuera de un pozo geotérmico se aprecian en el cuadro 4, y aquellos para la disolución de poliacrilato de sodio al 5% se presentan en el cuadro 5.

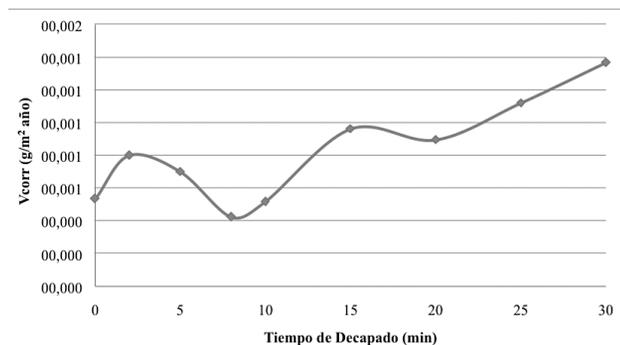


Figura 2. Variación de velocidad de corrosión vs tiempo de decapado, para capilares de acero 316L usados en una disolución de NaNO₃ al 10% m/v, y HNO₃/HF 24/5 % m/v.

Cuadro 4. Valores obtenidos en los ensayos con salmuera de pozo geotérmico sobre capilares de acero 316L nuevos, usados, soldados (con y sin decapado) y soldados con TT.

Muestra	E_{oc} (mV vs SCE)	R_p (W/cm ²)	β cat. (mV)	β anód. (mV)	V_{corr} (μm/año)	V_{corr} (g/m ² año)
Nuevo	-306,7	365	120	180	0,95	7,6
Usado	-131,0	2448	240	240	0,28	2,3
Sin decapar y soldado	-174,0	55	180	120	9,46	75,6
Decapado y soldado	-205,6	503	180	240	1,63	13,1
Decapado y soldado con TT a 410°C	-154,8	627	120	210	1,36	10,84
Decapado y soldado con TT a 955 °C	-282,8	152	180	150	7,26	58,04

Cuadro 5. Valores obtenidos en los ensayos electroquímicos con inhibidor de poliacrilato de sodio al 5% m/m sobre capilares de acero 316L nuevos, usados y soldados (con y sin decapado).

Muestra	E_{oc} (mV vs SCE)	R_p (W/cm ²)	β cat. (mV)	β anód. (mV)	V_{corr} (μm/año)	V_{corr} (g/m ² año)
Nuevo	-327	2258	180	150	0,20	1,6
Usado	192,5	581	180	240	0,93	7,5
Decapado y soldado	-142,2	624	270	240	1,74	13,9
Sin decapar y soldado	-98,06	55	180	240	7,93	63,4
Decapado y soldado con TT a 410° C	158,9	1717	150	240	0,83	6,66
Decapado y soldado con TT a 955° C	-33,22	117	150	270	11,45	91,63

En el cuadro 4 los valores de E_{oc} muestran una región de trabajo entre la situación de un capilar nuevo y un capilar usado, donde se desarrollarán los potenciales de los capilares soldados, siendo el potencial del capilar soldado y decapado más negativo que aquel sin decapar.

Los capilares soldados con tratamiento tienen una V_{corr} similar a un capilar nuevo, mientras que los capilares soldados sin tratamiento tienen una V_{corr} mucho mayor. Los capilares usados presentan una V_{corr} menor que un capilar nuevo, posiblemente asociada a la pasivación de la superficie con el uso.

En las curvas de Tafel anódicas de la figura 3 se puede apreciar que las pendientes anódicas para la curva de capilar soldado y sin decapado son mucho

menores que para las otras situaciones. Mientras que el valor de la pendiente catódica es menor para el capilar nuevo. El tratamiento térmico a 410° C aumenta el E_{oc} , sin modificar sustancialmente la R_p y variando las pendientes de Tafel, lo que redundaría en una V_{corr} similar al sistema del capilar decapado y soldado sin tratamiento térmico. En cuanto al tratamiento a 955° C, aunque mejora el E_{oc} disminuyendo su valor, disminuye también la R_p y las pendientes de Tafel, lo que hace que la V_{corr} sea elevada.

En la solución de salmuera se evaluó el efecto de picadura mediante la aplicación de curvas de Tafel anódicas cíclicas, donde en algunos casos puede apreciarse con claridad el potencial de picado (E_{pic}), los potenciales de protección (E_{pro}), así como los rangos de pasivación (ΔE_{pas}) y la intensidad (I_{pas}).

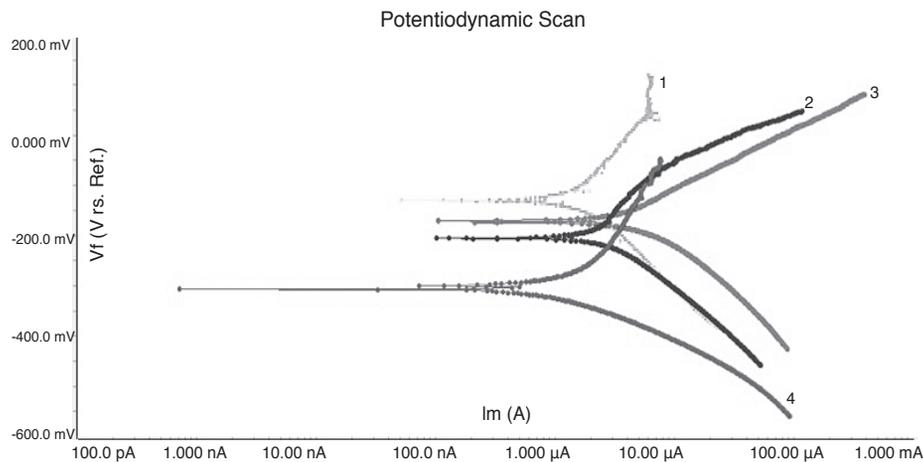


Figura 3. Curvas de Tafel para las distintas muestras evaluadas en disolución de pozo geotérmico, para acero 316L, capilar nuevo (4), capilar usado (1), capilar decapado y soldado(2), capilar sin decapado y soldado (3).

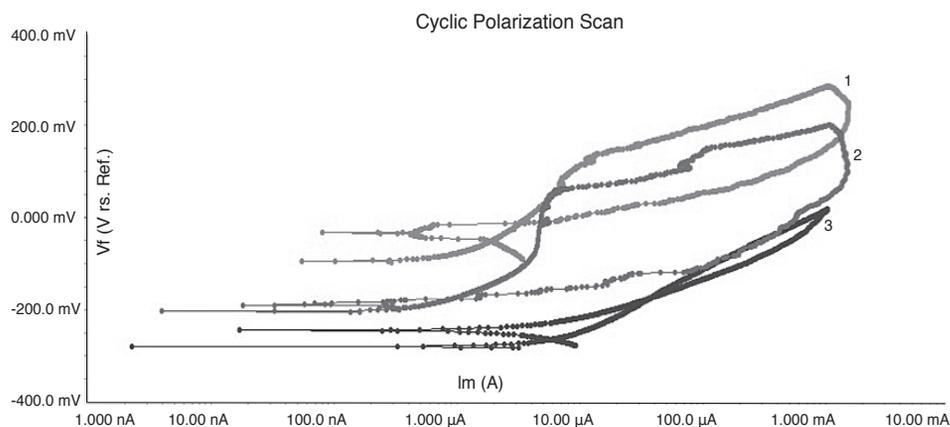


Figura 4. Curvas de Tafel anódicas para las distintas muestras evaluadas en disolución de pozo geotérmico, para acero 316L, capilar soldado con TT a 410°C (1), capilar soldado con TT a 955°C (3) , capilar soldado sin TT (2).

Es posible observar que la soldadura sin TT presenta un rango amplio de ΔE_{pas} (120mV) con una ΔI_{pas} del orden de 1 μA , lo cual presenta una alta estabilidad frente a la oxidación por picadura con un E_{pic} de +250 mV vs E_{oc} , aunque con un E_{pro} muy cercano a E_{oc} (+ 25 mV vs E_{oc}).

El sistema con TT a 410° C tiene un comportamiento similar, aunque con un rango de ΔE_{pas} (40 mV) con un E_{pic} menor que sin TT y un E_{pro} más alto (+ 80mV vs E_{oc}).

Para el sistema con TT a 955° C no se plantea una región definida de pasivación, por lo que no se puede estimar E_{pic} , y el valor de E_{pro} se puede esti-

mar en unos 100 mV respecto a E_{oc} . Mientras que en las curvas catódicas no se aprecia una diferencia sustancial entre los tratamientos.

Los valores de E_{oc} para los sistemas soldados (con y sin decapado) plantean valores intermedios entre los potenciales de un capilar nuevo y uno usado. El sistema decapado y soldado muestra mejor E_{oc} respecto al sistema soldado sin tratamiento de limpieza.

Los valores de V_{corr} plantean que el capilar nuevo tiene una muy baja velocidad de corrosión frente a la disolución de poliacrilato, la cual aumenta progresivamente para el capilar usado y para los capilares soldados, con y sin tratamiento. Este efecto se debe

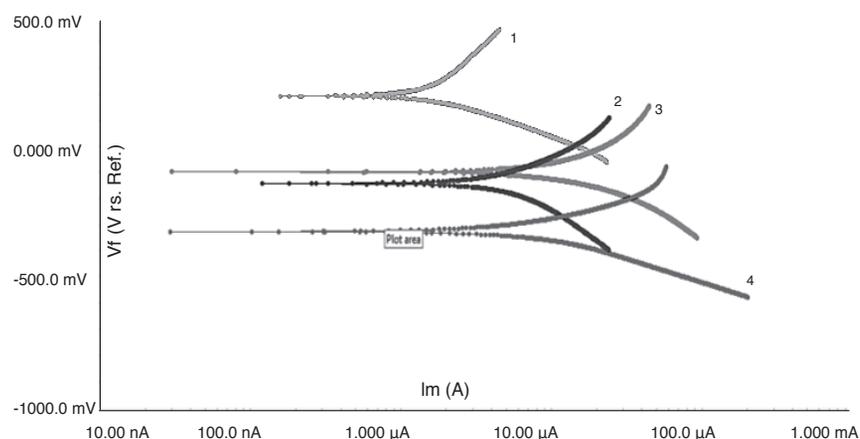


Figura 5. Curvas de Tafel para las distintas muestras evaluadas en disolución de inhibidor de poliacrilato de sodio al 5 %, para acero 316L, capilar nuevo (4), capilar usado (1), capilar decapado y soldado(2), capilar sin tratar y soldado (3).

a varios factores combinados, partiendo de una disminución progresiva de R_p y algunas variaciones en las pendientes de Tafel encontradas (ver figura 5).

El tratamiento térmico a 410°C aumenta mucho el E_{oc} y el R_p , sin variaciones importantes en las pendientes de Tafel, lo que redundaría en una V_{corr} menor al del capilar decapado y soldado sin tratamiento térmico. Mientras que el tratamiento a 955°C aumenta el E_{oc} pero disminuye mucho el R_p , lo que hace que la V_{corr} sea elevada.

No se observaron sistemas de corrosión por picadura en las Tafel anódicas cíclicas.

Análisis metalográfico

Mediante análisis metalográfico se observó el acero inoxidable 316L previamente al ataque (ver figura 6a), mostrando muy pocas inclusiones no metálicas. Posteriormente al ataque, realizado según la norma ASTM A 407-07 (figura 6b), se corroboró que la soldadura no produjo ningún precipitado de carburos de cromo en los límites de grano y que la estructura es de matriz austenítica para las soldaduras con o sin tratamiento térmico.

Durante las pruebas se sobrepasaron las temperaturas a las cuales ocurre la sensibilización de los aceros inoxidables; sin embargo, no se consideró necesario realizar ensayos de sensibilización, dado que en las metalografías no se determinó la presencia de precipitación de carburos de cromo en los límites de grano, por lo cual se evidencia que los capilares no sufrieron sensibilización.

Además, el proceso de soldadura utilizado para la unión de tubo capilar imposibilita el proceso de sensibilización, ya que el calor generado en el proceso es mínimo. Asimismo, la escasa cantidad de carbono presente en la aleación dificulta la formación de carburos de cromo.

Conclusiones

El proceso de decapado plantea un rango de tiempos óptimos asociados a la limpieza de óxidos superficiales, sin generar un deterioro importante de la superficie y disminuyendo su V_{corr} . Los tiempos sugeridos son de 5 a 10 minutos. Aquellos capilares que se decaparon durante un tiempo mayor presentan un E_{oc} más negativo, pero se nota un incremento en las V_{corr} debido al ataque del HF sobre la muestra.

Los ensayos electroquímicos en las soluciones de trabajo indican que comparativamente ambos medios plantean valores de V_{corr} similares para el capilar decapado y soldado; estos siempre fueron menores cuando se comparan con los capilares donde no se aplicó tratamiento de limpieza. Es clara la desventaja cuando se comparan los datos de las muestras decapadas y soldadas frente a los capilares nuevos en cuanto a E_{oc} y V_{corr} . Mientras que los capilares usados no brindan valores más beneficiosos de E_{oc} pero sí de V_{corr} debido probablemente a la capa pasiva generada en su superficie cuando se utilizó en los pozos geotérmicos.

Los tratamientos térmicos no mejoran sustancialmente los valores de V_{corr} para justificar su aplicación,

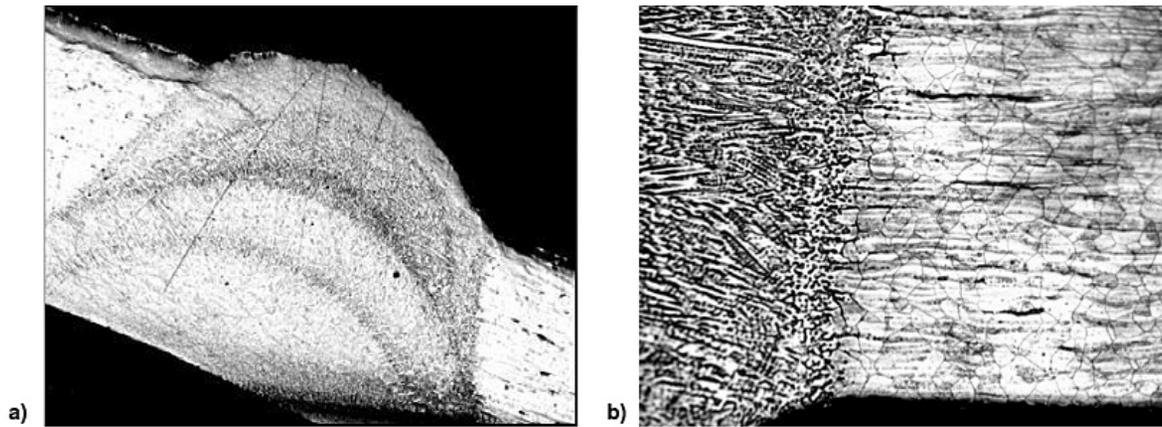


Figura 6. Soldadura de tubo capilar AISI 316L, a) sin atacar, x50, b) soldadura tratada térmicamente a 955°C, atacada con disolución de ácido oxálico, x200

pero se debe analizar su efecto sobre la reducción de tensiones debido a la soldadura. Además, las metalografías plantean que el proceso de soldadura y los tratamientos térmicos no presentan problemas de precipitación del cromo o carburos en el cordón de soldadura y las zonas adyacentes.

Agradecimientos

Se agradece de forma especial el apoyo brindado por el Centro de Servicios y Recursos Geotérmicos del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) para el desarrollo de este proyecto.

Bibliografía

- ASM International Metal Handbook (1990). Heat Treating, US. (4).
- ASTM A 380-06 (2006) Standard Practice for Cleaning, Descaling, and Passivation of Stainless Steel Parts, Equipment, and System.
- ASTM A 407-07 (2007) Standard Practice for Microetching Metals and Alloys.
- ASTM D 1193-06. (2011). *Standard Specification for Reagent Water*.
- ASTM G 102-89. (2010). *Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements*.
- Bard, A. & Faulkner, L. (2001). *Electrochemical Methods*. New York: J. Wiley & Sons.
- Código ASME, Sección IX (2009). *Soldadura: Desarrollo y calificación de Procedimientos y Soldadores*. Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos
- Davies, J. et. al. (1998). *Metals Handbook*. ASM International, Ohio. US.
- Ellis, P. (1985). *Companion study guide to short course on geothermal corrosion and mitigation in low temperature geothermal heating systems*. Texas.
- Fontana, M. (1986). *Corrosion Engineering*. 3 ed. US: Mac Graw Hill.
- González, J. (1989). *Control de la Corrosión: Estudio y Medida por Técnicas Electroquímicas*. Madrid: Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas.
- Laufgang, S. (2000). *Aceros Inoxidables*. Universidad de Buenos Aires. Disponible en: <http://materias.fi.uba.ar/6750/ACEROS%20INOXIDABLES.pdf>
- Mora Rodríguez, J. (2006). *Programa de control del tubo capilar usado en los pozos del Campo Geotérmico Miravalles*. Tesis de Maestría en Administración de la Ingeniería Electromecánica, Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Mundhenk, N., Huttenloch, P., Zorn, R., & Kohl, T. (2013). Electrochemical study on corrosion of different metals exposed to deaerated geothermal brines containing CO₂. Institute of Applied Geosciences, Alemania.
- Refaey, S. A. M., Taha, F., & El-Malak, A. A. (2006). Corrosion and Inhibition of 316L stainless steel in neutral medium by 2-Mercaptobenzimidazole. *International Journal of Electrochem. Science*, 1, 80-91.
- Schweitzer, P.A. (1986). *Corrosion Resistance Tables*. US: Marcel Dekker.
- Whittaker, P. (2009). *Corrosion in the Kalina Cycle*. Tesis de Maestría, The School for Renewable Energy Science, Islandia.
- XU, C., ZHANG, Y., CHENG, G., & ZHU, W. (2006). Corrosion and electrochemical behavior of 316L stainless steel in sulfate-reducing and iron-oxidizing bacteria solutions. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 14(6), 829-834.

Revisión de modelos teóricos de la dinámica de fluidos asociada al flujo de sangre

A review of theoretical blood flow models

Gabriela Ortiz-León¹

Daniel Araya-Luna²

Marta Vílchez-Monge³

Fecha de recepción: 28 de junio de 2013

Fecha de aprobación: 05 de setiembre de 2013

Ortiz-León, G; Araya-Luna, D; Vílchez-Monge, M. Revisión de modelos teóricos de la dinámica de fluidos asociada al flujo de sangre. *Tecnología en Marcha*. Vol. 27, N° 1. Pág 66-76

1 Escuela de Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: gaby@itcr.ac.cr.

2 Escuela de Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: dearaya@gmail.com.

3 Escuela de Física, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: mvilchez@itcr.ac.cr.

Palabras clave

Modelo de sangre; fluido no newtoniano.

Resumen

La sangre es un fluido incompresible, viscoelástico y de comportamiento no newtoniano. Su representación por medio de un modelo matemático debe contemplar estas características, así como el compromiso entre la exactitud de los resultados y el cálculo computacional para obtenerlos. A continuación se presenta un resumen de los modelos de flujo no newtoniano utilizados con mayor frecuencia en la descripción del flujo sanguíneo, una evaluación realizada sobre modelos de sangre seleccionados de la literatura, la recapitulación de los parámetros utilizados para la descripción de la sangre y los resultados de una prueba de concepto para la comparación de modelos de sangre en una arteria.

Key words

Blood models; Non-Newtonian fluid.

Abstract

Blood is an incompressible and viscoelastic fluid with Non-Newtonian behavior. A mathematical model should include these features and also must have a compromise between the results accuracy and computational resources need to obtain them. This paper presents a summary of Non-Newtonian models frequently used to describe blood flow, an assessment of different bloods models chosen in the literature, a summary of parameters used in blood description and some results obtained from a comparison of blood behavior in an artery.

Introducción

El alto índice de enfermedades cardiovasculares en países desarrollados y en vías de desarrollo ha estimulado la investigación del comportamiento de la sangre en los grandes vasos sanguíneos, con la finalidad de comprender diversas patologías cardiovasculares, mejorar los métodos de diagnóstico asociados y reducir costos en el diseño e implementación de dispositivos implantables que tendrían contacto con la sangre, como por ejemplo, válvulas cardíacas y bombas de sangre.

La descripción matemática del comportamiento de la sangre permite estudiar sistemáticamente el comportamiento de los patrones de flujo al variar las características elásticas y geometrías de los vasos sanguíneos, sin exponer a un ser vivo a situaciones experimentales. Por otra parte, el análisis numérico de la dinámica de fluidos permite predecir daños en la sangre debido, por ejemplo, a la implantación de dispositivos médicos.

La sangre es un fluido multifase, dada la presencia de sólidos suspendidos en el plasma, además su viscosidad y densidad son modificadas por factores

tales como la temperatura y el hematocrito. Se ha demostrado que es posible modelar la sangre como un fluido homogéneo en los grandes vasos sanguíneos, en los cuales el diámetro es al menos dos órdenes de magnitud mayor que el tamaño de los glóbulos rojos. En este artículo se resume una evaluación de antecedentes y algunos parámetros utilizados por diversos autores en el modelado del flujo sanguíneo.

Procedimiento metodológico

La metodología seguida para esta revisión fue seleccionar de la literatura los modelos de sangre que describen su comportamiento en los vasos sanguíneos; además se definieron variables comparativas para evaluar cualitativamente estos modelos. Posteriormente se resumieron los parámetros utilizados en la descripción matemática del flujo sanguíneo y se realizó una prueba de concepto por medio del método de elementos finitos.

La revisión bibliográfica se enfoca en las descripciones del flujo sanguíneo que puedan ser implementadas

mediante la dinámica computacional de fluidos (CFD, por sus siglas en inglés). El primer paso fue seleccionar nueve modelos y determinar las variables significativas para la descripción de la sangre a través de las ecuaciones de Navier-Stokes en tres dimensiones para un fluido incompresible, viscoso y no turbulento.

La siguiente etapa fue la evaluación de modelos existentes para determinar las ventajas y desventajas de los modelos seleccionados de la literatura. Para realizar esta actividad se declararon variables cualitativas con el fin de medir el potencial de un modelo matemático determinado.

Finalmente, se construyó una lista de los parámetros utilizados por otros autores para modelar el fluido sanguíneo, entre los que se encuentran la densidad, la viscosidad, el tipo de fluido, la frecuencia cardíaca y la presión arterial. Los modelos newtonianos se compararon con los modelos no newtonianos para determinar el compromiso entre la utilización de recursos computacionales en la simulación y los resultados obtenidos.

Modelos de sangre no newtonianos

Los efectos no newtonianos de la sangre son despreciados cuando el diámetro del vaso sanguíneo considerado es mucho mayor que el diámetro de las partículas sólidas en el fluido sanguíneo, por ejemplo, en la aorta ascendente (y la aorta torácica en general) y particularmente a velocidades de corte menores a 100 s^{-1} (Johnston, Johnston, Corney y Kilpatrick, 2004, Finocchiaro et al., 2009). En caso de realizar un estudio sobre la circulación en las redes capilares del sistema circulatorio, la hipótesis de un comportamiento newtoniano pierde validez ya que el diámetro de estos vasos se reduce considerablemente hasta llegar al rango de micrómetros, en otras palabras, conforme se realizan estudios o modelos en vasos sanguíneos distales al corazón, el comportamiento reológico no newtoniano en la interacción fluido-estructura cobra mayor validez. Un modelo de sangre no newtoniano ideal debe satisfacer los siguientes parámetros (Goubergrits, Wellenhofer y Kertzsch, 2008):

- Simular el fenómeno de adelgazamiento por corte ("shear thinning"), es decir, la disminución en la viscosidad cuando se incrementa la tasa tensión de corte.

- Incluir la dependencia del hematocrito.
- Considerar la dependencia de la temperatura.
- Contener la concentración de proteínas en la sangre.
- Valorar las condiciones del flujo, es decir, si el flujo es pulsátil o continuo.

A continuación, se presenta un resumen de los principales modelos no newtonianos utilizados en la descripción del flujo sanguíneo.

Ley de Potencias ("Power Law")

Este modelo es una modificación del Modelo Newtoniano con la velocidad de deformación ($\dot{\gamma}$) elevada a una potencia que incluye un índice no newtoniano (Goubergrits et al., 2008, Johnston et al., 2004). Este comportamiento es la base para los otros modelos no newtonianos y se expresa por medio de la ecuación 1:

$$\mu = \mu_0 (\dot{\gamma})^{n-1} \quad (1)$$

La ecuación 1 representa el cambio en la viscosidad μ debido a los parámetros m_0 y n , donde m_0 es un índice de consistencia de valor 0,035 y n es el índice no newtoniano con valor de 0,6. Los parámetros m_0 y n corresponden a constantes de ajuste determinadas experimentalmente, entre más alto sea m_0 más viscoso es el fluido y entre más alejado se encuentre n de la unidad, las características no newtonianas se hacen más pronunciadas (Kim, 2002).

Modelo Casson

Este modelo es una modificación de la Ley de Potencias que incluye la dependencia de la viscosidad con el hematocrito (Goubergrits et al., 2008). La expresión de la viscosidad en este caso se considera como:

$$\mu = \left(\sqrt{\mu_\infty} + \sqrt{\frac{\lambda_y}{\dot{\gamma}}} \right)^2 \quad (2)$$

Los parámetros utilizados son: $m_0 = 0,0012$, $0 < H < 1$, donde H representa el hematocrito, es decir, el porcentaje de eritrocitos en la sangre, $\lambda_y = 0,01(0,625 - H)^3$ y $\mu_\infty = \mu_0^*(1-H)^{-2.5}$. Ambas dependencias al hematocrito (λ_y y μ_∞) son ajustadas experimentalmente (Goubergrits et al., 2008).

Modelo Carreau

Este modelo asume que la viscosidad varía siguiendo la siguiente ecuación (Shibeshi & Collins, 2006):

$$\mu = \mu_{\infty} + (\mu_0 - \mu_{\infty}) \left[1 + (\lambda \dot{\gamma})^2 \right]^{\frac{n-1}{2}} \quad (3)$$

En este modelo μ_0 y μ_{∞} son las viscosidades límites a razones de deformación por presión de cero e infinito respectivamente, λ es la constante de relajación y n es el índice No-Newtoniano del modelo de Ley de Potencias. Los valores experimentales recomendados para este modelo son: $\mu_{\infty}=0,00345$ Ns/m², $\mu_0=0,056$ Ns/m², $\lambda = 10,976$ y $n = 0,3568$ (Johnston et al., 2004).

Modelo Walburn-Schneck

Este modelo no newtoniano es también una modificación del modelo de la Ley de Potencias. Walburn y Schneck describieron los datos experimentales obtenidos de sangre con anticoagulantes por medio de cuatro constantes y dos parámetros que incluyen la dependencia al hematocrito (H) y la concentración total de proteína menos albúmina ($TPMA$) (Goubergrits et al., 2008). La viscosidad se describe con la siguiente expresión:

$$\mu = C_1 e^{C_2 H} \left[e^{C_4 \left(\frac{TPMA}{H^2} \right)} \right] (\dot{\gamma})^{-C_3 H} \quad (4)$$

donde las constantes se determinaron experimentalmente en: $C_1=0,00797$; $C_2=0,0608$; $C_3=0,00499$ y $C_4=14,585$. A partir de los resultados experimentales que obtuvieron, estos autores proponen un modelo con $H=40\%$ y $TPMA=25,9$ g/l.

Modelo GPL ("Generalized Power Law")

En este estudio se incorpora el modelo de la Ley de Potencias a bajas velocidades de corte, el modelo newtoniano a velocidades de corte media y altas y, en consecuencia, el Modelo Casson se considera un caso límite. La viscosidad en este caso se describe como:

$$\mu = 0,1 \lambda (\dot{\gamma})^{n-1} \quad (5)$$

donde

$$\lambda(\dot{\gamma}) = \mu_{\infty} + \Delta\mu e^{-\left(1+\frac{\dot{\gamma}}{a}\right)e^{-b/\dot{\gamma}}} \quad (6)$$

$$n(\dot{\gamma}) = \mu_{\infty} + \Delta n e^{-\left(1+\frac{\dot{\gamma}}{c}\right)e^{-d/\dot{\gamma}}} \quad (7)$$

Este modelo tiene los siguientes valores ajustados experimentalmente: $\mu_{\infty}=0,035$; $n_{\infty}=1,0$; $\Delta\mu=0,25$; $\Delta n=0,45$; $a=50$; $b=3$; $c=50$ y $d=4$.

Modelo GPL modificado

En este caso se modifica el Modelo GPL para incluir la dependencia con el hematocrito, la temperatura y la concentración de $TPMA$ (Goubergrits et al., 2008), (Johnston et al., 2004). La expresión de la viscosidad está dada por:

$$\mu = C_2 e^{\left(\frac{C_1 TPMA}{H^2}\right)} \cdot \left[\mu_0 (1-H)^{-2,5} + \Delta\mu e^{-\left(1+\frac{\dot{\gamma}}{A}\right)e^{-B/\dot{\gamma}}} \right] \quad (8)$$

(8)

Donde

$$A = a_1 H^2 + a_2 H + a_3 T + a_4 \quad (9)$$

$$B = b_1 H^2 + b_2 H + b_3 T + b_4 \quad (10)$$

Con los siguientes valores ajustados experimentalmente: $\mu_0=0,0008585$; $\Delta\mu=0,00707$; $C_1=0,0019225$; $C_2=0,7639$; $0 < H < 1$; $a_1=0,14054375$; $a_2=-14,7089379$; $a_3=1,3072387$; $a_4=383,039$; $b_1=-0,02162045$; $b_2=2,1138407$; $b_3=-0,193464$; $b_4=-41,2627$.

El modelo GPL modificado presenta las mismas ventajas que el modelo GPL e incorpora la concentración de $TPMA$, lo que significa que se obtiene un modelo más flexible, con la consecuencia de que, al tener una mayor cantidad de coeficientes en la ecuación constitutiva, aumenta la demanda en el procesamiento computacional de las simulaciones.

Evaluación cualitativa de antecedentes

En las simulaciones de la interacción fluido-estructura entre el flujo sanguíneo y las arterias de mayor diámetro, como el caso de la aorta, es común el uso de fluidos newtonianos. En este caso se asume que la sangre se comporta como un fluido homogéneo y

con viscosidad constante, también se asume que la velocidad de corte es mayor a 100 s^{-1} y el diámetro de los vasos es mucho mayor al tamaño de los glóbulos rojos.

Con el objetivo de evaluar los antecedentes y simulaciones realizadas por diferentes autores en la literatura disponible, se presenta la definición de un grupo de indicadores utilizados para analizar las características de los modelos estudiados, así como la descripción de la escala de medición que se usó para calificar cada una de las variables definidas:

1. Condiciones de entrada/salida: Descripción de las condiciones que se aplicaron a la entrada y/o salida del modelo; se consideran entradas de presión y velocidad y si el flujo es constante o pulsátil.
2. Flexibilidad: Grado en que la simulación permite introducir modificaciones en sus parámetros. Si el modelo no indica o no permite modificaciones en la evaluación, se indica con el símbolo (×).
3. Tipo de pared: Descripción de las condiciones que se utilizaron para modelar la pared arterial; si el modelo no indica el tipo de material se indica con el símbolo (×).
4. Interacción fluido-estructura: Grado en que se desarrolló la interacción entre la pared arterial y el fluido sanguíneo. Se definen las siguientes escalas:
 - Acople fuerte: Interacción en ambos sentidos fluido-estructura (√).
 - Acople débil: Interacción en un solo sentido de fluido a estructura (↔).
 - No incluye interacción (×).
5. Consumo de recursos computacionales: Capacidad de procesamiento requerida para la resolución del modelo. En la mayoría de los estudios consultados no se establece de forma explícita el consumo de recursos computacionales, por lo que se realizó una estimación de acuerdo con las dimensiones (2D y 3D) y la cantidad de elementos utilizados para la resolución del modelo. La escala utilizada se describe a continuación:
 - Básica: La simulación puede llevarse a cabo en una PC con core DUO y 4 GB de RAM o menos.

- Media: Requiere una cantidad de memoria RAM mayor a 4 GB.
 - Alta: Requiere el uso de un Cuad-core y hasta 8 GB de memoria RAM.
 - Muy alta: Se requiere más de un Cuad-core.
6. Precisión: Grado en que los resultados obtenidos se parecen a los valores típicos o normales. Este indicador se califica como:
 - Satisfactoria (√).
 - Parcialmente satisfactoria (↔).
 - Deficiente (×).
 7. Pertinencia de la documentación: Grado en que la documentación existente describe el funcionamiento de la simulación.
 8. Acople entre diferentes materiales: grado en que se incluyen diferentes clases de materiales al modelo.

Los resultados de la evaluación de los modelos estudiados se muestran en el cuadro 1. En esta tabla se observa que en los modelos estudiados no se incluye el acople entre materiales con características diferentes, como sería el caso del acople de un dispositivo implantable y la arteria. También se destaca que en las publicaciones evaluadas se considera la interacción del flujo sobre la estructura, pero ningún caso contempla el efecto de la deformación de la estructura sobre el nuevo patrón de flujo, es decir; los modelos no involucran la interacción fluido-estructura en ambos sentidos.

Se observa que los principales parámetros en estos modelos son la densidad y la viscosidad dinámica. Para un modelo de sangre newtoniano, incompresible y homogéneo, los valores normales de estos parámetros varían en la literatura entre 1044 kg/m^3 y 1176 kg/m^3 para la densidad y entre 3.05 mPa s y 3.5 mPa s para la viscosidad (Tan et al., 2008; Watson, 2007, Mabotuwana et al., 2007, Ubal et al., 2010).

Parámetros para modelado de fluido sanguíneo

Las características y composición propias de la sangre hacen difícil la construcción de un modelo funcional que pueda ser utilizado en diversos estudios, por lo cual es común realizar simplificaciones para cada caso de estudio particular. La literatura consultada (cuadro 1) presenta diversas aproximaciones a

Cuadro I. Evaluación cualitativa de antecedentes consultados.

Ref	Condición entrada-salida	Flexibilidad	Tipo de pared	Interacción fluido-estructura	Consumo de recursos	Precisión	Documen-tación	Acople entre materiales
(Tan et al., 2008)	Velocidad pulsátil tres ciclos cardíacos e intensidad de turbulencia 1,5% a la entrada. A la salida 40-60% del flujo de entrada	×	×	×	Media	√	×	×
(Watson, 2007)	Onda de presión para un ciclo cardíaco a la entrada. Condiciones de desplazamiento en la pared ventricular.	Parámetros R y C permiten modelar arterias rígidas y elásticas respectivamente	Rígida y/o flexible	↔	Media	↔	√	×
(Mabotuwana, Cheng y Pullan, 2007)	Onda de presión en la entrada para dos ciclos cardíacos y relación presión-radio en el interior de la geometría	La variaciones en el radios del conducto. Densidad, viscosidad y perfil de velocidad.	Elástica	×	Alta	√	√	×
(Ubal, Campana, Rodríguez, Berli y Paolo, 2010)	Variación senoidal del caudal para tres semiciclos en la entrada	Densidad y viscosidad sanguínea	Rígida	×	Media	×	√	×
(Leuprecht, Kozerke, Boesiger y Perktold, 2003)	Perfil de velocidad tipo Plug-In a la entrada y perfil de deformación aplicado a las paredes obtenidos mediante MRI	Densidad y viscosidad sanguínea	×	×	Alta	√	√	×
(Goubergrits et al., 2008)	Perfil de velocidad en la entrada pero no se indica si es pulsátil. Razón de flujo aplicado a la salida	Modelos paramétricos, permiten ajustes con datos experimentales	Rígida	×	Alta	√	√	×

Continúa...

Continuación

Ref	Condición entrada-salida	Flexibilidad	Tipo de pared	Interacción fluido-estructura	Consumo de recursos	Precisión	Documentación	Acople entre materiales
(Gao, Watanabe y Matsuzawa, 2006)	Perfil de velocidad pulsátil a la entrada y presión cero aplicado a la salida	×	Elástica	√	Alta	↔	√	×
(Vasava, Jalali y Dabagh, 2009)	Condiciones de presión aplicadas tanto a la entrada como a la salida	Densidad y viscosidad sanguínea	Rígida	×	Alta	√	√	×
(Gao, Guo, Sakamoto y Matsuzawa, 2006)	Perfil de velocidad a la entrada. No se indican las condiciones aplicadas a la salida	×	Elástica	√	Alta	↔	×	×

esta labor. Los parámetros utilizados por diferentes autores para modelar el fluido sanguíneo se presentan en el cuadro 2, que incluye características como tipo de fluido, densidad, viscosidad y, por último, particularidades del flujo utilizado para el modelo respectivo (Araya-Luna, 2012).

Se observa que los principales parámetros en estos modelos son la densidad y la viscosidad dinámica. Para un modelo de sangre newtoniano, incompresible y homogéneo, los valores normales de estos parámetros varían en la literatura entre 1044 kg/m^3 y 1176 kg/m^3 para la densidad y entre $3,05 \text{ mPa s}$ y $3,5 \text{ mPa s}$ (Zakaria, Robertson y Kerber, 2008).

Análisis comparativo entre modelos newtonianos y no newtonianos

Con la finalidad de observar las diferencias en el comportamiento del flujo con diferentes modelos y validar las aproximaciones implementadas, se contrastaron los resultados de tres modelos de flujo de sangre diferentes: un modelo newtoniano y los modelos no newtonianos de Ley de Potencias y Carreau.

El modelo sanguíneo desarrollado se basa en las ecuaciones de Navier-Stokes para un fluido viscoso e incompresible. El segmento de arteria utilizado

para las simulaciones, por su composición y características mecánicas, se considera como un material viscoelástico con un Módulo de Young (E) de $2,5 \text{ MPa}$, una densidad de tejido (ρ) de 960 kg/m^3 y una razón de Poisson (ν) de $0,5$ (Gao, Guo, et al., 2006; Gao, Watanabe, et al., 2006). La geometría empleada está formada por una tubería cilíndrica con longitud de 150 mm , un radio externo de 25 mm y un grosor de pared arterial de 2 mm . Los modelos se resolvieron mediante la plataforma de simulación COMSOL Multiphysics® usando métodos de elementos finitos para un cuarto de la geometría y aplicando condiciones de simetría, como se muestra en la figura 1.

Las condiciones de frontera aplicadas tienen la forma de onda de presión característica en la salida de la válvula aórtica. En la figura 2 se muestran la presión en la entrada y en la salida. La condición de frontera aplicada a la salida es la onda de entrada atenuada y desfasada; la atenuación se debe al gasto energético por efectos de transporte y con el desfase se considera la velocidad de propagación de onda. La atenuación de la presión promedio es de 34 Pa (Trainini, 2004), lo que equivale a una caída de presión de 2 Pa/cm (Anza & Esteves, 2011). Por otro lado, la teoría de propagación de ondas aplicada a la biomécanica indica que la velocidad de propagación

Cuadro 2. Parámetros establecidos en modelos de fluido sanguíneo.

Tipo de fluido	Densidad (r) [kg/m ³]	Viscosidad (m) [mPa s]	Características del flujo
Newtoniano incompresible (Tan et al., 2008)	1176	3,34	Pulsátil (paso 0,01 s) Razón de flujo de salida 40 – 60 % del flujo de entrada
Newtoniano incompresible (Ghista, Zhong, Ng, & Tan, n.d.)	-	-	p=100mmHg; Dp=20mmHg (Normal) p=120mmHg; Dp=20mmHg (aterosclerosis) p=100mmHg; Dp=30mmHg (arterosclerosis)
Newtoniano y No Newtoniano (Generalized Power Law) (Watson, 2007)	1060	2,7	Geometría del corazón en 2D, utiliza flujo laminar
Newtoniano incompresible, homogéneo (Mabotuwana et al., 2007)	1050	3,2 (cm ² /s)	Flujo axisimétrico P ₀ =12,4 ; Dp=2,2 kPa P _{OUT} =cte = 11,0 kPa
Newtoniano incompresible (Ubal et al., 2010)	1050	3,05	F _c =70 – 180 lat/min
Newtoniano incompresible (Zhao-rong, Gang, Yong, Zhong-zhao, & Kai-rong, 2003)	1050	4,0	Flujo estacionario bajo presión promedio p _m =13,5 kPa combinado con flujo pulsátil
Newtoniano incompresible (Zakaria et al., 2008)	1050	3,5	f ₀ =1Hz 60 lat/min
Newtoniano 3D incompresible (Leuprecht et al., 2003)	1044	3,65	ω=7,34 s ⁻¹ corresponde a 70 lat/min y velocidad media de entrada v ₀ =1,32x10 ⁻¹ m/s
No newtoniano (Goubergrits et al., 2008)	-	Modelo de Casson modificado Modelo de Walburn y Schneck Generalized Power Law (GPL) GPL modificado	Perfil de velocidad "plug" asumido la entrada. Una relación de tasa de flujo asumida en las salidas de la bifurcación de 50/45/5
Incompresible y viscoso (Rayz & Berger, 2010)	-	-	Perfil de velocidad parabólico o uniforme asumido en la entrada Presión ambiente o preescrito a la salida.
Newtoniano	1050	3,5	-
Homogéneo e incompresible (Vasava et al., 2009)	1060	5	El valor de P _i fue 11208, 11160, 11148, 11148 y 11120 Pa para la entrada de sección post-ventricular; arteria braquiocefálica, arteria carótida izquierda, arteria subclaviana izquierda y aorta descendente respectivamente

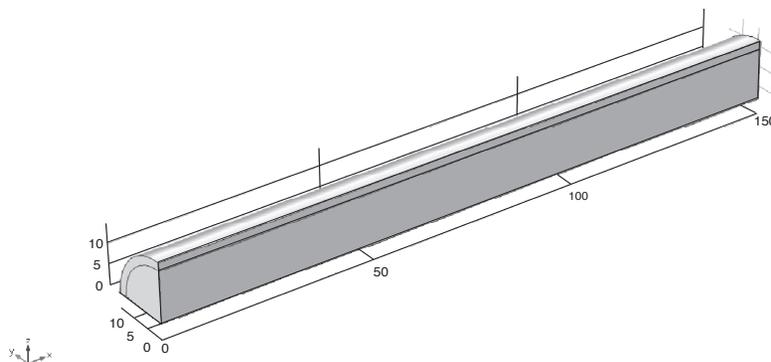


Figura 1. Geometría utilizada en la evaluación de modelos de sangre (las escalas están en mm).

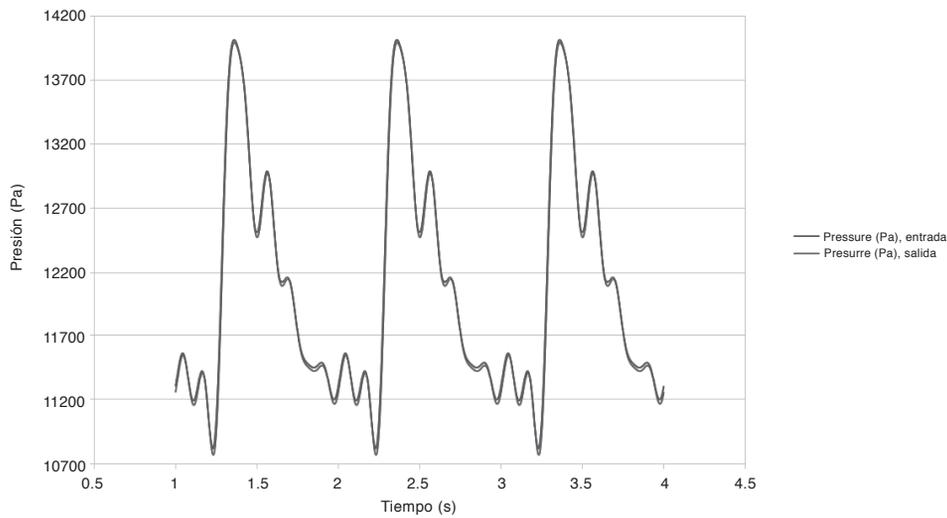


Figura 2: Condiciones de entrada y salida en el conducto arterial utilizadas en las simulaciones.

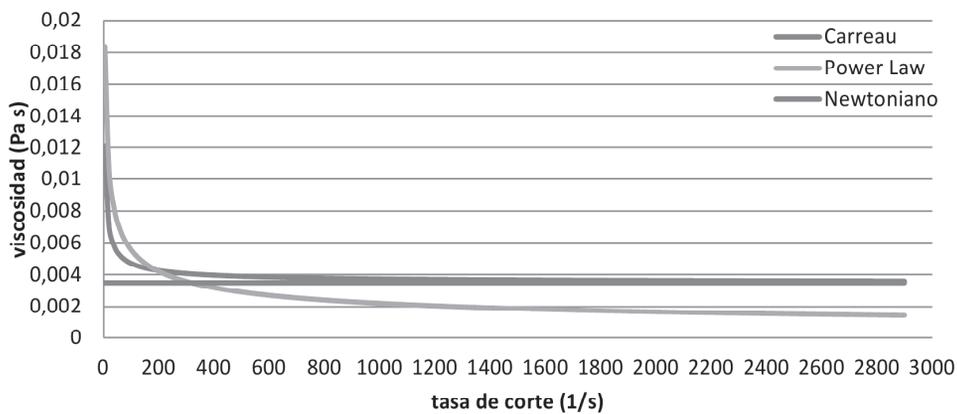


Figura 3. Viscosidad en función de la tasa de corte para tres modelos de sangre (Newtoniano, de Carreau y de Ley de Potencia).

es de aproximadamente $83,3 \text{ cm/s}$ (Li, 2004). La señal se construye utilizando hasta el octavo armónico de la serie de Fourier de la presión en la aorta ascendente mostrada en (Li, 2004) y el desfase en la salida depende de la longitud de la pared arterial (Araya-Luna, 2012). El cálculo de los coeficientes de la serie de Fourier se realizó utilizando MATLAB®.

El comportamiento de la viscosidad en función de la tasa de corte para los modelos Newtoniano, de Ley de Potencias y de Carreau se presenta en la figura 3, en la cual se observa que la viscosidad predicha tanto por el Modelo de Carreau como por el de Ley de Potencias aumentan considerablemente

para tasas de corte menores a 100 s^{-1} . A altas tasas de corte, superiores a 1600 s^{-1} , se observa que el modelo de Ley de Potencias disminuye hasta un 50% de los valores típicos esperados; por otro lado, se observa la concordancia que existe entre el Modelo de Carreau y el Modelo newtoniano para un amplio rango de tasas de corte ($1000 - 2900 \text{ s}^{-1}$).

Estos resultados concuerdan con lo esperado a partir del estudio de modelos no newtonianos. La principal ventaja de la Ley de Potencias es su simpleza; requiere únicamente dos parámetros, lo cual significa que los recursos computacionales necesarios para procesar este modelo son bastante

bajos. No obstante, su principal carencia radica en que no es capaz de predecir de forma adecuada el comportamiento de los fluidos no newtonianos tanto en regiones de altas como de bajas tasas de corte (Kim, 2002). Para el caso del fluido sanguíneo a bajas tasas de corte (200 s^{-1}), la viscosidad aumenta rápidamente, llegando a valores críticos para tasas de corte cercanas a 0 s^{-1} donde μ tiende a infinito. Por otro lado, en altas tasas de corte ($>1200 \text{ s}^{-1}$) este modelo subvalora la viscosidad.

El Modelo de Carreau requiere cuatro parámetros, dos más que el Modelo de Ley de Potencias, pero ofrece un comportamiento más adecuado tanto para altas como para bajas tasas de corte. A altas tasas de corte la viscosidad tiende al valor utilizado para modelos newtonianos $3,5 \text{ mPa s}$, mientras que a bajas tasas de corte el valor de la viscosidad tiende a $\mu_0 = 0,056 \text{ Pa s}$. Su principal desventaja es que no incluye los efectos del hematocrito, por lo que la adaptación del modelo a condiciones de un paciente en particular es difícil de lograr.

También se observa que a bajas tasas de corte el comportamiento no newtoniano de la sangre es más pronunciado; esto también concuerda con estudios reológicos de sangre que muestran que a tasas de corte inferiores a 100 s^{-1} los glóbulos rojos tienden a agruparse (coagulación de la sangre), aumentando así las características no newtonianas del fluido (Behbahani et al., 2009, Finocchiaro et al., 2009, Owens, 2006, Shibeshi y Collins, 2006). Las tasas típicas de corte de la sangre en el cuerpo humano son superiores a 100 s^{-1} . En estudios experimentales (Behbahani et al., 2009) se ha

demostrado que a estas tasas de corte, la viscosidad de la sangre humana con un hematocrito de 45% alcanza valores constantes de entre $3,5$ y $4,0 \text{ mPa s}$.

En la figura 4 se presenta el perfil de la velocidad para los tres modelos, utilizando condiciones iniciales para simular el comportamiento de la sangre con tasas de corte entre 200 y 800 s^{-1} . Se observa que tanto para el Modelo de Carreau como para el Newtoniano la velocidad presenta el mismo orden de magnitud, en tanto que la diferencia del Modelo de Ley de Potencias se debe a que este subestima la viscosidad sanguínea y eso provoca un aumento en la velocidad en comparación con los otros dos modelos. Estos resultados permiten justificar el uso de un modelo newtoniano en la caracterización de un modelo de sangre en vasos sanguíneos mayores.

Conclusión

Este trabajo describe la dinámica de la sangre en vasos sanguíneos mayores, resumiendo diferentes modelos y parámetros utilizados para la descripción matemática del comportamiento de la sangre. Estas descripciones permiten explotar el potencial de la dinámica computacional de fluidos en el estudio de diversas enfermedades, así como la influencia sobre el comportamiento reológico de la sangre al estar en contacto con elementos implantables. La ventaja de utilizar estas descripciones matemáticas se traduce en menores costos de implementación de experimentos in-vitro e in-vivo, mayor facilidad para estudiar los efectos de cambios en la geometrías de los elementos involucrados y menor infraestructura para realizar estos estudios.

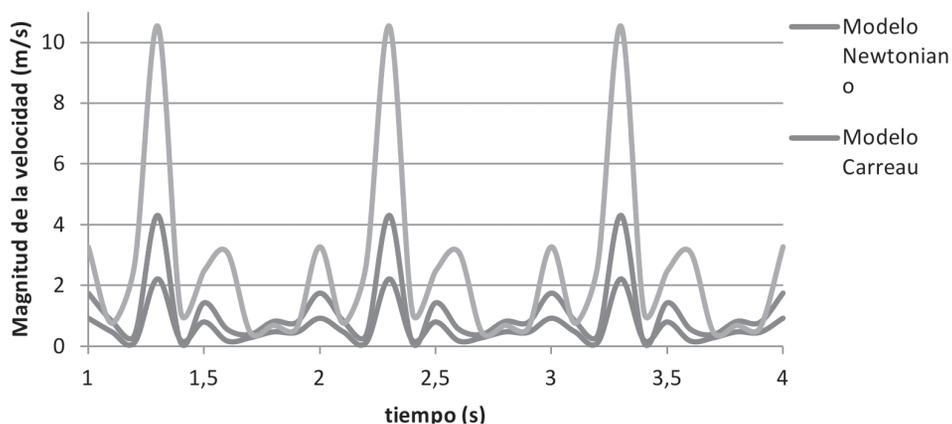


Figura 4. Perfil de velocidad media en función del tiempo para los tres modelos implementados utilizando condiciones iniciales.

Bibliografía

- Anza, J.J. & Esteves, M.A. (2011). *Fluid Structure Interaction Applied to Upper Aorta Blood Flow*. 2011 COMSOL Conference in Stuttgart.
- Araya-Luna, D.E. (2012). *Modelado de la interacción del fluido sanguíneo sometido a presión pulsátil en la unión de un conducto arterial y un conducto rígido* (p. 140).
- Behbahani, M., Behr, M., Hormes, M., Steinseifer, U., Arora, D., Coronado, O. & Pasquali, M. (2009). A review of computational fluid dynamics analysis of blood pumps. *European Journal of Applied Mathematics* 20(04): 363-397. doi:10.1017/S0956792509007839.
- Finocchiaro, T., Heinke, S., Leßmann, M., Laumen, M., Steinseifer, U., Schmitz-ode, T., Leonhardt, S. et al. (2009). Design , development , and validation of new VAD / TAH concepts. *Biomedizinische Technik/Biomedical Engineering* 54: 269-281. Recuperado desde <http://www.cats.rwth-aachen.de:8080/~mb/article-BMT2009a.pdf>.
- Gao, F., Guo, Z., Sakamoto, M. & Matsuzawa, T. (2006). Fluid-structure interaction within a layered aortic arch model. *Journal of biological physics* 32(5): 435-54. doi:10.1007/s10867-006-9027-7.
- Gao, F., Watanabe, M. & Matsuzawa, T. (2006). Stress analysis in a layered aortic arch model under pulsatile blood flow. *Biomedical engineering online* 5, 25. doi:10.1186/1475-925X-5-25.
- Ghista, D.N., Zhong, L., Ng, E.Y K. & Tan, R.S. (n.d.). Arterial Wave Propagation and Reflection at a Bifurcation Site. *Pulse* (p. 289-310).
- Goubergrits, L., Wellnhofer, E. & Kertzsch, U. (2008). Choice and Impact of a Non-Newtonian Blood Model for Wall Shear Stress Profiling of Coronary Arteries. En: Katashev, A., Dekhtyar, Y., Spigulis, J. & Magjarevic, R. (Eds.), *14th Nordic-Baltic Conference on Biomedical Engineering and Medical Physics. IFMBE Proceedings* (p. 111-114). Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-540-69367-3_30.
- Johnston, B.M., Johnston, P.R., Corney, S. & Kilpatrick, D. (2004). Non-Newtonian blood flow in human right coronary arteries: steady state simulations. *Journal of biomechanics* 37(5): 709-20. doi:10.1016/j.jbiomech.2003.09.016.
- Kim, S. (2002). *A Study of Non-Newtonian Viscosity and Yield Stress Blood in a Scanning Capillary-Tube Rheometer*. Drexel University.
- Leuprecht, A., Kozerke, S., Boesiger, P. & Perktold, K. (2003). Blood flow in the human ascending aorta: a combined MRI and CFD study. *Journal of Engineering Mathematics* 47(3/4): 387-404. doi:10.1023/B:ENGI.0000007969.18105.b7.
- Li, J.K.-J. (2004). *Dynamics of the Vascular System. Series on Bioengineering*, Vol. 1. (J.K.-J. Li, Ed.) (World Scie., p. 272).
- Mabotuwana, T.D.S., Cheng, L.K. & Pullan, A.J. (2007). A model of blood flow in the mesenteric arterial system. *Biomedical engineering online* 6, 17. doi:10.1186/1475-925X-6-17.
- Owens, R.G. (2006). A new microstructure-based constitutive model for human blood. *Journal of non-newtonian fluid mechanics* 140(1-3): 57-70. doi:10.1016/j.jnnfm.2006.01.015
- Rayz, V.L. & Berger, S.A. (2010). Computational Modeling of Vascular Hemodynamics. En: S. De, F. Guilak & M. Mofrad R.K. (Eds.), *Computational Modeling in Biomechanics* (p. 171–206). Dordrecht: Springer Netherlands. doi:10.1007/978-90-481-3575-2.
- Shibeshi, S. & Collins, W.E. (2006). The Rheology of Blood Flow in Branched Arterial System. *Applied rheology (Lappersdorf, Germany : Online)* 15(6): 398-405.
- Tan, F.P.P., Soloperto, G., Wood, N.B., Thom, S., Hughes, A. & Xu, X.Y. (2008). Advanced Computational Models for Disturbed and Turbulent Flow in Stenosed Human Carotid Artery Bifurcation. *IFMBE Proceedings* (p. 390-394).
- Trainini, J. (2004). Consenso de patología de la aorta. *Revista Argentina de Cardiología* 72(5), 387-401.
- Ubal, S., Campana, D.M., Rodríguez, C.F., Berli, M.E. & Paolo, D. (2010). *Análisis Computacional de flujos sanguíneos utilizando modelos 3D axisimétricos y el método de elementos finitos* (Vol. 6072). Entre Ríos, Argentina. Recuperado de http://www.bioingenieria.edu.ar/grupos/biomecompu/Archivos de Proyectos/Rese_PID_6072_Analisis_computacional_flujos_sanguineos_axisimetricos.pdf.
- Vasava, P., Jalali, P. & Dabagh, M. (2009). Computational Study of Pulsatile Blood Flow in Aortic Arch: Effect of Blood Pressure. *IFMBE Proceedings* (Vol. 25, p. 1198-1201).
- Watson, B.T. (2007). *A Fluid Structure Interaction Simulation of Blood Flow in the Left Heart*. University of Oklahoma.
- Zakaria, H., Robertson, A. & Kerber, C. (2008). A Parametric Model for Studies of Flow in Arterial Bifurcations. *Annals of biomedical Engineering* 36(9): 1515-1530. doi:10.1007/s10439-008-9531-y.
- Zhao-rong, L., Gang, X., Yong, C., Zhong-zhao, T. & Kai-rong, Q. (2003). An analysis model of pulsatile blood flow in arteries. *Applied Mathematics and Mechanics* 24(2): 230-240. doi:10.1007/BF02437630.

Aislamiento e identificación de patógenos de la estirpe silvestre del ajo (*Allium sativum* L.)

Isolation and identification of pathogens of wild garlic (*Allium sativum* L.)

Karina Astorga-Quirós¹
Claudia Zúñiga-Vega²
William Rivera-Méndez³

Fecha de recepción: 6 de agosto del 2013
Fecha de aprobación: 13 de setiembre del 2013

Astorga-Quirós, K; Zúñiga-Vega, C; Rivera-Méndez, W. Aislamiento e identificación de patógenos de la estirpe silvestre del ajo (*Allium sativum* L.). *Tecnología en Marcha*. Vol. 27, N° 1. Pág 77-84

- 1 Estudiante de Ingeniería en Biotecnología. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: kariasq@yahoo.com.
- 2 Académica. Escuela de Biología. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: czuniga@itcr.ac.cr.
- 3 Académico. Escuela de Biología. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: wrivera@itcr.ac.cr.

Palabras clave

Control biológico; *Allium sativum*; *Pseudomonas marginalis*; *Penicillium* sp.; *Sclerotium cepivorum*.

Resumen

El cultivo del ajo (*Allium sativum* L.) en Costa Rica se podría convertir en una alternativa rentable para la producción y diversificación de los agricultores de hortalizas. Sin embargo, el tipo de reproducción vegetativa que presenta facilita la transmisión y diseminación de enfermedades, lo que provoca un debilitamiento progresivo de los bulbos.

Actualmente, se buscan alternativas de manejo diferentes al control químico, para disminuir el impacto ecológico y ambiental de los patógenos que lo afectan. El control biológico es una de ellas, pero presenta dificultades para el aislamiento y la identificación certera de patógenos asociados a pudriciones que se dan en el suelo. Por lo anterior, el objetivo general de esta investigación consistió en aislar e identificar a nivel de especie cepas de *Pseudomonas marginalis*, *Penicillium* sp. y *Sclerotium cepivorum* a partir de material vegetativo de ajo en campo, para su utilización en futuros trabajos de control biológico de estas enfermedades.

La metodología seguida permitió aislar e identificar con un alto porcentaje de certeza a *P. marginalis*, así como obtener cultivos monospóricos de *Penicillium* sp. y cultivos puros de *S. cepivorum*. Las técnicas descritas constituyen la base para futuros trabajos relacionados con las fitopatologías en el cultivo del ajo.

Key words

Biologic control; *Allium sativum*; *Pseudomonas marginalis*; *Penicillium* sp.; *Sclerotium cepivorum*.

Abstract

The garlic field (*Allium sativum* L.) in Costa Rica could become a profitable alternative for the production and diversification of the vegetable farmers. However, the type of vegetative propagation that it presents facilitates the transmission and dissemination of diseases, which produces a progressive weakening of the bulbs.

Currently, different options from chemical control are being searched, in order to reduce the ecological and environmental impact of the pathogens to it. Biologic control is one of them, but it presents difficulties in the isolation and accurate identification of pathogens associated to the decay that occurs in the soil. Therefore, the general objective of this research was to isolate and identify, at a species level, strains of *Pseudomonas marginalis*, *Penicillium* sp. and *Sclerotium cepivorum*, from vegetative material of garlic in field, for its utilization in future studies of biologic control of these diseases.

The followed methodology allowed us to isolate and identify *P. marginalis* with a high accurate percentage. Also, it allowed us to obtain single-spore cultures of *Penicillium* sp. and pure cultures of *S. cepivorum*. The described techniques constituted the basis for future works related to the plant diseases in the garlic production.

Introducción

El ajo (*Allium sativum* L.) pertenece a la familia de las amarillidáceas (Amarillidaceae), subfamilia alioideas (Allioideae) (The Angiosperm Phylogeny Group, 2009). Es una especie ampliamente cultivada que ocupa el segundo lugar en importancia dentro del género *Allium* después de la cebolla (Ledezma y Apitz, 2006, FAO, 2012, Navarro, 2007, APG, 2009). Esta hortaliza se destaca porque posee fitoquímicos, fructanos (inulina) y compuestos organoazufrados como la alicina, que son importantes por sus propiedades antioxidantes, hipocolesterolémicas, antibacterianas, antifúngicas, antivirales y antiparasitarias; sin dejar de lado el uso culinario como condimento y conservante (Portela, 2007, Robinson, 2007).

En el campo, la producción se dificulta pues el ajo no produce semillas viables, por lo que se siembran los bulbos cosechados de la temporada anterior. Estas condiciones de reproducción vegetativa facilitan la transmisión y diseminación de las enfermedades, lo que causa un debilitamiento progresivo e irreversible de las variedades (García y Sánchez, 2000, Burba, 2009).

En Costa Rica, la dinámica de producción del ajo ha pasado de ser meramente familiar a un cultivo a pequeña escala, lo cual, unido a su alta estabilidad en el tiempo una vez seco, hace del cultivo una alternativa rentable para la producción.

El ajo es propenso al ataque de patógenos que causan enfermedades tanto en el follaje como en los bulbos, lo que limita los rendimientos y la calidad. Entre ellos se destacan *Penicillium spp.*, que causa el llamado "moho verde"; *Pseudomonas marginalis*, promotor de la "podredumbre blanda", y *Sclerotium cepivorum*, asociado con la "podredumbre blanca" en raíces y bulbos (Rojas et al., 2009).

Las alternativas de manejo diferentes al control químico, como lo es el control biológico, representan una de las herramientas más viables desde el punto de vista ambiental y económico. Este control puede incluir el uso de bacterias, hongos, virus, plantas superiores y microfauna. Los agentes más estudiados en el caso del ajo son los géneros *Streptomyces*, *Pseudomonas*, *Agrobacterium*, *Trichoderma* y *Bacillus* (Reinoso et al., 2006, Izzeddin & Medina, 2011). Uno de los principales problemas que se presenta con esta metodología es la dificultad que representa el

aislar e identificar con certeza los patógenos asociados a pudriciones o descomposiciones que se dan en el suelo.

Podredumbre verde o Moho azul (*Penicillium spp.*)

El género *Penicillium* (Familia Moniliaceae, División Deuteromicotina, Orden Moniliales) es un hongo de crecimiento relativamente rápido, que inicialmente forma colonias blancas aterciopeladas, las cuales van adquiriendo diferentes colores según la especie; al final quedan cubiertas de esporas con un aspecto polvoriento. La colonia está constituida por micelio de hifas delgadas septadas (Arias y Piñeros, 2008).

Este microorganismo está presente en todos los ambientes y en el caso del ajo penetra en los bulbos, aprovechando heridas o cualquier condición de estrés durante la brotación y el crecimiento. Causa lesiones amarillas cubiertas por moho blanco que posteriormente cambia a azulado (por fructificaciones), lo que impide que el bulbillo brote y que, si lo logra, se muestre con poco vigor hasta la muerte. Su control se realiza desinfectando la semilla antes de la siembra (figura 1) (Portela, 2007).

Podredumbre blanca o Torbó (*Sclerotium cepivorum* Berkeley)

Sclerotium cepivorum (Familia Sclerotiniaceae, División Eumycota, Orden Myceliales) afecta solamente a las especies de *Allium* y desarrolla estructuras de resistencia con una viabilidad mayor de 90%. Puede formar esclerocios secundarios, dentro o adyacentes a los esclerocios originales, que influyen fuertemente en su supervivencia y tienen la capacidad de resistir en el suelo por más de 20 años sin perder su efectividad (Granados y Wang, 2008, Granados, 2005, Rivera, 2011).

Su crecimiento se incrementa a altas temperaturas, de 20-27° C, cuando invade las raíces y bulbos en

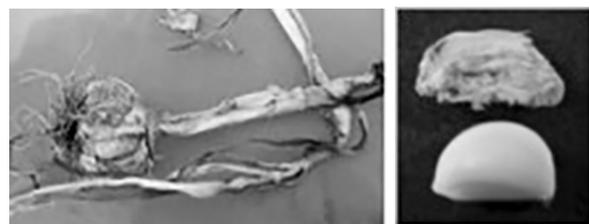


Figura 1. Ataque de ajo por *Penicillium*.

forma de un moho blanco y sedoso; posteriormente forma los esclerocios (lo cual es favorecido por temperaturas de 14-18° C) (figura 2). La germinación de estas estructuras de resistencia es estimulada por compuestos de azufre presentes en los exudados radicales del cultivo, lo que provoca que si la planta es joven, se pudra y si el ataque es tardío, puede pasar desapercibido y desarrollarse durante el almacenamiento (Piccolo, 2007).

Podredumbre blanda o bacteriosis (*Pseudomonas marginalis* o *Erwinia rhapontici* Burkholder)

Pseudomonas marginalis o *Erwinia rhapontici* (Familia: Pseudomonadaceae, Orden Pseudomonadales) causa pudrición blanda de tubérculos, bulbos y tallos. En hojas, las lesiones iniciales en los márgenes evolucionan a lesiones oscuras de mayor tamaño. En condiciones de alta humedad y temperatura, el daño se puede extender a toda la planta (figura 3). En general se considera una bacteria oportunista que se trasmite a través de la lluvia, el viento y las prácticas culturales (Acuña, 2008).

Control biológico

En el suelo existe un equilibrio microbiológico que favorece la regulación natural de las poblaciones. La diversa cantidad de microorganismos que se encuentran en una fracción del suelo cumple fun-

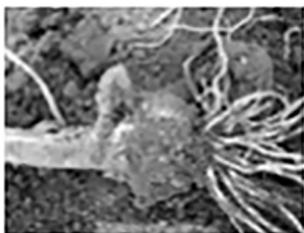


Figura 2. Ataque por *Sclerotium cepivorum* en ajo.



Figura 3. Ataque de ajo por *Pseudomonas* en campo.

ciones determinantes en la transformación de los componentes orgánicos e inorgánicos. La utilización de microorganismos saprófitos pertenecientes a la flora edáfica para controlar patógenos vegetales representa una importante herramienta del control biológico. En los últimos años, la utilización de estos microorganismos antagonistas ha demostrado ser una alternativa frente al control tradicional con productos químicos. Sin embargo, en todas estas pruebas es fundamental disponer de aislamientos bien identificados y caracterizados del patógeno.

Es por ello que el objetivo general de esta investigación consistió en aislar e identificar a nivel de especie cepas de *Pseudomonas marginalis*, *Penicillium* sp. y *Sclerotium cepivorum* a partir de material vegetativo de ajo (*Allium sativum*), para su utilización en futuros trabajos de control biológico de las plagas en campo.

Materiales y métodos

Localización y material experimental

Las pruebas y procedimientos se llevaron a cabo durante el segundo semestre de 2012 en las instalaciones del Centro de Investigación en Biotecnología (CIB) y en los laboratorios de la Escuela de Biología del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Para los bioensayos se emplearon muestras de tejido vegetal (bulbos de ajo), rizósfera y suelo con signos de las diferentes patologías en campo, procedentes de la zona norte de Cartago.

Aislamiento y caracterización de

Pseudomonas marginalis

Se seleccionó material vegetativo de ajo (*A. sativum*) que presentaba signos de pudrición por *Pseudomonas* sp. Se lavaron los bulbos con agua potable y jabón y se desgranaron y colocaron en gasa estéril. A continuación se transfirieron a una cámara de flujo laminar y se sumergieron en alcohol al 70% por 30s, en hipoclorito de sodio al 2% durante 10s y 3min en agua destilada estéril. Seguidamente se colocaron en placa Petri con filtro estéril por 2min y con bisturí previamente esterilizado se cortaron en trozos con 50% de tejido sano y 50% enfermo. Se inocularon tres segmentos por placa en Agar B. de King a $28 \pm 2^\circ$ C durante 24-48 horas. Las colonias presuntivas se transfirieron a Agar B. de King y en Agar YDC, como medio confirmativo; posteriormente, las que

se tornaron color crema se sembraron en medio B de King nuevamente, de éstas se escogieron las que presentaron fluorescencia y se les aplicó la prueba Hugh & Leifson para determinar movilidad y oxidación-fermentación.

Para la identificación de *P. marginalis* mediante Test API 20 NE se tomaron de 1-3 colonias de cepas cultivadas en Agar B. de King y se suspendieron en solución salina ajustando la concentración a 0,5 escala Mc Farland, posteriormente se agregaron 200 µl en medio James (2000) y se colocaron las alícuotas en las cúpulas. La lectura de los resultados se realizó a las 24 y 48 horas.

Aislamiento y caracterización de *Penicillium* spp.

Se seleccionaron bulbos con signos de moho azul en campo, posteriormente fueron colocados en cámaras de germinación sobre una bandeja de aluminio con papel filtro húmedo durante un periodo de 4 a 5 días, hasta el crecimiento del hongo. Los hongos fueron recuperados y transferidos a placas Petri con medio de cultivo PDA (agar-papa dextrosa, a razón de 2 ml de ácido láctico al 10% por 100 ml de medio) y se incubaron a 28-30° C por 72 horas. Seguidamente se realizó la caracterización e identificación a partir de la observación del crecimiento, color y aspecto de las colonias; por último, se identificaron a través de las claves taxonómicas para hongos imperfectos de Barnett & Hunter (1998) y López y colaboradores (1998).

La obtención del cultivo monospórico de *Penicillium* se realizó a partir del inóculo del hongo aislado por 5 días y una vez esporulado se tomó una porción de tejido fúngico y se transfirió a un tubo Eppendorf® de 1,5 ml que contenía 1 ml de Tween 0,1%, posteriormente se agitó en vórtex 15 s y se colocó en baño María 3 min. Se realizaron diluciones seriadas (hasta obtener de 50 a 100 esporas por ml en Cámara Neubauer), que se sembraron en 100 µl de la dilución 10⁵ en medio PDA distribuida con espátula Drigalski®. Se incubaron por 2 semanas, cuando se observó la germinación de una espora en microscopio a 400 aumentos, luego se transfirió a otra placa con PDA y se continuó con la incubación hasta el desarrollo total de la colonia (Arias y Pineros, 2008).

Aislamiento de *Sclerotium cepivorum*

Para el aislamiento primario de cepas de *S. cepivorum* se siguió la metodología descrita por Vimard y colaboradores (1986), que consiste en separar los esclerocios de las partículas del suelo mediante un gradiente de sacarosa y posteriores filtraciones. Cuando las cepas provenían de la colección micológica del CIB, los esclerocios se desinfectaron, se colocaron en gasa y se transfirieron a cámara de flujo laminar; después se sumergieron en alcohol al 70% por 30s, en hipoclorito de sodio producto comercial al 3% 10 s y 3 min en agua destilada. Seguidamente se inocularon en medio Agar extracto de ajo (EAA) y PDA ac a 28° C por 5 días (Rivera, 2011).

Además se desarrolló la técnica de cinta pegante para los género fúngicos (*Penicillium*, *Sclerotium*) que consistió en cortar 4 cm de cinta, que se tomó con pinzas y se presionó firmemente sobre la colonia del hongo, posteriormente esta tira se colocó en un portaobjetos con una gota de azul de lactofenol.

Las cepas de los hongos obtenidas a partir de su cultivo se identificaron con la clave taxonómica Barnett & Hunter (1998) a partir de tinción con azul de lactofenol, para la diferenciación de estructuras.

Conservación de cepas

Los microorganismos aislados e identificados se conservaron en tubos inclinados con medio de cultivo y sellados con aceite estéril. Posteriormente se refrigeraron a 4° C.

Resultados y discusión

Aislamiento e identificación de *Pseudomonas marginalis*

El cultivo de las bacterias a partir de los bulbos de ajo condujo al aislamiento y la identificación de *Pseudomonas* (figuras 4 y 5a). El crecimiento en el medio selectivo YDC facilitó el cultivo de microorganismos pertenecientes al género de interés, mientras que los medios Agar Eosina y Azul de metileno y agar glucosado terminaron de confirmar la identificación de colonias, que por su forma y cambio de coloración indicaban que se trataba de *Pseudomonas*.

Lo anterior se confirmó con las pruebas bioquímicas individuales mostradas en el cuadro I. Para la

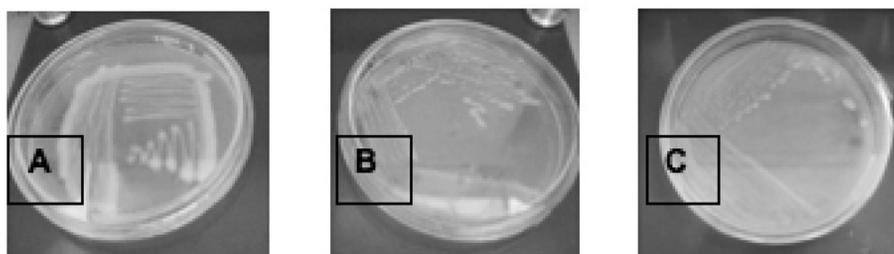


Figura 4. Aislamiento de *Pseudomonas*: a) crecimiento en medio selectivo YDC, b) cepa aislada en medio Agar Eosina y Azul de metileno, c) crecimiento en Agar Glucosado.



Figura 5. Aislamiento de *Penicillium* sp. En a. Conidios e hifas aumento 40X .b) En PDA a los 6 días de incubación 28±1°C. c.) Subcultivo monospórico en PDA ac.

caracterización a nivel de especie, la prueba API 20NE condujo a un 92,5% de identificación para *Pseudomonas marginalis* (cuadro 2). Es importante recordar que el sistema de API se basa en reacciones miniaturizadas que brindan un código numérico, las cuales, con la utilización de un algoritmo específico determinan una serie de porcentajes de identificación. El porcentaje más alto representa una mayor probabilidad de identificación correcta.

Se considera que un 92,5% es un buen porcentaje de identificación, que está asociado a una alta probabilidad de que la bacteria sea *P. marginalis*.

Aislamiento y caracterización de *Penicillium* spp.

En lo que se refiere a los hongos, la cepa de *Penicillium* obtenida fue identificada con la clave taxonómica Barnett & Hunter (1998) a partir de tinción con azul de lactofenol para la diferenciación de estructuras (figura 5a).

A este aislamiento se le realizó un proceso de cultivo monospórico, el cual garantiza la uniformidad del material genético (Figura 5b,c). Este procedimiento se considera fundamental si luego se quieren desa-

rollar estudios tendientes a la identificación de la especie.

Aislamiento y caracterización de *Sclerotium cepivorum*

Después de 5 días de incubación a 28° C, a partir de los esclerocios cultivados se obtuvieron colonias bien desarrolladas. Estas presentan abundante micelio blanquecino y la formación de nuevos esclerocios en el borde la placa. La observación al microscopio a 400 y 1000 aumentos indicó que se trataba de la especie *cepivorum* por las estructuras tipo “clamp” y las características de las hifas (figuras 6 y 7).

Conclusiones

La metodología descrita permitió aislar e identificar positivamente colonias de *Pseudomonas marginalis* a partir de bulbos de ajo.

En lo que respecta a los hongos, se obtuvieron e identificaron con microscopía óptica cultivos monospóricos de *Penicillium* sp. y cultivos puros de *Sclerotium cepivorum*.

Cuadro 1. Resultados de pruebas de identificación para *Pseudomonas*.

Pruebas	<i>Pseudomonas</i>
Gram	Bacilos (-)
B. de King	Positivo
YDC	Colonias crema
Prueba Hugh & Leisson (O/F)	Oxidativo
Sangre	Positivo
Glucosado	Positivo
Peptona	Positivo
Motilidad	Positivo
Catalasa	Positivo
Nitrato	Positivo
Agar Nutritivo 1% dextrosa	Negativo
Voges Proskauer	Negativo
Citrato Simmonds	Negativo
Voges Proskauer	Negativo
Tolerancia 6,5% NaCl	Negativo
Hidrólisis Almidón	Negativo
Rojo de metilo	Negativo

Cuadro 2. Resultados de pruebas API de identificación para *Pseudomonas*.

Pruebas	<i>Pseudomonas</i>
L-triptofano	Api 20 NE Negativo
D-Glucosa	Api 20 NE Positivo
L-Arginina	Api 20 NE Negativo
Urea	Api 20 NE Negativo
Citrato Férrico	Api 20 NE Positivo
Gelatina	Api 20 NE Positivo
PNPG	Api 20 NE Positivo
D-manosa	Api 20 NE Positivo
D-manitol	Api 20 NE Positivo
N-acetil Glucosamina	Api 20 NE Positivo
D-maltosa	Api 20 NE Positivo
Gluconato	Api 20 NE Positivo
Ácido cáprico	Api 20 NE Negativo
Ácido adípico	Api 20 NE Negativo
Ácido málico	Api 20 NE Positivo
Citrato trisódico	Api 20 NE Positivo
Ácido fenilacético	Api 20 NE Negativo
Citocromo oxidasa	Api 20 NE Negativo

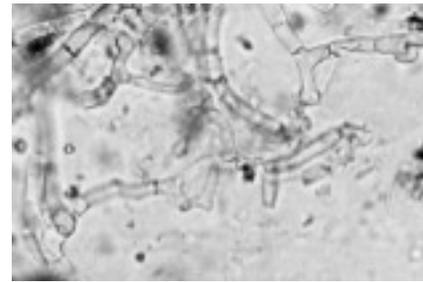


Figura 6. Vista al microscopio de *Sclerotium cepivorum* (400x).

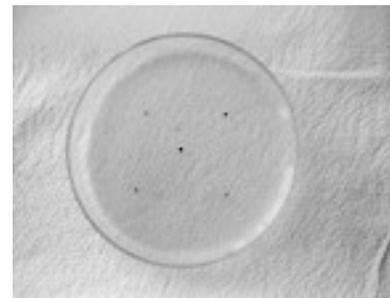


Figura 7. Cultivo de *Sclerotium cepivorum*: a) cultivo de esclerocios producidos *in vitro*, b) cultivo mediante discos con micelio.

Las técnicas descritas constituyen la base para futuros trabajos relacionados con las fitopatologías en el cultivo del ajo.

Bibliografía

- Acuña, R. (2008). *Compendio de Fitopatógenos de cultivos agrícolas en Chile*. Departamento de Protección Agrícola. 122 pp.
- APG. (2009). The Angiosperm Phylogeny Group 2009. An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG III. *Botanical Journal of the Linnean Society* 161, 105-121.
- Arias, E. & Piñeros, P. (2008). Aislamiento e identificación de hongos filamentosos de muestras de suelo de los Páramos de Guasca y Cruz Verde. Tesis Microbiología, Universidad

- Pontificia Javeriana, Bogotá, D.C. Consultado el 20 de septiembre de 2012. Disponible en: <http://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/ciencias/tesis226.pdf>.
- Barnett, H.L. & Hunter, B. (1998). *Illustrated genera of imperfect fungi*. 4 ed. Minnesota. US: Burgess Publishing Company, APS Press. p. 241.
- Barba, J.L. (2009). Garlic (*Allium sativum* L.) genetic improvement and seed production. Possibilities of adaptation to variable environments. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas* 3 (1): 28-44.
- FAO. (2012). Base de datos estadística FAOSTAT. Consultado el 31 de agosto de 2012. Disponible en: http://faostat3.fao.org/home/index_es.html?locale=es#DOWNLOAD.
- García, L.J. & Sánchez, F.J. (2000). Revisión: Efectos cardiovasculares del ajo (*Allium sativum*). *ALAN* 50(3). Consultado el 15 de septiembre de 2012. Disponible en: http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S0004-0622200000300002&script=sci_arttext&tlng=pt.
- Granados, M. (2005). Pudrición blanca de la cebolla: una enfermedad difícil de combatir. *Agronomía costarricense* 29(2). Consultado el 15 de setiembre de 2012. Disponible en <http://es.scribd.com/doc/76713474/sclerotium-sp>.
- Granados, M.M. & Wang, A. (2008). Efecto de biocontroladores aislados en fincas productoras de cebolla sobre la pudrición blanca (*Sclerotium cepivorum*). *Revista Agronomía Costarricense* 32 (1):9-17. Consultado del 15 de septiembre de 2012. Disponible en: <http://www.latindex.ucr.ac.cr/agro-costar-32-1/agrocostar-32-1-01.pdf>.
- Hugh, R. & Leifson, E. (1953). The taxonomic significance of fermentative versus oxidative metabolism of carbohydrates by various gram-negative rods. *J. Bacteriol.* 66:24-26. Consultado el 28 de octubre de 2012. Disponible en: (<http://www.microbelibrary.org/component/resource/laboratory-test/3151-oxidative-fermentative-test-protocol>).
- Izzeddin, N. & Medina, L. (2011). Efecto del control biológico por antagonistas sobre fitopatógenos en vegetales de consumo humano. *Salus* 15(3). Consultado el 28 de octubre de 2012. Disponible en: http://www2.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-71382011000300005&lng=es&nrm=iso.
- James, E. (2000). Nitrogen fixation in endophytic and associative symbiosis. *Field Crops Research* 65: 197-209.
- Ledezma, E. & Apitz, R. (2006). Ajoene, el principal compuesto activo derivado de ajo (*Allium sativum*), un nuevo agente antifúngico. *Revista Iberoamericana de Micología* 23: 75-80. Consultado el 15 de septiembre de 2012. Disponible en: <http://www.reviberoammicol.com/2006-23/075080.pdf>.
- López, M.O., Sandoval, I. & Mena, J. (1998). Manual para la identificación de hongos fitopatógenos de la caña de azúcar en Cuba. *Acta Botánica Cubana*.
- Navarro, M.C. (2007). Posibilidades terapéuticas del bulbo del ajo (*Allium sativum*). *Revista de Fitoterapia* 7(2):131-151. Consultado en 11 de septiembre de 2012. Disponible en: <http://www.fitoterapia.net/revista/pdf/RDF7-2%20all.pdf>
- Piccolo, R. (2007). Enfermedades micológicas y bacterianas del Ajo (*Allium sativum*). Posgrado en Horticultura. INTA.
- Portela, J.A. (2007). Ajo argentino: pautas de cultivo para la región Andina Central Argentina. La Consulta INTA EEA. 88 pp.
- Reinoso, Y., Casadesús, L., García A., Gutiérrez J., Álvarez V. & Álvarez, V. (2006). Aislamiento, selección e identificación de bacterias del género *Bacillus* antagonistas de *Pectobacterium carotovorum*. *Fitosanidad* 10: 187-191. Consultado el 28 de julio de 2012. Disponible en: <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/2091/209116108001.pdf>.
- Rivera, W. (2011). Aislamiento y uso de cepas de *Trichoderma* spp. para el control biológico del hongo *Sclerotium cepivorum* Berkeley, causante de la pudrición blanda de bulbos de ajo (*Allium sativum*), con miras a la transferencia tecnológica a productores de la zona de Llano Grande de Cartago. Tesis Magister en Gestión de recursos naturales y Tecnologías de producción, Instituto Tecnológico de costa Rica. Consultado el 10 de octubre de 2012.
- Robinson, R. (2007). *Self-organising Agro-ecosystems*. 2 ed. Sharebooks Publishing. Consultado el 30 de agosto 2012. Disponible en: <http://ecoport.org/storedReference/559735.pdf>.
- Rojas, V., Ulacio, D.E., Sanabria, M.E. & Jiménez, M.A. (2009). Efecto del calcio, *Trichoderma* y brócoli en la pared y área celular del ajo para el control de la pudrición blanca. *Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas* 43 (2). Consultado el 10 de septiembre de 2012. Disponible en: <http://revistas.luz.edu.ve/index.php/bcib/article/view/3401>
- Vimard, B., Leggett, M.E. & Rahe, J.E. (1986). Rapid Isolation of Sclerotia of *Sclerotium cepivorum* from Muck Soil by Sucrose Centrifugation. *Phytopathology* 76: 465-467.

Principales géneros de nematodos fitoparásitos asociados a plátano y piña en las regiones Huetar Norte y Huetar Atlántica de Costa Rica

Major genera of plant parasitic nematodes associated with plantains and pineapple in the Huetar Norte and Huetar Atlántica regions of Costa Rica

Tomás de J. Guzmán-Hernández¹

Ingrid Varela-Benavides²

Silvia Hernández-Villalobos³

Joaquín Durán-Mora⁴

Wayner Montero-Carmona⁵

Fecha de recepción: 21 de abril del 2013

Fecha de aprobación: 26 de mayo del 2013

Guzmán-Hernández, T; Varela-Benavides, I; Hernández-Villalobos, S; Durán-Mora, J; Montero-Carmona, W. Principales géneros de nematodos fitoparásitos asociados a plátano y piña en las regiones Huetar Norte y Huetar Atlántica de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 27, N° 1. Pág 85-92

- 1 Doctor en Ciencias Agrícolas. Miembro del Consejo Institucional, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Teléfono: (506) 2401-3014. Correo electrónico: tjguzman@itcr.ac.cr.
- 2 Bióloga. Máster en Agricultura Ecológica. Laboratorio de Nematología, Centro de Investigación y Desarrollo Agrícola Sostenible para el Trópico Húmedo, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Teléfono: (506) 2401-3014. Correo electrónico: invarela@itcr.ac.cr.
- 3 Bióloga. Estudiante de la Maestría en Fitopatología. Colegio de Postgraduados, México. Correo electrónico: hvsilvia@gmail.com.
- 4 Ingeniero Agrónomo. Profesor en el Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Teléfono: (506)2401-3127. Correo electrónico: jduran@itcr.ac.cr.
- 5 Ingeniero en Biotecnología. Profesor en el Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Teléfono: (506)2401-3127. Correo electrónico: wamc.biotec@gmail.com.

Palabras clave

Nematodos tropicales; dinámica poblacional; plátano; piña.

Resumen

Durante esta investigación se muestrearon periódicamente sistemas productivos de piña y plátano en la Región Huetar Norte (RHN) y de piña en la Región Huetar Atlántica (RHA), con el objetivo de identificar los géneros de nematodos fitoparásitos asociados a estos cultivos, su frecuencia y densidad de población. También se exploró la dinámica poblacional de los principales géneros. En el cultivo de piña, los nematodos con mayor densidad de población y más frecuentemente detectados en ambas regiones estudiadas fueron *Pratylenchus* y *Helicotylenchus*. Las poblaciones de estos nematodos fueron fluctuantes en la RHN y con un crecimiento que puede explicarse mediante funciones polinómicas en la RHA. En el caso del plátano, los nematodos con mayor densidad de población y más frecuentemente detectados fueron *Radopholus similis*, *Pratylenchus* y *Meloidogyne*. Las poblaciones de estos nematodos también mostraron fluctuaciones en el tiempo.

Key words

Plant parasitic nematodes; populations dynamics; pineapple; plantains.

Abstract

During this research, pineapple fields in the Región Huetar Atlántica (RHA) and the Región Huetar Norte (RHN) and plantain fields in the RHN were periodically sampled. The objective was to identify the major genera of plant parasitic nematodes that affect these crops, their frequency and population densities. At the same time, we explored the dynamics of the populations of major genera. *Pratylenchus* and *Helicotylenchus* had major frequency and the greatest densities of population in the pineapple fields, in both regions. The populations of both genera fluctuated in the RHN. In the RHA, populations of both genera increased and its increase could be explained with a polynomial function. In the plantain fields, the plant parasitic nematodes with major population densities and major incidence were *Radopholus similis*, *Pratylenchus* and *Meloidogyne*. The populations of these nematodes fluctuated in time as well.

Introducción

El desarrollo de una plaga de nematodos en un agroecosistema puede considerarse como una variedad de interacciones entre la población del hospedero y la población del nemátodo, influenciadas por factores ambientales y prácticas de cultivo. Los modelos de dinámica poblacional del cultivo y del nemátodo ayudan a formalizar y cuantificar estas interacciones (Quénéhervé, 1989).

El patrón de distribución y la dinámica poblacional de los nematodos de importancia económica en un campo cambian dependiendo del cultivo y las prácticas de manejo. La abundancia de las diferentes especies de nematodos también cambia durante los ciclos anuales, dependiendo del ambiente físico-químico (Schneider et al., 2003).

Noel & Wax (2003) estudiaron la dinámica de la población en plantaciones de soya, en sistemas

con y sin arado, y en rotación con maíz, y determinaron que las poblaciones de *Heterodera glycines* no aumentaron a largo plazo cuando se utilizaron sistemas de rotación.

Además, se ha observado como las poblaciones de *Pratylenchus penetrans* y *Meloidogyne hapla* fluctúan dependiendo del volumen y estado del sistema radical en plantaciones de fresa, con picos de población en determinados días después de la siembra. Esta información ha permitido diseñar programas de monitoreo y control más eficientes y económicos (La Mondia, 2002).

El estudio de la dinámica poblacional permite desarrollar modelos matemáticos que ayuden a predecir el comportamiento de la población de nematodos, disminuyendo los costos de monitoreo y control. En campos de papa, los modelos matemáticos han demostrado ser de utilidad en la

detección de *Globodera* y en el establecimiento de programas de muestreo y toma de decisiones (Been & Schomaker, 2000).

El desarrollo de un programa de manejo de nematodos depende del conocimiento obtenido en los estudios de campo que nos permitan entender la complejidad de las interacciones tróficas que ocurren en los agroecosistemas. Es necesario realizar experimentos en el campo que no solo prueben la teoría de la ecología de poblaciones sino que también estudien la ecología de las comunidades y las interacciones multiespecíficas.

Por ejemplo, para realizar una rotación de cultivos efectiva o un periodo de barbecho, se debe conocer la dinámica poblacional del nemátodo y establecer los periodos mínimos de descanso y rotación (Quénéhervé, 1989).

Durante esta investigación se muestrearon periódicamente sistemas productivos de piña y plátano en la Región Huetar Norte (RHN) y de piña en la Región Huetar Atlántica (RHA), con el objetivo de identificar los géneros de nematodos fitoparásitos asociados a tales cultivos, su frecuencia y densidad

de población. También se estudió la dinámica poblacional de los principales géneros.

Metodología

Durante los años 2008 y 2009 se realizaron muestreos mensuales en áreas homogéneas previamente definidas de parcelas seleccionadas en plantaciones de piña y plátano en la RHN y de piña en la RHA (cuadro 1).

Cada muestreo consistió en la recolección de una muestra compuesta por entre 3 y 10 submuestras, dependiendo del cultivo y el tamaño de la parcela. En cada punto de muestreo se recolectaron plantas completas o su sistema radical y submuestras de suelo. La profundidad de la muestra fue de 20 cm.

Luego de esto las muestras fueron rotuladas apropiadamente y colocadas en cajas de aislamiento térmico para su transporte.

Para cada muestra compuesta se procesaron 3 submuestras de suelo y 3 submuestras de raíz, para la obtención de los nematodos.

Cuadro 1. Parcelas muestreadas, ubicación y número de muestreos realizados en campos de piña y plátano en la Región Huetar Norte (RHN) y la Región Huetar Atlántica (RHA), Costa Rica, 2008-2009.

Cultivo	Parcela	Ubicación	Muestreos realizados / muestras tomadas en cada muestreo
Piña	Parcela 1	La Virgen de Sarapiquí RHA	7/10
	Parcela 2	Pital RHN	5/2
	Parcela 3	Guatuso RHN	5/2
Plátano	Parcela 1	Agua Azul, La Fortuna RHN	12/3
	Parcela 2	La Perla, La Fortuna RHN	12/2
	Parcela 3	La Perla, La Fortuna RHN	6/2
	Parcela 4	Santa Clara, Florencia RHN	6/1
	Parcela 5	Los Ángeles, La Fortuna RHN	6/2
	Parcela 6	El Tanque, La Fortuna RHN	12/2

Se extrajeron los nematodos de las raíces y el suelo por el método de centrifugación-flotación: Una vez en el laboratorio, las muestras de raíz fueron lavadas, cortadas en trozos pequeños y homogeneizadas; luego, se maceraron en licuadora submuestras de 25 gramos (g). Por su parte, las muestras de suelo fueron homogeneizadas y se colocaron submuestras de 100 g en un balde y se les realizaron dos lavados, seguidos de un minuto de suspensión cada uno.

La separación final de los nematodos se hizo utilizando una solución extractora de sacarosa (1,18 de gravedad específica) y un juego de tamices superpuesto de 100 y 400 mallas.

El sobrenadante conteniendo los nematodos se decantó sobre una criba de 400 mallas y se lavó el exceso de azúcar con suficiente agua. Finalmente, se recolectaron los nematodos del tamiz lavando con la

ayuda de una pizeta, para proceder a su observación e identificación utilizando un microscopio invertido.

Resultados y discusión

Piña

En los campos de piña se detectaron siete géneros de nematodos, sin embargo, los que se encontraron con más frecuencia en ambas regiones fueron *Helicotylenchus* y *Pratylenchus* (figura 1).

Pratylenchus y *Helicotylenchus* también fueron los nematodos con mayor número de individuos detectados en ambas regiones. En las muestras de suelo la importancia relativa de *Helicotylenchus* es mayor, debido a que *Helicotylenchus*, a diferencia de *Pratylenchus*, es un nematodos ectoparásito (cuadro 2).

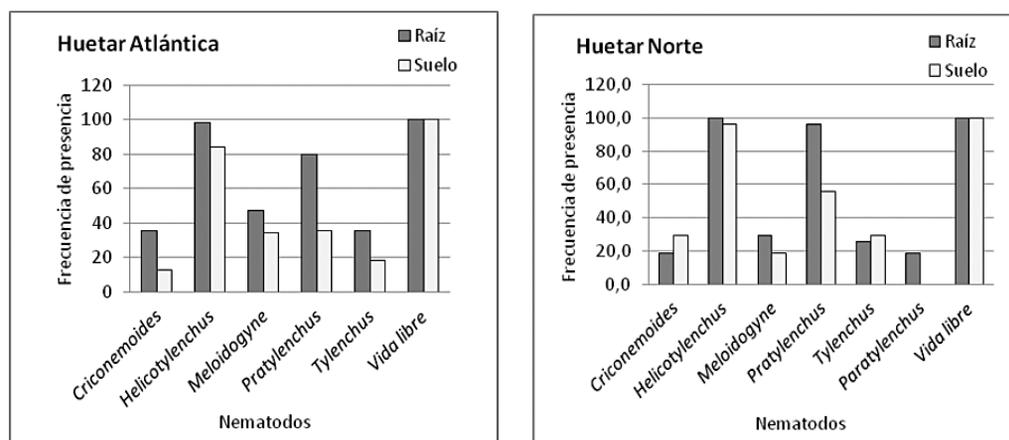


Figura 1. Frecuencia de nematodos fitoparásitos en raíz y suelo de plantaciones de piña en la Región Huetar Norte (RHN) y la Región Huetar Atlántica (RHA), Costa Rica, 2008-2009.

Cuadro 2. Densidad media de géneros de nematodos fitoparásitos en raíz y suelo de plantaciones de piña en la Región Huetar Norte (RHN) y Región Huetar Atlántica (RHA), Costa Rica, 2008-2009.

	Densidad media en 100 g de raíz		Densidad media en 100 g de suelo	
	RHA	RHN	RHA	RHN
<i>Criconemoides</i>	46.63	56.27	10.37	5.48
<i>Helicotylenchus</i>	477.93	437.02	84.86	104.35
<i>Meloidogyne</i>	69.21	69.89	62.41	16.80
<i>Pratylenchus</i>	1037.86	1788.09	25.96	5.75
<i>Tylenchus</i>	74.90	36.95	14.87	39.04
<i>Paratylenchus</i>	0.00	280.89	0.00	0.00
Nematodos de vida libre	519.06	476.93	211.11	72.12

En México, en una evaluación de patógenos radicales de piña, se obtuvieron resultados similares. Se determinó que los nematodos asociados al cultivo fueron *Helicotylenchus*, *Pratylenchus*, *Rotylenchus*, *Hoplolaimus*, *Criconemoides*, *Tylenchus*, *Ditylenchus* y *Meloidogyne*. Los más abundantes fueron *Pratylenchus* y *Helicotylenchus* (García et al., 2005).

Sin embargo, otros autores mencionan que *Meloidogyne* es el nemátodo más importante en las plantaciones de piña en México, Australia, Sudáfrica, Zimbawe y Tailandia, y fue uno de los principales problemas en Hawaï hasta que fue suplantado por *Rotylenchulus reniformis* (Gianessi et al., 2002, Suárez & Rosales, 2008).

Con respecto a la dinámica poblacional de estos dos géneros, se observa que la progresión poblacional de ambos en la RHN se caracteriza por fuertes fluctuaciones. En el caso de *Pratylenchus*, estas fluctuaciones corresponden a una función polinomial de grado 4, no así en *Helicotylenchus*, donde la población tiene grandes oscilaciones en el tiempo (figura 2).

El comportamiento de las poblaciones de nematodos en la RHA se mostró más constante, con un crecimiento que puede explicarse mediante funciones polinómicas (figura 3). Es importante observar que en el caso de la RHN, las poblaciones de *Pratylenchus* detectadas tienen un comportamiento similar al de las de la RHA, a partir del

tercer muestreo. Es posible que también en la RHA las poblaciones fluctúen pero con frecuencias más bajas; para probar esta teoría es necesario realizar este tipo de trabajos a más largo plazo.

Las fluctuaciones en las poblaciones de nematodos no son extrañas. García y colaboradores (2005) estudiaron el caso de la piña en México y reportaron poblaciones muy estables o más bien con altos y bajos; únicamente *Pratylenchus* en el suelo tendió a aumentar su población conforme la edad de la plantación.

También Stirling & Nikulin (1993) mencionan marcadas diferencias entre los sitios en cuanto a la dinámica poblacional que presentó *Meloidogyne*, específicamente en plantaciones de piña en Australia.

Plátano

La figura 4 muestra los géneros de nematodos detectados en las plantaciones de plátano y la frecuencia con la que se observaron en las muestras. El género más frecuentemente detectado fue *Meloidogyne*, seguido de *Pratylenchus* y *Helicotylenchus*.

Los nematodos detectados son comunes en plantaciones de musáceas en el mundo y se caracterizan por causar la destrucción de las raíces primarias en las plantas, provocando hasta un 30% de pérdidas si no se realizan controles de las poblaciones (Gowen et al., 2005).

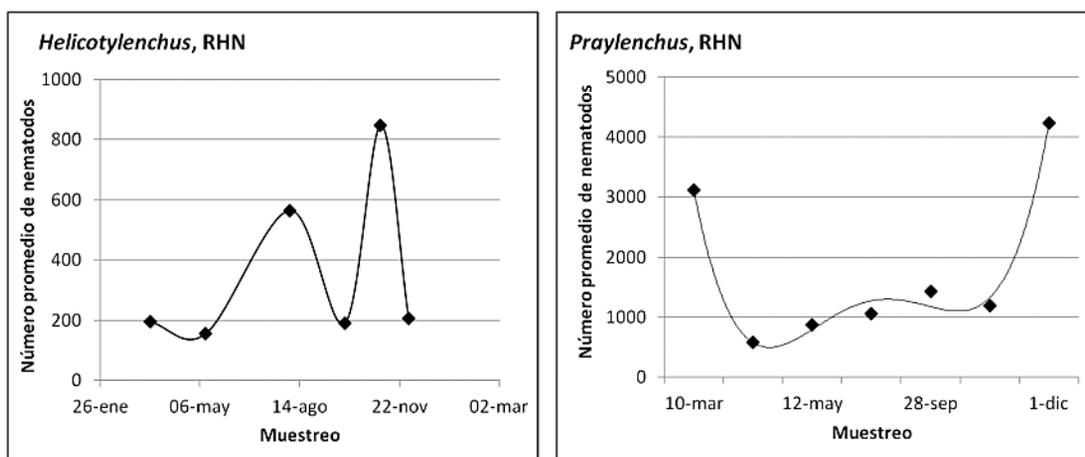


Figura 2. Progresión poblacional de *Pratylenchus* y *Helicotylenchus* en raíces de piña en plantaciones de la Región Huetar Norte (RHN), Costa Rica, 2008-2009. Los niveles poblacionales de ambos nematodos son fluctuantes en el tiempo. El comportamiento de la población de *Pratylenchus* puede explicarse mediante la siguiente función $y = 69,243x^4 - 1108,9x^3 + 6300,7x^2 - 14717x + 12571$ con un coeficiente de correlación $R^2 = 0,9876$.

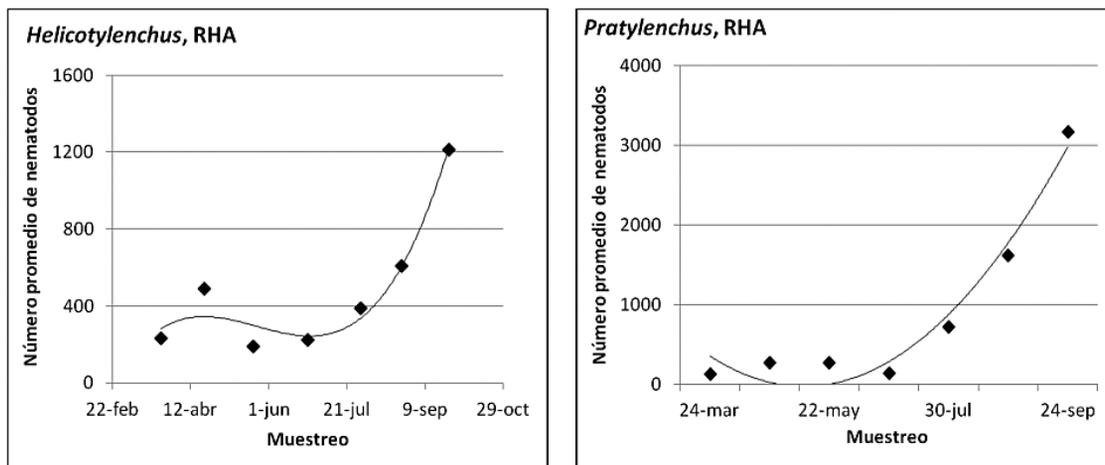


Figura 3. Progresión poblacional de *Pratylenchus* y *Helicotylenchus* en raíces de piña en plantaciones de la Región Huetar Atlántica (RHA), Costa Rica, 2008-2009. El comportamiento de ambas poblaciones en el tiempo puede expresarse mediante una función. La población de *Helicotylenchus*: $y = 0,0007x^3 - 77,279x^2 + 3E+06x - 4E+10$ con coeficiente de correlación $R^2 = 0,9504$ y la población de *Pratylenchus* $y = 153,95x^2 - 793,41x + 992,14$ con un coeficiente de correlación $R^2 = 0,9619$

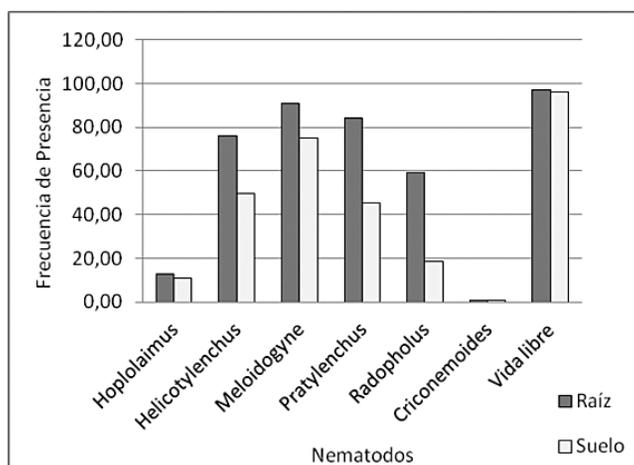


Figura 4. Frecuencia de nematodos fitoparásitos en raíz y suelo de plantaciones de plátano en la Región Huetar Norte (RHN), Costa Rica, 2008-2009.

Radopholus similis, el nemátodo más dañino en las plantaciones de musáceas (Gowen et al., 2005), únicamente se detectó en un 60% de las muestras en este estudio.

Sin embargo, en cuanto a densidad poblacional, *R. similis* fue el nemátodo con mayor abundancia promedio en raíz en estas plantaciones, seguido por *Pratylenchus* y *Meloidogyne* (cuadro 4).

Las comunidades poliespecíficas con *R. similis* como nemátodo dominante son comunes en las plantaciones de musáceas (Marín, 2003, Chaves y Araya,

2001), sin embargo, en este caso, *Radopholus* no fue siempre el nemátodo dominante.

Quénéhervé (1993) demostró que las poblaciones de *Radopholus similis* y *Helicotylenchus multicinctus* en banano pueden variar en el tiempo, en concordancia con la dinámica de formación de las raíces y el estado fenológico de la planta.

Por otro lado, estos resultados son muy similares a los obtenidos por Chávez y Araya (2001) en plantaciones de banano en Ecuador, donde *Radopholus similis*, *Helicotylenchus*, *Pratylenchus* y *Meloidogyne*

Cuadro 4. Densidad media de géneros de nematodos fitoparásitos en raíz y suelo de plantaciones de piña en la Región Huetar Norte (RHN), Costa Rica, 2008-2009.

	Densidad media en 100 g de raíz	Densidad media en 100 g de suelo
<i>Hoplolaimus</i>	37,91	20,85
<i>Helicotylenchus</i>	311,80	19,20
<i>Meloidogyne</i>	1275,01	61,54
<i>Pratylenchus</i>	1492,58	31,04
<i>Radopholus</i>	3156,17	23,15
<i>Criconemoides</i>	8,89	2,67
Nematodos de vida libre 476,15 213,28	476,15 213,28	213,28

fueron los nematodos con mayores densidades de población y más frecuentemente detectados.

Con respecto a la dinámica de las poblaciones, estos tres géneros mostraron grandes fluctuaciones en su población (figura 5), siendo las poblaciones de *Radopholus similis* las que fluctuaron más frecuentemente.

De la misma forma que en piña, las fluctuaciones en las poblaciones de nematodos en las plantaciones de plátano no son extrañas. El ciclo biológico de este cultivo, de hasta 20 años en algunas plantaciones, favorece el establecimiento de las poblaciones, las cuales fluctúan dependiendo de factores bióticos y abióticos y del control que se haga de ellas (Nava et al., 2005, Quénéhervé, 1989)

Conclusiones

El estudio de las poblaciones de nematodos permitió determinar que en los campos de piña estudiados,

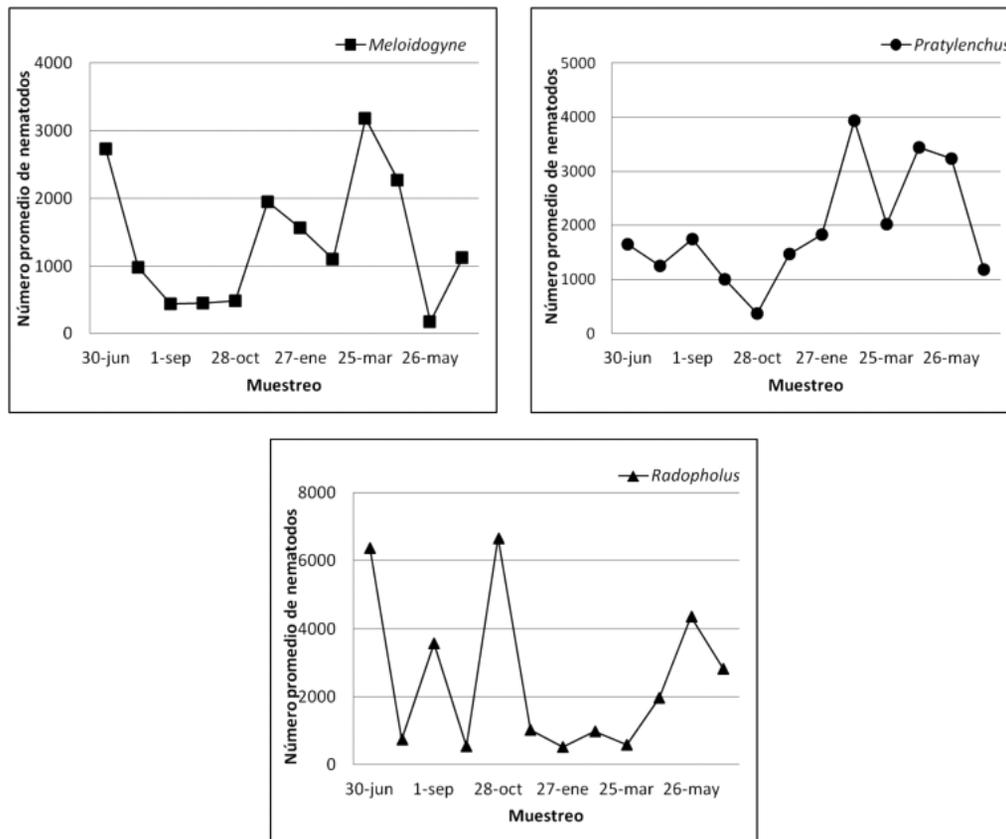


Figura 5. Progresión poblacional de *Meloidogyne*, *Pratylenchus* y *Radopholus similis* en raíces de plátano en plantaciones de la Región Huetar Norte (RHN), Costa Rica, 2008-2009. Las poblaciones de estos nematodos muy fluctuantes.

los nematodos fitoparásitos de mayor importancia fueron *Pratylenchus* y *Helicotylenchus*. *Pratylenchus* fue el nematodo que presentó las mayores densidades medias de población, superando, en ambas regiones, los 1000 individuos en 100 g de raíz. Las poblaciones de estos nematodos se comportaron de forma fluctuante en el tiempo, tales fluctuaciones se pudieron explicar mediante funciones polinómicas.

En el plátano, los nematodos fitoparásitos más importantes fueron *Radopholus*, *Pratylenchus* y *Meloidogyne*; *Radopholus* presentó la mayor densidad media de población superando los 3000 individuos en 100 g de raíz. Las poblaciones de estos nematodos mostraron grandes fluctuaciones en el tiempo.

Bibliografía

- Been, T.H. & Schomaker, C.H. (2000). Development and evaluation of sampling methods for fields with infestation foci of potato cyst nematodes (*Globodera rostochiensis* and *G. pallida*). *Phytopathology* 90: 647-656.
- Chávez, C. & Araya, M. (2001). Frecuencia y densidades poblacionales de los nematodos parásitos de las raíces del banano (*Musa AAA*) en Ecuador. *Nematrópica* 31:25-36.
- García de la Cruz, R., Palma-López, D., García-Espinoza, R., Rodríguez, M. & González-Hernández, H. (2005). Effect of legumes rotation on pineapple root diseases in Huimanguillo, Tabasco, Mexico. *Acta Horticulturae* 666: 247-256.
- Gianessi, L.P., Silvers, C.S., Sankula, S. & Carpenter, J.E. (2002). *Current and potential impact for improving pest management in U. S. Agriculture, an analysis of 40 case studies. Nematode resistant pineapple*. National Center for Food and Agricultural Policy. 8 p.
- Gowen, S.R., Quénéhervé, P. & Fogain, R. (2005). Nematode parasites of bananas and plantains. En: Luc, M., Sikora, R.A. & Bridge, J. (Eds.). *Plant parasitic nematodes in subtropical and tropical agriculture*. 2 ed. Wallingford, CABI Publishing. p. 611-645.
- La Mondia, J.A. (2002). Seasonal populations of *Pratylenchus penetrans* and *Meloidogyne hapla* in strawberry roots. *Journal of Nematology* 34: 409-413.
- Marín, D. (2003). Investigaciones en progreso y perspectivas futuras para el manejo del sistema radical. En: Turner W. & Rosales F.E. (Eds.). *Sistema radical del banano: hacia un mejor conocimiento para su manejo productivo*. Memorias de un simposio internacional, San José. p. 23.
- Nava, J.C., Villalobos, R., Sosa, L. & Delgado, M. (2005). Vida útil económica del cultivo del banano (*Musa AAA Cavendish cv Gran Enano*) en la planicie aluvial del río Mototan. *Revista de la Facultad de Agronomía Universidad del Zulia* 22(3): 264-273.
- Noel, G.R. & Wax, L.M. (2003). Population dynamics of *Heterodera glycines* in conventional tillage and no tillage soybean/corn cropping systems. *Journal of Nematology* 35: 104-109.
- Quénéhervé, P. (1989). Population of nematodes in soils under banana, cv. Poyo, in the Ivory Coast. 3. Seasonal dynamics of populations in mineral soil. *Revue de Nématologie* 12: 149-160.
- Quénéhervé, P. (1993). Nematode management in intensive banana agrosystems: comments and outlook from the Cote d'Ivoire experience. *Crop Protection* 13, 164-172.
- Schneider, S.M., Roskopf, E.N., Leesch, J.G., Chellemi, D.O., Bull, C.T. & Mazzola, M. (2003). Research on alternatives to methyl bromide: Pre plant and post harvest. *Pest Management Science* 59: 814-826.
- Stirling, G.R. & Nikulin, A. (1993). Population dynamics of plant parasitic nematodes in Queensland pineapple fields and the effects of these nematodes on pineapple production. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 33: 197-206.
- Suárez, Z. & Rosales, L.C. (2008). Comportamiento de materiales genéticos de piña (*Ananas comosus*) al ataque de *Meloidogyne incognita* RAZA 1. *Revista de Protección Vegetal* 23(3): 191-195.

Producción y exportación de melón (*Cucumis melo*) en Costa Rica

Costa Rican melon (*Cucumis melo*)
production and exports

José Eladio Monge-Pérez¹

*Fecha de recepción: 5 de febrero del 2013
Fecha de aprobación: 27 de abril del 2013*

Monge-Pérez, J. Producción y exportación
de melón (*Cucumis melo*) en Costa Rica.
Tecnología en Marcha. Vol. 27, N° 1. Pág
93-103

¹ Costarricense, ingeniero agrónomo. Teléfonos: (506)2289-5969 y 8819-3526. Correo electrónico: melonescr@yahoo.com.mx. Apdo. 665-4050, Estación Experimental Fabio Baudrit, Universidad de Costa Rica. Costa Rica.

Palabras clave

Melón; exportación; producción; *Cucumis melo*; Costa Rica; Cantaloupe.

Resumen

Se estudió la producción y exportación de melón en Costa Rica. Se recopiló y analizó información obtenida a través de diferentes fuentes (FAO, BCCR, PROCOMER, MAG, CANAPEMS). Se estableció comunicación personal con gerentes de empresas exportadoras de melón y se revisaron diversas publicaciones sobre el tema. En este artículo se presentan datos sobre el área de siembra, el número de empresas exportadoras, la distribución geográfica del cultivo, el valor de las exportaciones, las exportaciones por país de destino y por tipo de melón a lo largo de varios años. Finalmente, se analizan los desafíos a nivel agronómico, económico, ambiental y logístico para el futuro de la producción de melón en Costa Rica.

Key words

Melon; exports; production; *Cucumis melo*; Costa Rica; Cantaloupe.

Abstract

Melon production and exports from Costa Rica were studied. Information obtained from different sources (FAO, BCCR, PROCOMER, MAG, CANAPEMS) was analyzed. Personal communications were held with managers of melon export companies, and related publications were reviewed. Data about melon planting area, number of trading companies, geographical distribution of farms, value of exports and their volume per country of destiny and by type of melon along several years is presented. Finally, agronomic, economic, environmental and logistic challenges for the future of melon production in Costa Rica are analyzed.

Introducción

El melón, *Cucumis melo* L., es una planta de la familia Cucurbitaceae, originaria del África tropical. Esta especie es muy apetecida por sus frutos, aunque también se consumen sus semillas, hojas y flores (FAO, 2012; National Research Council, 2008). La mayor importancia económica se origina en la comercialización de sus frutos.

El melón se cultiva con fines comerciales en Costa Rica desde el siglo pasado. Se sabe que en la década de 1950, el señor Humberto Blanco cultivaba melón en la zona de Barranca, Puntarenas, y lo comercializaba en tiendas exclusivas del San José de esa época (Coto y Blanco, 2011). También se conoce sobre la siembra de melón a inicios de la década de 1970 en los cantones de Nicoya (Vargas, 2012) y Carrillo (Monge, J.E., datos sin publicar).

Las primeras exportaciones de melón a Estados Unidos se realizaron en 1979 y 1980, por medio de la empresa estatal Desarrollo Agroindustrial

(DAISA). En 1986 la empresa privada se incorpora al proyecto de exportación, lo que marca un crecimiento significativo de esta actividad (Díaz y Sandí, 2007; Monge, 1996). Desde 1988, el cultivo del melón ha representado un rubro importante de las exportaciones no tradicionales de Costa Rica, constituyendo uno de los principales productos agrícolas de exportación. La estructura y organización de la cadena del melón en el país fue estudiada en 2004 (Díaz y Sandí, 2007). Sin embargo, no se ha realizado un estudio más detallado sobre el desempeño económico de la actividad.

El objetivo de este trabajo es identificar las principales características económicas de la producción y exportación de melón en Costa Rica.

Materiales y métodos

Se revisaron los datos de producción y exportación de melón a nivel mundial en el sitio en internet de la Organización de las Naciones Unidas para la

Alimentación y la Agricultura (FAO) (<http://faostat.fao.org>). Se revisaron las cifras de exportación de melón de Costa Rica en el sitio en internet de la Promotora de Comercio Exterior de Costa Rica (PROCOMER) (<http://www.procomer.com>) y se solicitó información adicional al mismo organismo. Asimismo, se solicitó información sobre las exportaciones de melón al Área de Estadísticas de Bienes y Comercio del Banco Central de Costa Rica (BCCR).

También se solicitó información sobre la producción y exportación de melón a la Cámara Nacional de Productores y Exportadores de Melón y Sandía de Costa Rica (CANAPEMS) y el Departamento de Exportaciones del Servicio Fitosanitario del Estado del Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica (MAG). Se solicitó el criterio de varios gerentes de empresas exportadoras de la fruta, con el fin de obtener información relevante sobre el entorno económico y técnico de este cultivo. Se revisó información relevante sobre el tema de la producción y exportación de melón en Costa Rica aparecida en diferentes publicaciones.

Se analizó toda la información recopilada con el fin de dilucidar las principales características económicas de la producción y exportación de melón en Costa Rica.

Resultados y discusión

Producción, exportación e importación mundial de melón

En 2010 se cultivaron en el mundo 1,074.558 hectáreas (ha) de melón. La producción en ese año alcanzó 25,0 millones de toneladas métricas (Tm), siendo China el líder indiscutible pues representó el 45% de la producción mundial (FAO, 2012). En el año 2009 el líder mundial fue Guatemala, con 388,884 Tm, y Costa Rica ocupó el sexto lugar. Sin embargo, en 2007 Costa Rica había ocupado el tercer lugar, por debajo de España y Guatemala (FAO, 2012).

En cuanto a importación mundial de melón, el líder indiscutible en 2009 fue Estados Unidos, con 651,155 Tm (FAO, 2012).

Producción y exportación de melón en Costa Rica

Se considera que el 85% del melón producido en Costa Rica se dedica a la exportación y el 15% restante se vende en el mercado interno (Vindas, 2012). En 2011, el melón fue el quinto producto agrícola de exportación (2,8% del total), luego del banano (33%), la piña (30%), el café oro (16%) y las plantas ornamentales (3,4%), generando divisas por un total de US\$66,9 millones (PROCOMER, 2012).

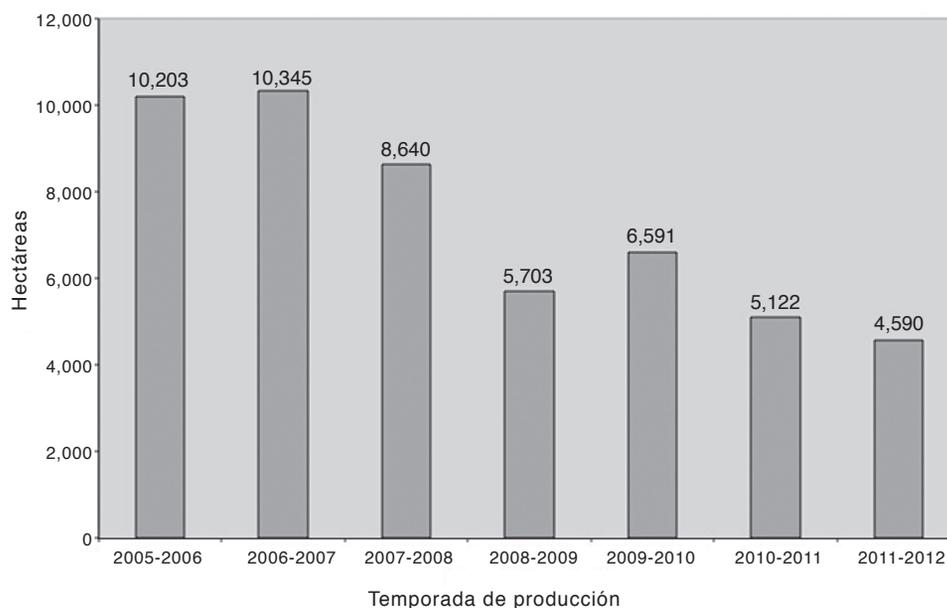


Figura 1. Evolución del área de siembra de melón en Costa Rica, en hectáreas, 2006-2012.
Fuentes: CANAPEMS, 2009; MAG, 2012.

Evolución del área de siembra

En la figura 1 se aprecia la evolución del área de siembra de melón desde la temporada 2005-2006 hasta la 2011-2012 (normalmente, la temporada de cultivo se inicia en noviembre y finaliza con las últimas cosechas en abril del año siguiente).

A partir de la temporada 2007-2008 se presentó una importante disminución en el área de siembra, pasando de 10,345 ha en la temporada 2006-2007 a solo 4,590 ha 2011-2012, para una disminución del 56% (CANAPEMS, 2009, MAG, 2012). Esta reducción fue resultado del retiro de al menos diez empresas de la actividad exportadora de melón (Barquero, 2011b, Cisneros 2013).

Empresas exportadoras y generación de empleo

El número de empresas exportadoras de melón y/o sandía en Costa Rica (solo se dispone de datos para ambos cultivos juntos) ha mostrado cambios importantes en los últimos años (figura 2).

De 2001 a 2003 se incorporaron ocho nuevas empresas a la exportación de estos cultivos, para alcanzar la cifra récord de 30 empresas en 2003. A partir de ese año se han dado fluctuaciones importantes hasta alcanzar 22 empresas en 2011 (CANAPEMS, 2011; PROCOMER, 2012). Así, entre

2007 y 2011, el número de empresas exportadoras de melón y/o sandía se redujo en un 24%.

Se estima que las necesidades de mano de obra en esta actividad son de 1,5 empleados por hectárea (CANAPEMS, 2009; Céspedes, 2008). Por lo tanto, se deduce que en la temporada 2011-2012 la exportación de melón generó alrededor de 6,885 empleos directos (MAG, 2012); sin embargo, dada la reducción en el área de siembra entre 2005 y 2012 (figura 1) se estima que en dicho período se perdieron unos 8,409 empleos en esta actividad.

La exportación de melón representa una importante fuente de empleo en las zonas productoras, aunque hay que destacar que la mayor parte de los trabajadores en este sector son extranjeros, procedentes principalmente de Nicaragua.

Distribución geográfica del cultivo

En la figura 3 se presenta la distribución geográfica del cultivo de melón para la temporada 2009-2010, según los cantones de siembra (esta información está disponible solo para esta temporada) (MAG, 2012).

Destacan los cantones de Carrillo, Liberia y Nandayure, en la provincia de Guanacaste, que juntos representan un 74% del área. El 59% del

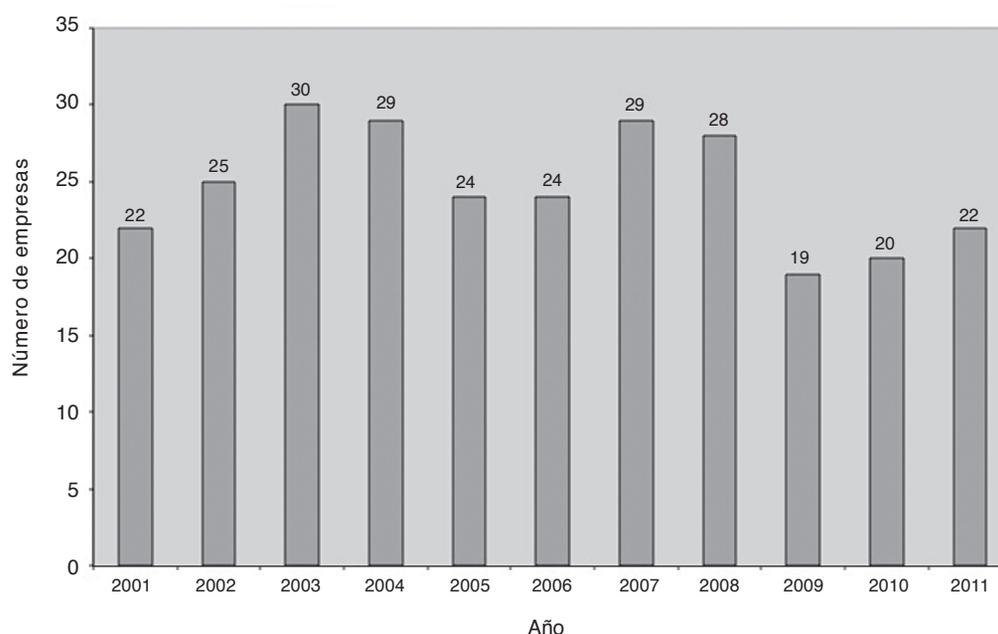


Figura 2. Evolución del número de empresas exportadoras de melón y/o sandía en Costa Rica, 2001-2011. Fuentes: CANAPEMS, 2011; PROCOMER, 2012.

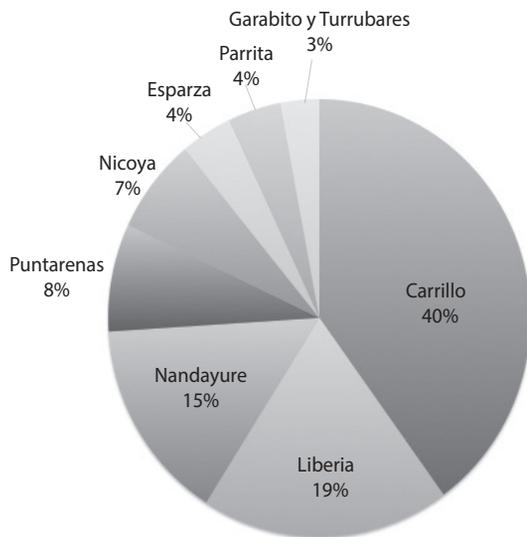


Figura 3. Distribución geográfica del cultivo de melón en Costa Rica, en hectáreas, por cantón, temporada 2009-2010.
Fuente: MAG, 2012.

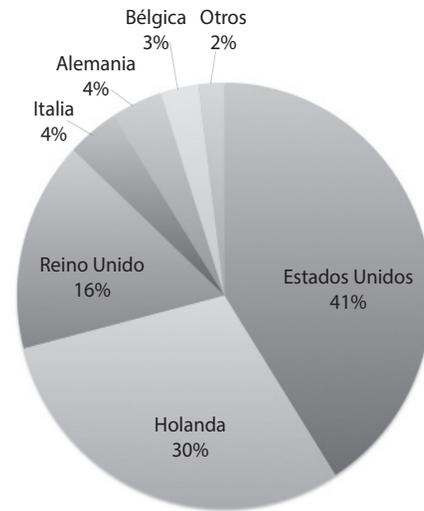


Figura 4. Distribución de las exportaciones de melón de Costa Rica, en dólares, por país de destino, 2011.
Fuente: PROCOMER, 2012.

área corresponde a la zona de la cuenca del río Tempisque, en el sector norte de la provincia de Guanacaste (cantones de Carrillo y Liberia). La segunda área en importancia corresponde al sector de la Península de Nicoya, que concentra el 22% del área (cantones de Nicoya y Nandayure). Por último, el restante 19% del área se ubica en la extensa zona del Pacífico Central, que va desde el cantón Central de Puntarenas hasta el cantón de Parrita, incluyendo los cantones de Esparza, Garabito y Turrubares. Sin embargo, desde mediados de 2010 se ha producido una reducción importante en el área de siembra, especialmente en los cantones de Carrillo, Parrita y Central de Puntarenas (zona de Chomes) (Barquero, 2010, Villalobos, 2010).

Evolución del valor de las exportaciones de melón

En la figura 4 se presenta la evolución del valor de las exportaciones de melón de Costa Rica desde 1984 hasta 2011 (BCCR, 2012, Monge y Ponchner, 1994, PROCOMER, 2012, Soto, 1989).

Se nota una primera etapa de exportaciones modestas (1984-1988), que luego da paso a una fase de rápido crecimiento (1989-1999), seguida de una etapa de contracción (1999-2002), para

retomar nuevamente un crecimiento importante (2002-2006). A partir de 2007 se presenta una reducción en el valor de las exportaciones, hasta alcanzar en 2011 los US\$66,9 millones. Esto significa una reducción del valor de las exportaciones de melón de un 21% entre 2006 y 2011.

La caída en el valor de las exportaciones de melón observada en los años 2002, 2008 y 2011 se explica principalmente por lo siguiente:

1. En 2002 se presentó la infección de los cultivos de melón y sandía por la bacteria *Acidovorax avenae* subsp. *citrulli*, llegando a afectar severamente unas 1,667 ha (19,2% del área total), las cuales debieron ser erradicadas como medida de combate (Mora-Umaña y Araya, 2002). Esta infección fue provocada por la venta de semilla contaminada por parte de una empresa productora de semillas, lo cual se conjugó con la presencia de lluvias en los meses de cultivo, lo que provocó un ambiente muy favorable para el desarrollo de la enfermedad (Monge J.E., datos sin publicar). Otra razón es que en ese año el precio promedio del melón cayó a solo 0,29 dólares/kg, el nivel más bajo entre 1991 y 2011 (BCCR, 2012).

2. En 2008 se presentaron varios factores adversos como: a) lluvias importantes durante la época de siembra (cambio climático) lo que favoreció la presencia de plagas (áfidos, mosca blanca) y enfermedades (virus, mildiú vellosa, *Fusarium solani*, *Sclerotium rolfsii*); b) aumento en el precio de la mayoría de los insumos agrícolas (fertilizantes, plaguicidas, combustibles) provocado por el aumento en el precio del petróleo (Vindas, 2012; Cisneros, 2013); c) escasez de mano de obra debido al auge inmobiliario (Cisneros, 2013); d) escasez de contenedores refrigerados; e) escasez de barcos para el transporte del producto; y f) aumento en la competencia por parte de otros países como Guatemala y Honduras, que tienen menores costos de producción (Barquero, 2008; Camacho, 2009; Monge J.E., datos sin publicar, Radio La Primerísima, 2009). Además en ese año se presentó el cierre del mercado estadounidense al melón producido en Honduras debido a la presencia de la bacteria *Salmonella* spp., lo que afectó también la exportación de melón de Costa Rica por el temor del consumidor a enfermarse (Barquero, 2008). Ese año, una importante empresa nacional, la finca Pelón de la Bajura, dejó de producir melones (unas 1,000 ha) tras 21 años de producir y exportar dicha fruta, lo que provocó el despido de 3.000 trabajadores (La República, 2008; Monge J.E., datos sin publicar).

Sin embargo, en 2009 se presentó un repunte en las exportaciones de melón, provocada entre otros factores por la siembra de una nueva variedad (el híbrido de melón tipo Harper llamado Caribbean Gold F-1, que presenta una mayor tolerancia a ciertas enfermedades, el cual sustituyó casi en su totalidad al melón tipo Cantaloupe), y por la obtención de mejores precios al reducirse la oferta nacional e internacional producto de la crisis económica mundial iniciada en septiembre de 2008 (Arce, 2009; Monge J.E., datos sin publicar). Otra de las ventajas del melón Harper es que presenta una larga vida de anaquel (maduración lenta), por lo que los costos de cosecha se reducen drásticamente, dado que se deben realizar solo dos o tres ciclos de corta de fruta en el período de cosecha (en el melón Cantaloupe se deben realizar hasta 20 ciclos de corta en dicho

período); además, con el melón Harper las pérdidas poscosecha son menores y el manejo poscosecha es más sencillo que en el caso del Cantaloupe.

3. En 2011 se evidenció el efecto de la contracción de la demanda mundial debido a la profundización de la crisis económica, así como los efectos negativos de la revaluación del colón frente al dólar estadounidense, lo que provoca una situación desventajosa para los exportadores costarricenses. En octubre de 2010 la empresa Del Monte anunció el cierre de la operación de su principal finca productora de melón (1,800 ha), ubicada en Filadelfia, Carrillo, Guanacaste, tras 22 años de producir melones en forma ininterrumpida, lo que dejó sin empleo a unas 1,500 personas (Villalobos, 2010; Monge J.E., datos sin publicar). Pocos días después, Del Monte anunció también el cierre de otras dos fincas ubicadas en Chomes y Parrita, lo que elevó la cifra de empleos perdidos a 2,125 (Barquero, 2010). También otras empresas dejaron de producir melones durante la temporada 2010-2011 en zonas como Parrita y Nandayure (Monge J.E., datos sin publicar). Para la temporada 2011-2012 se preveía una reducción del 20-25% en el área de siembra de melón (Vindas, 2011); sin embargo, dicha caída fue de tan solo el 10% (figura 1).

Exportación de melón, por país de destino

En la figura 5 se presenta la evolución del número de países de destino de las exportaciones de melón de Costa Rica desde 1998 hasta 2011. A lo largo de este período el melón nacional se ha exportado a un grupo de entre 11 y 18 países (PROCOMER, 2012).

En la figura 6 se presenta la evolución de la distribución de las exportaciones de melón or país de destino, desde 1998 hasta 2011 (PROCOMER, 2012).

Es evidente la gran importancia de Estados Unidos como principal mercado de destino en el período 1998-2011, a pesar de la gran caída en las exportaciones hacia ese país ocurrida en 2008, 2010 y especialmente en 2011. También es importante destacar la importancia creciente de Holanda como país de destino de las exportaciones de melón a Europa, en contraste con la pérdida en importancia de Bélgica y Alemania (que aparecen en "otros"). Esta situación

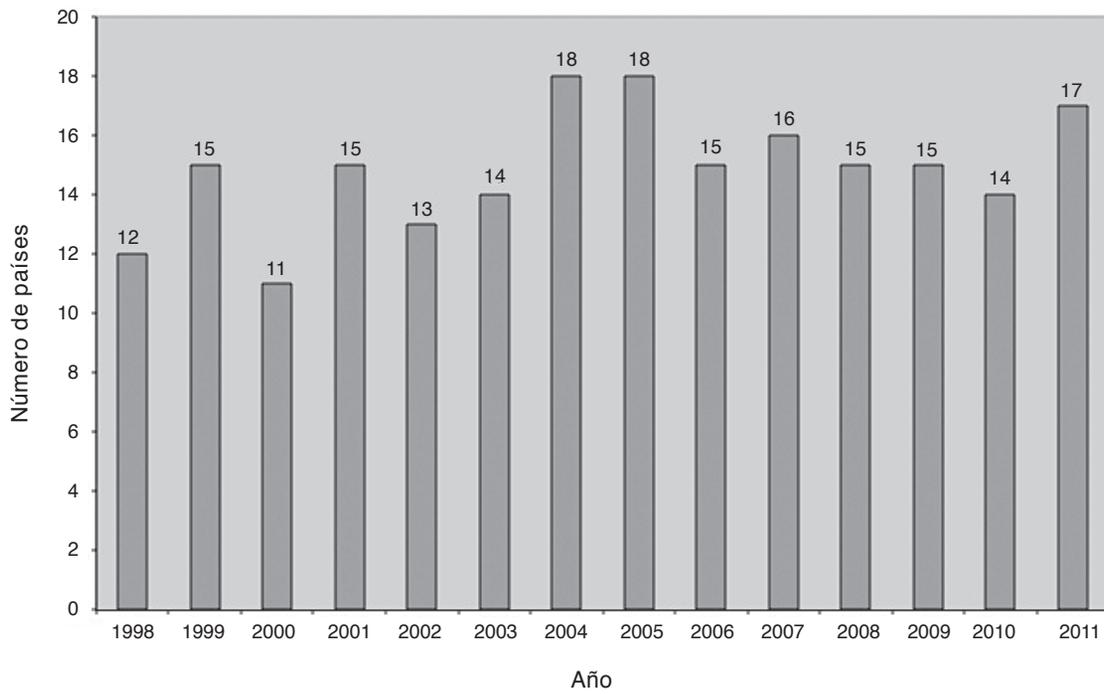


Figura 5. Evolución del número de países de destino de las exportaciones de melón de Costa Rica, 1998-2011. Fuente: PROCOMER, 2012.

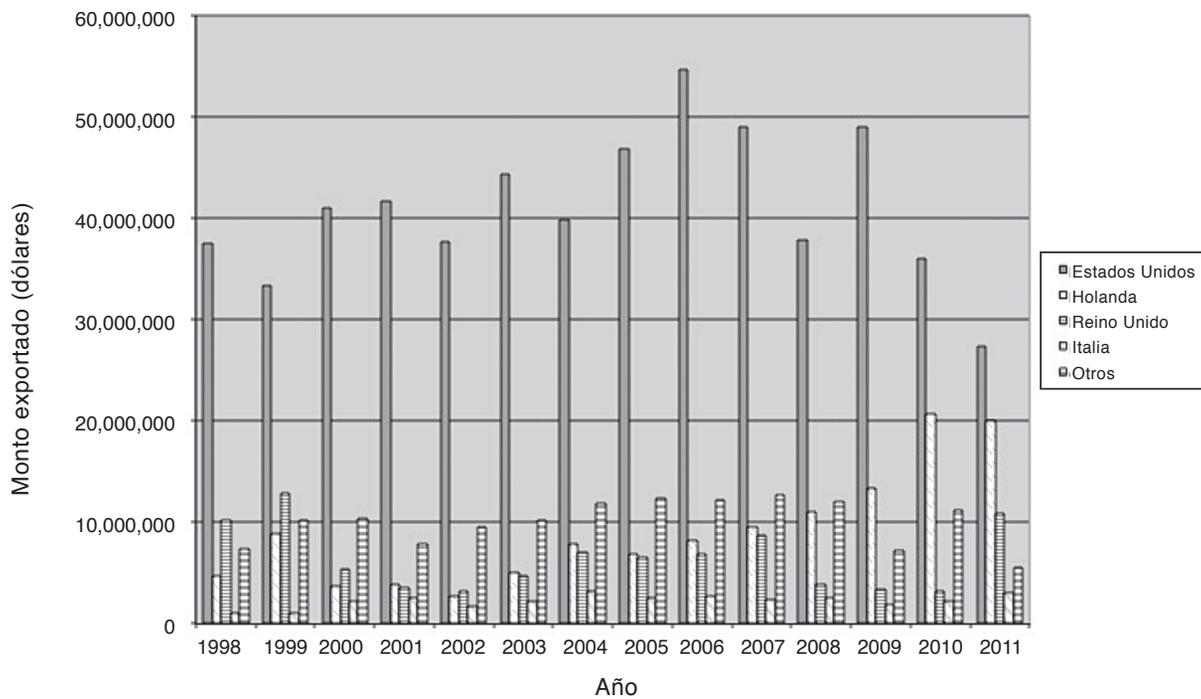


Figura 6. Evolución de la distribución de las exportaciones de melón de Costa Rica, en dólares, por país de destino, 1998-2011. Fuente: PROCOMER, 2012.

obedece a factores como tarifas portuarias y localización de las empresas importadoras, entre otros. Sin embargo, el hecho de que los melones ingresen a Europa por Holanda no significa que solo serán vendidos allí, sino que normalmente también son redistribuidos hacia otros países de Europa por vía terrestre.

En 2011, los principales países de destino del melón exportado desde Costa Rica fueron Estados Unidos (40%), Holanda (30%) y Reino Unido (16%) (figura 7) (PROCOMER, 2012).

Tipos de melón, por mercado de destino

Los principales tipos de melón producidos en Costa Rica para la exportación son: Harper, Cantaloupe, Amarillo, Honey Dew, Galia, Piel de Sapo, Charentais y Orange Flesh. En 2009, la mayor parte de las exportaciones a Estados Unidos correspondió a melón Harper/Cantaloupe (ambos tipos juntos, pues no se dispone de datos por separado) con un 85%, seguido de melón Honey Dew (15%). En contraste, en ese año las exportaciones a Europa estuvieron lideradas por melón Amarillo (58%), seguidas por melón Harper/Cantaloupe (39%) y melón Galia (3%) (CANAPEMS, 2009). Estos datos confirman los diferentes gustos y preferencias de los consumidores según las tradiciones culturales de cada país.

Evolución de la cantidad de melón exportado, por tipo

En la figura 8 se presenta la evolución de la cantidad de melón exportado, de 2003 a 2011, por tipo de melón (CANAPEMS, 2009; MAG, 2012).

Se aprecia una importante disminución en la cantidad de melón Harper/Cantaloupe exportado, al pasar de 143,281 Tm en 2005 a solo 72,006 Tm en 2011, para una reducción del 50% entre esos años. El melón Amarillo bajó de 39,394 Tm en 2004 a 23,925 Tm en 2009, para una reducción del 39% en ese período, pero luego repuntó hasta alcanzar 50,094 Tm en 2011. Así, entre 2009 y 2011 se presentó un aumento del 109% en la producción de este tipo de melón. El melón Honey Dew bajó de 29,664 Tm en 2006 a 12,056 Tm en 2011, para una reducción del 59% entre esos años. La cantidad exportada de otros tipos de melones cayó a un mínimo en 2009 pero repuntó en 2010 y 2011.

Según la distribución de la cantidad de melón exportado en la temporada 2010-2011, por tipo

de melón, destacan nuevamente el melón Harper/Cantaloupe (51%), seguido de melón Amarillo (36%), Honey Dew (9%) y otros (4%) (MAG, 2012).

Desafíos para el futuro de la producción y exportación de melón en Costa Rica

Entre los aspectos que se deben abordar para asegurar la sostenibilidad de la actividad exportadora de melón en Costa Rica están los siguientes:

Cambio climático: El melón se desarrolla en forma idónea en condiciones secas. En Costa Rica, la época seca tradicionalmente se ha presentado entre los meses de noviembre a abril en la región del Pacífico Norte y de diciembre a marzo en la región del Pacífico Central, que son las principales zonas productoras de melón para la exportación. Sin embargo, debido al cambio climático, en los últimos años se han presentado precipitaciones importantes en los meses de producción, lo que provoca condiciones muy favorables para el desarrollo de diversas enfermedades.

Esta situación es particularmente importante cuando se presenta el fenómeno de La Niña, y es uno de los elementos que explican el debilitamiento del sector exportador de melón en Costa Rica (Barquero, 2011a, Cisneros, 2013). En este sentido, la búsqueda de materiales genéticos con resistencia o mayor tolerancia a esas enfermedades será de gran ayuda para disminuir el riesgo de la actividad y asegurar la rentabilidad económica.

Compromiso ambiental: El uso del bromuro de metilo debió ser eliminado como práctica de desinfección de suelos, debido al compromiso adquirido por el país al firmar el Protocolo de Montreal. Como alternativas, se ha desarrollado desde hace varios años el uso de metam sodio, la solarización y el control biológico con microorganismos (*Trichoderma* spp. y *Paecilomyces* spp., entre otros) (Monge, J.E., datos sin publicar). Es necesario buscar nuevas tecnologías que permitan reducir el impacto negativo de la producción de melón sobre el ambiente. Todos los esfuerzos por implementar estrategias de manejo integrado de plagas y de reducción en el uso de plaguicidas son bienvenidos. Asimismo, el reciclaje del plástico utilizado, la protección de las fuentes de agua, bosques, manglares y fauna silvestre, son actividades que deben ser incorporadas como parte de la cultura organizacional de las empresas.

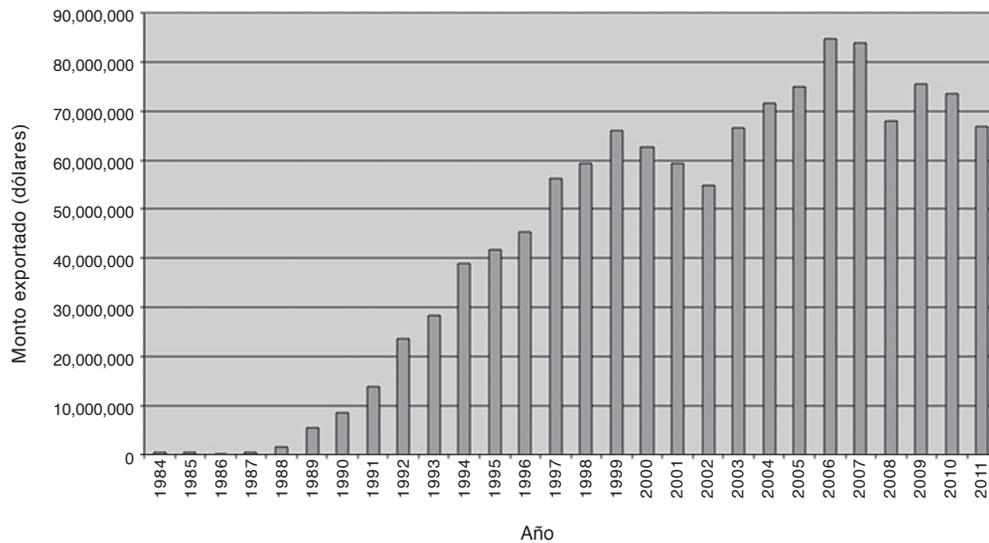


Figura 7. Evolución del valor de las exportaciones de melón de Costa Rica, en dólares, 1984-2011.
Fuente: BCCR, 2012; Monge y Ponchner, 1994; PROCOMER, 2012; Soto, 1989.

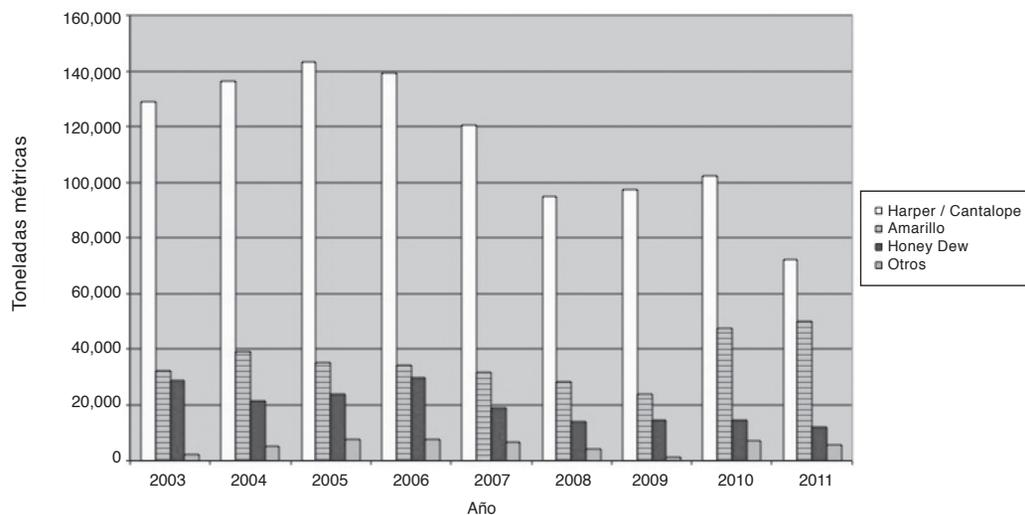


Figura 8. Evolución de la cantidad de melón exportado en Costa Rica, por tipo, en toneladas métricas, 2003-2011.
Fuentes: CANAPEMS, 2009; MAG, 2012.

Competitividad y disponibilidad de la mano de obra: Costa Rica ha perdido cuota de mercado en la exportación de melón frente a otros países de la región, tales como Guatemala y Honduras, debido a que estos tienen costos de mano de obra más bajos, por la menor cobertura de servicios y seguridad social que ofrecen a sus trabajadores en comparación con Costa Rica (Cisneros, 2013, Vindas, 2011, Vindas, 2012). Por otra parte, desde hace varios años se presentan problemas con la

disponibilidad de mano de obra para esta actividad, la cual debe ser solventada mediante la contratación de población inmigrante, especialmente proveniente de Nicaragua. Este factor es un punto crítico que debe ser manejado mediante una adecuada coordinación con las autoridades respectivas, para garantizar que las fincas cuenten con los trabajadores necesarios para su desempeño.

Capacidad logística: En el pasado reciente Costa Rica ha tenido problemas para exportar melón, debido

a la insuficiente disponibilidad de contenedores refrigerados en la época de cosecha, donde se compete contra otros productos (como banano, piña y mango) por el espacio en contenedores y barcos. Esta situación fue especialmente problemática en 2006 y 2007, debido a los altos volúmenes de melón exportado. El aumento en la capacidad de carga en los puertos (especialmente los que se ubican en la costa del Caribe) ayudará a solucionar en parte este problema. Las empresas transportistas y navieras también deben ser parte de la solución a esta problemática. A este respecto, los exportadores consideran muy negativo que el costo del transporte del producto desde las fincas hasta los puertos haya aumentado un 60% entre 2007 y 2011 (Vindas, 2011).

Innovación: Costa Rica se ha caracterizado por su capacidad de innovación en muchos campos de la producción agrícola. Para mantener y mejorar la competitividad del país en el sector exportador, es necesario promover la innovación en variedades, mercadeo, industrialización y tecnologías de producción. Por ejemplo, en el caso de las variedades, dado que no todos los consumidores aprueban las características organolépticas del híbrido Caribbean Gold F-1 (firmeza excesiva de la pulpa, ausencia de aroma), algunas empresas están buscando nuevas opciones en los tipos Cantaloupe o Harper pero con híbridos que presenten mejores características organolépticas. En este sentido, en 2010 una empresa comenzó a producir un nuevo tipo de melón llamado Cantaloupe Amarillo, cuyo nombre comercial es MAG, que es un híbrido de uso exclusivo para ellos en Costa Rica (Monge J.E., datos sin publicar).

Entorno macroeconómico: La crisis económica iniciada en 2008 ha provocado una contracción en el comercio mundial y aún no se vislumbra una recuperación sólida. Los problemas de desempleo y déficit fiscal seguirán siendo importantes en los países importadores de melón por varios años, lo que redundará en una disminución de la demanda de esta fruta. Por otra parte, como consecuencia de la crisis, se ha suscitado una situación cambiaria particular en Costa Rica por la revaluación del colón con respecto al dólar, que está afectando directamente a los exportadores (Cisneros, 2013). Por lo tanto, los exportadores reciben menos colones por dólar, pero dado que una buena parte

de sus costos está en colones, se genera un problema de competitividad económica. La empresa Del Monte estimó en 2010 que el costo de producción de melón había aumentado entre 18% y 22% como consecuencia de la depreciación del dólar (Barquero, 2010); este panorama fue una de las causas de la reducción en el valor de las exportaciones de melón en la temporada 2010-2011 (figura 4). Esta situación ha llevado a varios productores a cambiar la producción de melón por la producción de arroz o caña de azúcar (Vindas, 2012).

Conclusiones

El melón constituye un buen ejemplo de un producto de exportación que surgió al amparo de la política de promoción de exportaciones de productos no tradicionales impulsada en Costa Rica a partir de 1984 (Monge y Ponchner, 1994, Monge, 1996, Díaz y Sandí, 2007), lo que ha resultado en la generación de entre 55 y 85 millones de dólares de divisas por año en los últimos 15 años (1997-2011), y que se ha consolidado como el cuarto o quinto principal producto agrícola de exportación en los últimos años. A pesar de esto, la actividad de exportación de melón no ha estado exenta del efecto negativo de diferentes aspectos macroeconómicos, climáticos, agronómicos y de mercado.

Bibliografía

- Arce, S. (2009). "País ganó más por vender melón, pero sector está cauteloso". *La Nación*, Costa Rica, 3 noviembre. Obtenido desde: http://www.nacion.com/ln_ee/2009/noviembre/03/economia2145577.html.
- Barquero, M. (2008). "Cosecha de melón caerá 35% por lluvia, plagas y mercado". *La Nación*, Costa Rica, 1° abril. Obtenido desde: http://www.nacion.com/ln_ee/2008/abril/01/economia1480858.html.
- Barquero, M. (2010). "2.125 perderán empleo por cierre de tres meloneras". *La Nación*, Costa Rica, 12 octubre. Obtenido desde: <http://www.nacion.com/2010-10-12/Economia/NotasSecundarias/Economia2552405.aspx>.
- Barquero, M. (2011a). "Agroexportadores presentan graves síntomas de decadencia". *La Nación*, Costa Rica, 25 abril. Obtenido desde: <http://www.nacion.com/2011-04-25/Economia/NotasSecundarias/Economia2753575.aspx>.
- Barquero, M. (2011b). "Fincas de melón, chayote y plantas quiebran por la crisis". *La Nación* Costa Rica, 13 mayo, p. 29A.

- BCCR. (2012). *Estadísticas sobre exportaciones de melón de Costa Rica*. Área de Estadísticas de Bienes y Comercio, Banco Central de Costa Rica, San José. Consulta particular.
- Camacho, A.C. (2009). "Exportaciones de melón pierden su jugo; algunas fincas abandonan siembra". *El Financiero*, Costa Rica, edición 717, 17 mayo. Obtenido desde: http://www.elfinancierocr.com/ef_archivo/2009/mayo/17/negocios1946975.html.
- CANAPEMS. (2009). *Industria exportadora de melones en Costa Rica*. Cámara Nacional de Productores y Exportadores de Melón y Sandía de Costa Rica, San José. Informe interno. 17 de junio. 6 pp.
- CANAPEMS. (2011). San José. Informe interno. 6 pp.
- Céspedes, R. (2008). *Mapeo de actividades y sectores productivos agropecuarios: Costa Rica*. San José: Lara, Segura y Asociados. 485 pp.
- Cisneros, M.F. (2013). "En picada cosecha de melón". *La República*, Costa Rica, 14 enero. Obtenido desde: http://www.larepublica.net/app/cms/www/index.php?pk_articulo=533295315.
- Coto, C. & Blanco, R. (2011). Comunicación personal, San José.
- Díaz, R. & Sandí, V. (2007). La cadena de melón en Costa Rica: potencialidades y desafíos internacionales. *Revista Centroamericana de Ciencias Sociales* 4(2): 69-101.
- FAO. (2012). Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma. Consulta particular. Obtenido desde: <http://faostat.fao.org>.
- La República. (2008). "Recortan cultivo de melón por incertidumbre de mercado". San José, 21 noviembre. Obtenido desde: http://www.centralamericadata.com/es/article/home/Recortan_cultivo_de_melon_por_incertidumbre_del_mercado.
- MAG. (2012). Departamento de Exportaciones, Servicio Fitosanitario del Estado, Ministerio de Agricultura y Ganadería, San José. Consulta particular.
- Monge, A. (1996). *Costa Rica, pequeño gran exportador de productos no tradicionales*. Ministerio de Comercio Exterior, San José, 19 pp. Obtenido desde: <http://es.scribd.com/doc/63153057/Costa-Rica-pequeno-gran-exportador-de-productos-no-tradicionales>.
- Monge, J.E. & Ponchner, S. (1994). Diagnóstico de la situación y perspectivas económicas de la producción de frutales en Costa Rica. *Boletín Técnico Estación Experimental Fabio Baudrit Moreno* 27(2): 65-106.
- Mora-Umaña, F. & Araya, C.M. (2002). Mancha bacteriana del fruto de melón y sandía: manejo integrado de una emergencia. *Revista Manejo Integrado de Plagas y Agroecología* 66: 105-110.
- National Research Council. (2008). *Lost crops of Africa. Volume III: Fruits*. Washington D. C.: The National Academies Press. 354 pp.
- PROCOMER. (2012). *Estadísticas sobre exportaciones de melón de Costa Rica*. Promotora del Comercio Exterior de Costa Rica, San José. Consulta particular. Obtenido desde: <http://www.procomer.com/>.
- Radio La Primerísima. (2009). "Cultivos de melón en Costa Rica se redujeron 50% en 3 años". 23 febrero. Managua. Obtenido desde: <http://old.rlp.com.ni/noticias/47971>.
- Soto, M. (1989). Productos no tradicionales con fines de exportación. En: *Resúmenes, VIII Congreso Agronómico Nacional*. Volumen III. Colegio de Ingenieros Agrónomos, Cartago, Costa Rica. 3-7 de julio. 198 pp. (pp. 169-179).
- Vargas, M.T. (2012). Comunicación personal. Orotina, Costa Rica.
- Villalobos, E. (2010). "Del Monte cierra finca más grande de melón". *La República*, Costa Rica, 8 octubre, p. 9.
- Vindas, L. (2011). "Inestabilidad moverá a una cuarta parte de meloneros hacia otras cosechas en 2012". *El Financiero*, Costa Rica, 5 junio. Obtenido desde: http://www.elfinancierocr.com/ef_archivo/2011/junio/05/negocios2797157.html.
- Vindas, L. (2012). "El melón está cerca de ser un cultivo para la historia". *El Financiero*, Costa Rica. 27 septiembre. Obtenido desde: http://www.elfinancierocr.com/economia-y-politica/Costa-Rica-dejara-exportar-melon_0_158384166.html?print=1.

Cambios de uso del suelo y crecimiento urbano. Estudio de caso en los municipios conurbados de la Mancomunidad Metrópoli de Los Altos, Quetzaltenango, Guatemala

Changes in land use and urban growth. Case study in the neighboring municipalities of the Commonwealth Metrópoli de Los Altos, Quetzaltenango, Guatemala

Héctor Obdulio Alvarado-Quiroa¹
Freddy Araya-Rodr guez²

Fecha de recepción: 27 de junio del 2013
Fecha de aprobación: 18 de agosto del 2013

Alvarado-Quiroa, H; Araya-Rodríguez, F.
Cambios de uso del suelo y crecimiento urbano. Estudio de caso en los municipios conurbados de la Mancomunidad Metrópoli de Los Altos, Quetzaltenango, Guatemala.
Tecnología en Marcha. Vol. 27, N  1. Pág 104-113

- 1 Ingeniero Agrónomo en Sistemas de Producción Agrícola, MSc. en Gerencia de la Agricultura Sostenible y los Recursos Naturales, MSc. en Administración de Tierras para el Desarrollo Sostenible, estudiante del Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo Sostenible. Profesor de la División de Ciencia y Tecnología del Centro Universitario de Occidente de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Teléfono: (502)54161669. Correo electrónico: hectoralvarado@cytcunoc.org.
- 2 Profesor/Investigador; Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Teléfono: 2401-3140. Correo electrónico: faraya@itcr.ac.cr.

Palabras clave

Cambios de uso del suelo; intensidad de uso del suelo; crecimiento urbano; ordenamiento territorial.

Resumen

Para la planificación estratégica territorial es indispensable elaborar diagnósticos territoriales que develen el comportamiento y las dinámicas, es decir, analizar las relaciones mutuas entre la vocación de uso de la tierra (capacidad de uso) y su uso actual. El presente artículo hace un análisis de los cambios de uso y el crecimiento urbano que ha sufrido el territorio de los municipios conurbados de la Metrópoli de Los Altos, en el departamento de Quetzaltenango, Guatemala, como un indicador de la intensidad de uso de territorio. Para ello se determinó en primera instancia la capacidad de uso del suelo, utilizando la metodología del INAB (2000). Al determinar la capacidad de uso y contrastarlo con el uso dado para los años 1964, 1970, 1982, 1990, 2002 y 2006, se explica cómo a partir del año 1990 y hasta 2006 empieza a darse una alta conflictividad (intensidad) en el uso del territorio.

Con este estudio se demuestra la presión que ha ejercido la expansión urbana sobre los suelos con una alta vocación agrícola y sobre el medio natural, especialmente sobre las áreas protegidas y bosques, debido a la falta de una planificación estratégica territorial. Esto ha provocado un uso espontáneo del territorio y un crecimiento urbano descontrolado con graves repercusiones ambientales. En el estudio también se estima el escenario tendencial, dando como resultado la desaparición de toda el área con alta vocación agrícola para el año 2039.

Key words

Changes in land use; land use intensity; urban growth; territorial planning.

Abstract

For territorial strategic planning there is an essential need for territorial diagnostics that reveal the behavior and dynamics of it and to analyze the interrelationships between the vocation of the land use (ability of land use) and its current use. This article analyzes the changes in the land use and urban growth that the territory of the neighboring municipalities of the Metropolis of the Commonwealth of Los Altos, Quetzaltenango, Guatemala, has undergone from 1964 to 2010, as an indicator of land use intensity. For this matter, the ability of land use was first established using the methodology from INAB (2000). By determining the usability and contrasting it with the use in the years 1964, 1970, 1982, 1990, 2002 and 2006, it is explained how from the year 1990 to 2006, it begins to show high conflict (intensity) in the land use. This study demonstrates the pressure exerted by urban sprawl on soils with high agricultural potential and on the environment, especially on protected areas and forests due to the lack of a strategic territorial planning, which has caused a spontaneous use of the territory and an uncontrolled urban sprawl with high environmental impact. The study also estimated the trend scenario, in other words, what could happen if things continue behaving like they have so far, resulting in the disappearance of the entire area with high agricultural potential by the year 2039.

Introducción

La jerarquización de los conflictos por el uso de la tierra permite identificar prioridades para el ordenamiento territorial y constituye la base para determinar los tipos de usos alternativos que pueden dársele al territorio, por ello son necesarios para la formulación e implementación de Planes Estratégicos Territoriales que contribuyan a su desarrollo sostenible.

La gestión territorial del espacio rural y urbano en Guatemala, especialmente lo que tiene que ver con su ordenamiento, es una responsabilidad de las municipalidades. Éstas deben ejercer un control sobre la utilización de los territorios tanto públicos como privados, pero hasta ahora han hecho muy poco o nada para controlar la expansión urbana, lo cual repercute en forma negativa en las áreas de vocación agrícola, forestales y protegidas; estas últimas tan importantes por los servicios ambientales que generan.

En la ciudad de Quetzaltenango, en particular, y en los municipios conurbados que pertenecen a la Mancomunidad Metrópoli de Los Altos (para este estudio conformada por los municipios de Quetzaltenango, Salcajá, La Esperanza, Olinstepeque y San Mateo), se ha experimentado una alta demanda de espacios inducida por procesos acelerados de crecimiento de la población, altas tasas de concentración poblacional en centros urbanos, inmigración y especulación inmobiliaria; el resultado es que han crecido en forma discontinua, desarticulada, y extensiva.

El espacio que hasta 1997 tenía un uso exclusivamente agrícola en el Valle de Quetzaltenango actualmente ha dado paso a la construcción de viviendas, comercio e industria, tanto formal como informal. Este crecimiento acelerado y desordenado está provocando un cambio en el uso de la tierra, sin considerar las características (vocación) de los suelos, sus limitaciones, potencialidades y distribución geográfica, ocasionando un fuerte impacto ambiental, social y económico al desplazar la actividad agrícola a suelos marginales y/o suelos con vocación forestal y protección, originando así conflictos por el uso del suelo.

La intensidad de uso del territorio se define como la determinación y cuantificación de la extensión y distribución geográfica, en un período de tiempo

determinado, de la idoneidad del uso del territorio de acuerdo con su uso potencial. Mide la tendencia de transformación del uso óptimo del territorio a un tipo de uso no idóneo, proporcionando información sobre el estado real de la aplicación de políticas de ordenamiento territorial. La intensidad (o conflictos) de uso del territorio es un indicador que provee información para solucionar numerosos problemas relacionados con la tierra, la degradación y la conservación de suelos y aguas, así como también problemas relacionados con las políticas sobre manejo sostenible, ya que define el grado de compatibilidad del territorio de acuerdo con su capacidad de uso potencial.

Materiales y métodos

Para hacer el análisis de los cambios de uso del suelo se utilizaron fotografías aéreas correspondientes a los años 1964, 1970, 1982 y 1990 y las ortofotos de 2002 y 2006 obtenidas en el Instituto Geográfico Nacional de Guatemala (IGN). Las fotografías aéreas de 1964, 1970, 1980 y 1990, que se encuentran en formato análogo, se escanearon en tonos de grises, obteniendo imágenes digitales en formato "tiff" con una resolución de 10 micras por "pixel". Una vez generadas las ortofotos a través del software "DIG3D", se procedió a la rectificación de las imágenes digitales con el apoyo de un Modelo Digital del Terreno, realizado con curvas a nivel distanciadas a 20 m. Con las imágenes digitales rectificadas, se utilizó el software "Arc Gis 9.1" para reconocer e identificar los diferentes usos de suelo a través de la diferencia de tonalidades, es decir, el cambio de grises.

Una vez identificadas las entidades, es decir, los usos de suelo, se procedió a realizar una fotointerpretación, donde en primera instancia en la plataforma de "Arc Catalog" se generó una figura ("shape") de tipo de entidad Polígono en el sistema de referencia WGS 84 UTM Zona 15. Seguidamente se procedió a la delineación de entidades (o digitalización), para lo cual se utilizaron las herramientas de tarea de "Arc Map" de tal forma que no quedaran áreas sin digitalizar.

Al obtener las figuras (shapes), se generó en la tabla de atributos un campo denominado "Áreas", en donde se calculó el área a través de la herramienta "Calculate Geometry" (cálculo de geometría) en

“Arc Map”. La etapa anterior generó seis mapas de uso actual correspondiente a los años 1964, 1970, 1978, 1990, 2002 y 2006. Estos mapas sirvieron de base para discutir las variables de estudio. A través de las etapas anteriores con el Software “ArcGis 9.1” se pudo cuantificar el área para cada uno de los usos del suelo, incluyendo los centros poblados, para cada uno de los años de referencia. Se realizó el análisis del crecimiento urbano, definiendo el incremento del área en el período de estudio, así como un análisis de correlación múltiple, para elaborar un modelo del crecimiento tendencial de los centros poblados para los años 2014, 2024 y 2034.

El indicador de “Intensidad de Uso del Territorio” se basó en el análisis biofísico realizado mediante las variables “uso actual del territorio” y “capacidad de uso”, determinándose las divergencias entre el uso potencial de un territorio (basado en su aptitud y vocación natural) que puede ser practicado sin riesgo de deteriorar el suelo, y el uso actual que se hace del territorio en cuestión. Para evaluar los conflictos de uso de la tierra se hizo un análisis comparativo de la capacidad de uso del suelo (de acuerdo con la metodología del INAB, 2000) con el uso actual, a través de una matriz de análisis de conflictos de uso del suelo, dándoles una calificación apreciativa (usos adecuado, sobreuso y subuso) en función de cada tipo de tierra presente en cada municipio.

Análisis y discusión

Capacidad de uso del suelo de los municipios conurbados de la mancomunidad metrópoli de los altos

La capacidad de uso del suelo generalmente se basa en el principio de la máxima intensidad de uso soportable sin causar deterioro físico del suelo, es decir, se refiere solo a un nivel máximo de aplicación del recurso suelo sin que este se deteriore, con una tasa más grande que la tasa de su formación. La clasificación de tierras por capacidad de uso es un agrupamiento de interpretaciones que se hacen principalmente para fines agrícolas y comienza por la distinción de las unidades de mapeo. Permite hacer algunas generalizaciones con respecto a las potencialidades del suelo, limitaciones de uso y problemas de manejo. La capacidad de uso del suelo del área de estudio se realizó de acuerdo con

la metodología propuesta por el Instituto Nacional de Bosques (INAB, 2000; esta capacidad de uso potencial se presenta en el cuadro 1.

Como puede apreciarse en dicho cuadro, del área total de estudio, el 20% es de vocación forestal de protección; esta categoría presenta áreas con limitaciones severas en cualquiera de los factores limitantes o modificadores, son apropiadas para actividades forestales de protección o conservación ambiental exclusiva, son tierras marginales para uso agrícola o pecuario intensivo. Tienen como objetivo preservar el ambiente natural, conservar la biodiversidad, así como las fuentes de agua. Estas áreas permiten la investigación científica y el uso ecoturístico en ciertos sitios habilitados para tales fines, sin que esto afecte negativamente los ecosistemas presentes en ellas. También se incluyen las áreas sujetas a inundaciones frecuentes y otros ecosistemas frágiles. Esta categoría también incluye las zonas denominadas bosques ribereños, que son áreas ubicadas en las márgenes de los ríos, riachuelos o quebradas y en los nacimientos de agua. Sus funciones son retener sedimentos que proceden de las partes altas, proteger los cauces y espejos de agua y la captación del agua de lluvia, a través de la parte aérea de la vegetación existente. Esta área puede ubicarse en el territorio en estudio en el Cerro El Baúl, Cerro Quemado, volcán Santa María, volcán Siete Orejas y ribera del río Samalá y sus afluentes.

Cuadro 1. Clasificación de tierras por capacidad de uso en la Mancomunidad Metrópoli de Los Altos.

Categorías de capacidad de uso	Hectáreas	%
Agricultura con mejoras	774,48	4,09
Agricultura sin limitaciones	8 124,29	42,94
Agroforestería con cultivos anuales	3 128,04	16,53
Agroforestería con cultivos permanentes	171,77	0,91
Sistemas silvopastoriles	102,53	0,54
Tierras forestales de producción	2 887,94	15,26
Tierras forestales de protección	3 729,95	19,73
TOTAL	18 919,00	100,00

Fuente: Investigación de campo 2010.

Otro 15% del área se ubica en la categoría de manejo forestal de producción. Se trata de áreas con limitaciones para usos agropecuarios, de pendiente o pedregosidad, con aptitud preferente para realizar un manejo forestal sostenible, tanto del bosque nativo como de plantaciones con fines de aprovechamiento, sin que esto signifique el deterioro de otros recursos naturales. La sustitución del bosque por otros sistemas conllevaría la degradación productiva de los suelos. Esta categoría se ubica contigua a la de tierras forestales de protección. Las dos categorías anteriores abarcan un total de 6 617,89 hectáreas (35%) del área de estudio y por la función ambiental que realizan, en ellas no debería permitirse el cambio de uso de la tierra.

Por otro lado, en el cuadro 1 también se aprecia que para casi el 43% del área de estudio (8 124,29 ha) la vocación del suelo debería ser para una agricultura sin limitaciones. Lo anterior denota el potencial de la zona de estudio para la producción agrícola de una forma intensiva, pero como se describirá más adelante, esta área se ha ido perdiendo para darle paso a la expansión urbana.

Cambios de uso del territorio en el área de estudio a partir del año 1964

Durante los 42 años que separan la fecha inicial y final de la presente investigación, se notan las profundas modificaciones que ha experimentado el entorno metropolitano de la ciudad de Quetzaltenango y los municipios conurbados que la constituyen. Se ha identificado en el territorio una importante

dinámica de cambio de los usos del suelo, en donde el crecimiento del área urbana en detrimento del suelo de vocación agrícola, forestal y áreas protegidas es uno de los hechos más significativos.

El análisis de los cambios de uso del territorio se hacen en función de las áreas protegidas, áreas forestales, áreas agrícolas y el crecimiento urbano del área de estudio (ver cuadro 2).

Cambios de uso del territorio en las áreas protegidas

El análisis de los cambios de uso se inicia con las áreas protegidas que han sido declaradas, por decreto gubernativo, dentro de la zona de estudio. De acuerdo con la información que aporta el cuadro 2, podemos apreciar que el área total dedicada a ésta permanece sin variaciones durante el período de estudio y ello se debe a que todas las áreas protegidas fueron declaradas como tales antes de 1964 y no se ha declarado ninguna nueva. Sin embargo, a través de la fotointerpretación puede apreciarse que sí han existido cambios de uso del suelo dentro de ellas, especialmente por el avance de la frontera agrícola, lo que por supuesto es ilegal dada su categoría de áreas protegidas.

Pero también en los últimos años han existido cambios de uso provocados por la expansión urbana, tales son los casos del cerro El Baúl (desde hace más de 10 años) y recientemente el del cerro Siete Orejas, con la creación de la Nueva Ciudad de Los Altos. Podemos decir que estas zonas habitaciona-

Cuadro 2. Cambios de uso del suelo durante el periodo 1964-2006 en el área de estudio.

Uso	Año											
	1964		1970		1982		1990		2002		2006	
	ha	%										
Protegida	3 096	16,4	3 096	16,4	3 096	16,4	3 096	16,4	3 096	16,4	3 096	16,4
Agrícola	9 753	51,5	9 591	50,7	9 509	50,2	8 703	46,0	7 621	40,3	5 471	28,9
Forestal	5 221	27,6	5 044	26,7	4 809	25,4	4 585	24,2	3 793	20,0	3 747	19,8
Urbana	849	04,5	1 188	06,3	1 505	08,0	2 535	13,4	4 409	23,3	6 605	34,9
TOTAL	18 919	100	18 919	100	18 919	100	18 919	100	18 919	100	18 919	100

Fuente: Información de campo 2010.

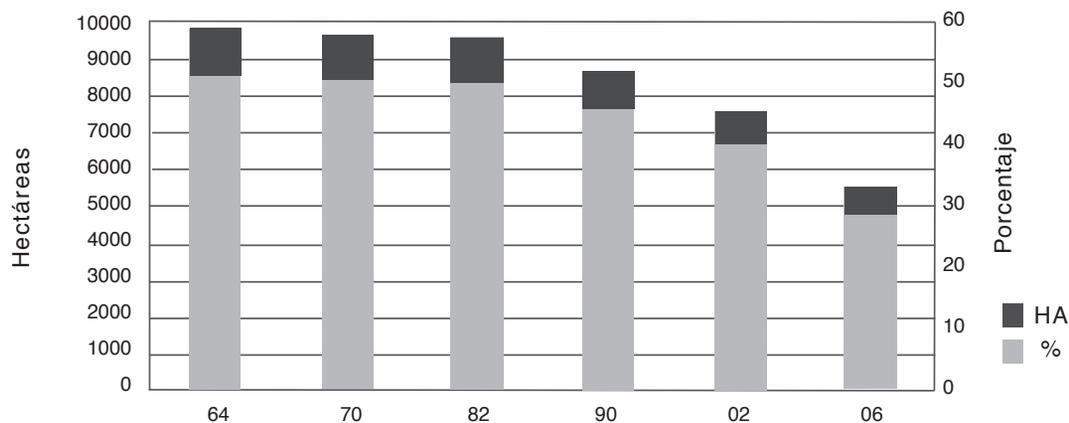


Figura 1. Reducción del uso agrícola durante el periodo 1964-2006 en el área de estudio.
Fuente: Investigación de campo 2009.

les, además de situarse en áreas de alto riesgo por deslaves, erosión y suelo con poca capacidad de soporte para la construcción de viviendas y edificios en general, han reducido la capacidad de recarga hídrica de Quetzaltenango, algo muy importante si remarcamos que la ciudad depende en un 75-80% de los mantos freáticos para su abastecimiento de agua. Lo anterior también provoca inconvenientes como azolvamientos, deslaves e inundaciones, como el caso que se da en el Barrio El Calvario, especialmente en la cuarta calle de la zona 1 y la zona 2 de Quetzaltenango.

No pudo cuantificarse la pérdida de área para cada uno de los años de estudio, ya que el cambio de uso ha sido disperso; sin embargo, el área total invadida entre 1964 y 2006 es de 724.77 ha. Esto denota el poco control que las autoridades responsables de las áreas protegidas tienen sobre ellas, a pesar de que la legislación vigente dispone de una serie de medidas legales para evitar el cambio de uso. Las áreas invadidas por actividades agrícolas y urbanas se encuentran en el cerro El Baúl y el volcán Siete Orejas y, para el caso del volcán Santa María, el cambio de uso ha sido especialmente con fines agrícolas.

Cambios del uso del territorio con vocación agrícola

Si comparamos la información del cuadro 1, donde se presenta la capacidad de uso del suelo para la zona en estudio, el área con potencial agrícola es de 8 898,77 ha (equivalente al 47,03%). De acuerdo con la fotointerpretación realizada para el año 1964,

existía una alta correspondencia entre la capacidad de uso potencial y el uso dado, el cual representaba el 51,5% del área total de estudio; por lo que puede inferirse que no existían para ese año conflictos de uso. Seis años después (1970), el área agrícola se redujo en un 1,7% (162 ha) y representaba el 50,7% del área total. Para 1980 la reducción había alcanzado el 2,5% (se perdieron 244 ha destinadas a actividades agrícolas), con respecto a 1964 (ver figura 1).

El cambio de uso de suelo de agrícola a urbano ocurrido entre 1964 y 1982 puede considerarse una reducción normal debido al crecimiento de la población, ya que el incremento del área urbana en estos 18 años es solo de 656 ha (el 3,5%) y el decremento de las áreas agrícolas y forestal fue de 244 ha y 412 ha (1,3% y 2,2%) respectivamente. Durante este período, de acuerdo con la fotointerpretación realizada, el uso forestal, con un 2,2%, es el que más aportó al crecimiento urbano; y el uso agrícola, con un 1,3%. La pérdida de área boscosa y área con fines agrícolas se da casi con exclusividad para la ciudad de Quetzaltenango, donde desaparecen las áreas que están contiguas al núcleo urbano, especialmente en la parte occidental (lo que hoy es la Colonia Minerva y la Colonia El Cervecero); hacia el sur se forma la Colonia Molina. Hacia el norte, la ciudad no sobrepasa el río Seco y hacia el oriente, la ciudad no llegaba a lo que hoy es el monumento a la Marimba. Hay muy poco crecimiento urbano en los otros municipios en estudio.

Otra información que es relevante discutir y que tiene relación con el cambio de uso del suelo

agrícola durante este período es la que ofrecen los censos agropecuarios nacionales de 1964 y 1979, que se presentan en el cuadro 3. En él podemos apreciar que de 1964 a 1973 desaparece el 53% de las fincas subfamiliares medianas (de 30 se reducen a 16), las cuales dan paso a los primeros proyectos urbanísticos, que surgen especialmente en la ciudad de Quetzaltenango. Por otro lado, hay una atomización de las microfincas ya que se incrementan en un 150%. También el número de fincas familiares y subfamiliares se reduce en un 60% y 50% respectivamente.

Para 1990 ocurre una reducción del uso agrícola en un 10,80%. Esta reducción del área agrícola entre 1982 y 1990 coincide con dos acontecimientos ocurridos en el país que pudieron influenciar esta reducción: el flujo de inmigrantes que sufre la ciudad de Quetzaltenango, producto del desplazamiento provocado por el conflicto armado interno. Aunque no hay datos específicos sobre la inmigración a Quetzaltenango, de acuerdo con el informe de REMHI,³ este conflicto provocó una migración intermunicipal de 2 052 725 de habitantes, equivalente al 24,6% de la población existente, siendo la ciudad capital y Quetzaltenango las ciudades que más absorben dicha inmigración. Pero también coincide con el período en que prácticamente desaparece el sector público agrícola y la asistencia técnica agrícola gubernamental se reduce drásticamente. El cultivo de trigo pierde la protección arancelaria en el país, lo que provoca la desaparición casi por completo de este cultivo en el Valle de Quetzaltenango; esto desencadena una crisis en el sector agrícola que hace que para el agricultor sea más atractivo vender su terreno para fines urbanísticos que dedicarlo a la producción agropecuaria.

En el período 1990-2002 puede observarse también una reducción muy significativa del suelo con fines agrícolas, que representa el 21,9% (2 132 ha) con relación al área de 1964. Como puede apreciarse, del año 1964 a 1990 (26 años) desaparecen 1,052 ha de suelos con fines agrícolas, que es muy similar al área que se pierde durante el período 1990-2002 (en tan solo 12 años), que fue de 1 082 ha.

Este último período coincide con la construcción de la autopista de Los Altos, que da lugar a una franja de expansión urbana incontrolada en la periferia, que cubre una gran superficie de conversión territorial de suelo rural a urbano, dando lugar a proyectos urbanísticos con fines de vivienda y comercio alrededor de este eje vial. En este período también es ya significativo el crecimiento urbano de los municipios que conforman la Mancomunidad, especialmente La Esperanza y Olintepeque.

Pero la reducción más drástica de suelos con vocación agrícola ocurre del año 2002 al año 2006, cuando en un período de tan solo cuatro años desaparecen 2,150 ha. Esta reducción representa prácticamente la misma área que se pierde de 1964 a 2002 (38 años), con 2 132 ha. Para el año 2006, el uso del suelo con fines agrícolas ya solo ocupa el 28,9% del área total de estudio, lo que en 1964 era del 51,5%. Durante este período se acentúa el fenómeno de periurbanización y conurbación.

Cambio de uso del territorio con vocación forestal

De acuerdo con la información del cuadro 1 (capacidad de uso del suelo), el uso potencial con fines de aprovechamiento forestal de protección y de producción es de 6 617,89 ha (24,99% del área total). En 1964, el uso del territorio con fines forestales y el área protegida era de 8 317 ha. Para el año de inicio del estudio (1964), el área de uso forestal es de 5 221 ha, que ocupa el 27,6% del área total; para 1970 se han perdido 177 ha (26,7%); para 1982 la pérdida fue de 412 ha y para 1990 ya eran 636 ha. Entre 1990 y 2002 (12 años) se pierden 792 ha, 156 ha más de las que se perdieron entre 1964 y 1990 (26 años). Sin embargo, en el período 2002-2006 solo se pierden 46 ha de uso forestal, que es el equivalente al 0,2% del área total, mientras que para el área agrícola fue del 11,6% (ver figura 2).

El cambio de uso forestal a urbano ha sido más significativo que la pérdida del uso forestal a agrícola. La pérdida de la masa boscosa se ha dado especialmente en los alrededores del cerro El Baúl, cerro Candelaria, cerro Quemado y el volcán Siete Orejas. En este último, por ejemplo, se asienta la ciudad de los Altos, que ocupa terrenos en donde el uso adecuado es el de bosques de protección, por los servicios ambientales de esta área como zona de recarga hídrica para la ciudad de Quetzaltenango.

Cuadro 3. Tamaño y número de fincas del área de estudio durante los años 1964 y 1979 de la Mancomunidad Metrópoli de Los Altos.

Año		1964	1979
Clasificación	Tamaño finca	No. fincas	No. fincas
Microfincas	< 1 MZ	5633	8428
Subfamiliares	1 Mz. a < 10 Mz	4456	2668
Familiares	10 Mz a < 64 Mz	214	106
Multifamiliares medianas	1 Cab a < 120 cab	30	16
TOTAL		10333	11218

Fuente: INE, Censos agropecuarios de 1964 y 1979.

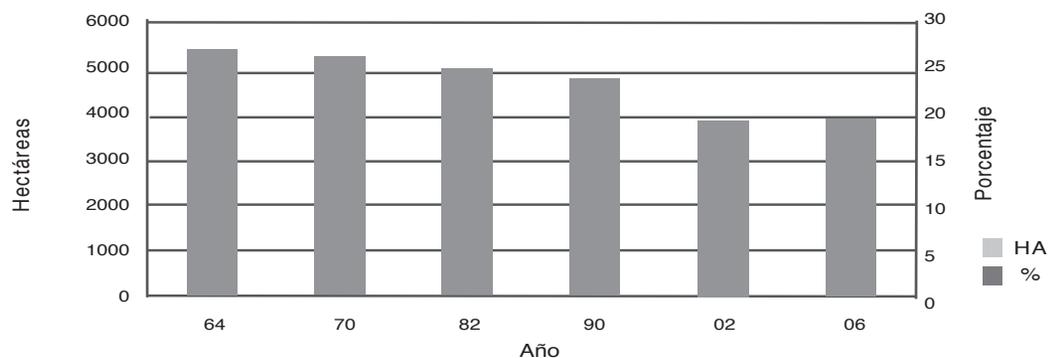


Figura 2. Reducción del uso forestal durante el periodo 1964-2006 en el área de estudio.

Fuente: investigación de campo 2010.

Intensidad de uso de la tierra en el área de estudio

La valoración de los conflictos de uso se hace sobre la base de comparar las categorías existentes de *uso actual de la tierra*, dándoles una calificación apreciativa en función de cada tipo de tierra presente en el municipio. La intensidad de uso resulta del contraste entre el mapa de uso potencial y uso actual del territorio (ver cuadro 4).

La valorización utilizada para determinar los conflictos de uso fue la siguiente: **Uso correcto:** Se asigna cuando en la confrontación existe un estado de equilibrio entre el uso actual y la capacidad de uso de la tierra, es decir, que se satisfacen los requerimientos entre la conservación y el desarrollo, y corresponde a la alternativa de mayor productividad en relación con el medio social local. **Subuso:** Esta categoría de confrontación se asigna cuando la

tierra no es aprovechada eficientemente de acuerdo con su potencial productivo, el uso actual corresponde a una alternativa de menor productividad que la de la capacidad de uso. **Sobreuso:** Se fija esta designación cuando la tierra se utiliza con alternativas productivas que no son adecuadas de acuerdo con su potencial de uso, y presentan un alto riesgo para la degradación de los suelos y de los recursos naturales. **Miscelánea:** Está formada por aquellos usos que no aplican para las categorías anteriores y comprenden: caminos, carreteras, viviendas y lagunas o cuerpos de agua.

Para el caso del área de estudio en la Mancomunidad Metrópoli de Los Altos, las cifras de intensidad de uso son alarmantes porque más de la mitad del territorio está siendo sobreutilizada (51,5%), es decir, la actividad que se está realizando es de mayor intensidad de la que la tierra puede soportar; lo cual ocasiona baja productividad y degradación

Cuadro 4. Conflictos (intensidad) de uso del territorio en la Mancomunidad Metrópoli de Los Altos, 2006.

Categoría	Hectáreas	Porcentaje
Uso adecuado	1105	5,8
Subutilizado	1464	7,7
Urbano	6605	34,9
Sobreutilizado	9745	51,5
Total	18919	100,0

Fuente: Investigación de campo 2009.

ambiental; por su parte, el suelo urbano ocupa el 34,7%, el uso adecuado es de solo el 6,1% y el subutilizado el 7,7% del territorio en estudio.

Escenario tendencial de los cambios de uso del suelo en el área de estudio

de acuerdo con el patrón de comportamiento de los cambios de uso del suelo, especialmente la pérdida de suelos agrícolas y forestales ocasionada por el crecimiento de las áreas urbanas entre 1964 y 2006, se realizó un análisis de correlación múltiple para predecir el escenario tendencial,⁴ bajo la premisa de que las condiciones que generaron este comportamiento entre 1964 y 2006 se mantengan constantes, por lo que no se hace un análisis de los factores que pueden influenciar este cambio de uso del territorio.

En la figura 3 podemos apreciar que en el año 2006 el uso del suelo con fines urbanos (6 605 ha, 34,9% del área total) ya ocupa un área superior al uso del suelo con fines agrícolas (5 471 ha, 28,8% del área total). De acuerdo con los resultados del análisis de correlación múltiple, podemos predecir que para el año 2014 el uso urbano ocupará un área de 7 312 ha (38,56% del área total), y que para el año 2039 el uso urbano ocupará un área de 12 374 ha (65,25% del área total), haciendo desaparecer por completo el suelo con fines agrícolas y reduciendo

el suelo con fines forestal a solo 3 390 ha (17,86%). Y para el año 2094 el área urbana hará también desaparecer en su totalidad el área boscosa de la región en estudio.

Conclusiones

de acuerdo con la capacidad de uso del suelo, en la Mancomunidad Metrópoli de Los Altos puede considerarse que casi en el 50% del área de estudio el uso potencial del suelo es para actividades agrícolas sin limitaciones o con algunas prácticas de conservación de suelos; el 35% para uso forestal de protección o de producción; por lo que de acuerdo con esta información solo el 15% de esta área tiene potencial para otros usos, en los que pueden incluirse centros poblados. Sin embargo, al contrastar la capacidad de uso del suelo con el uso del año 2006, podemos apreciar que existe una conflictividad (intensidad) de uso muy distante a esa capacidad, ya que solo el 5,8% de esa área tiene un uso adecuado, el 7,7% está subutilizado y el 51,5% está sobreutilizado, es decir, la intensidad del uso del suelo es mayor a la que soporta en términos físicos, lo que provoca baja productividad y una alta degradación ambiental.

Entre 1964 y 2006 pueden apreciarse los profundos cambios en el uso del suelo; donde destaca el fuerte crecimiento del área urbana (del 4,5% a 34,9% del área total en estudio), en detrimento del área para uso forestal (del 27,6% al 19,8%), con alto valor como proveedor de servicios ambientales; y la reducción significativa del área para uso agrícola (de 51,5% a 28,9%), suelos que se caracterizan por su alta vocación agrícola por ser planos, profundos, con buena textura y estructura, buen drenaje y alta fertilidad. El cambio de uso del territorio con vocación forestal ha sido más significativo con fines de uso habitacional que con fines agrícolas; es decir, la invasión de la mancha urbana en los suelos con vocación forestal ha sido más fuerte que la invasión de la frontera agrícola.

El incremento del área urbana entre 1990 y 2002 ha provocado el inicio del fenómeno de la conurbación, mediante el cual se eliminan los límites entre municipios, o estos no están bien definidos, lo que empieza a generar conflictos limítrofes.

De acuerdo con los resultados del análisis de correlación múltiple, el escenario tendencial que se puede predecir es que para el año 2034 el uso

4 Escenario tendencial: Corresponde a la extrapolación de tendencias. Lo que podría suceder si las cosas siguen comportándose como hasta ahora.

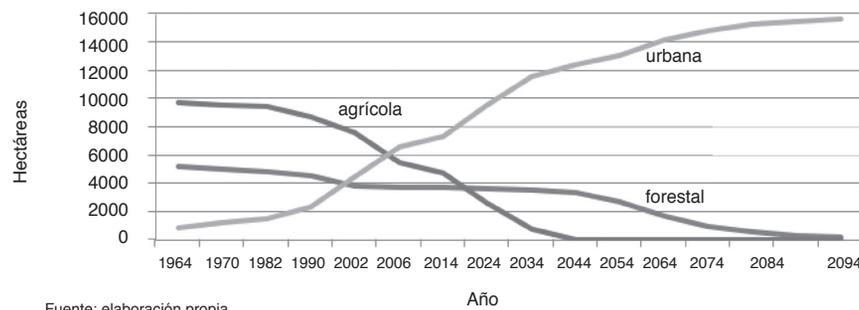


Figura 3. Comparación de los cambios de uso del suelo durante el periodo 1964-2006 en el área de estudio.

urbano ocupará un área de 11 541 ha (115,41 km²), haciendo desaparecer por completo el suelo con fines agrícolas y reduciendo aquel con fines forestal a solo 3 390 ha.

Durante el período de estudio la densidad poblacional se ha reducido de manera significativa, ya que en 1964 en las áreas urbanas ésta era de 9 011 habitantes por km² y para 2006 se reduce a 3 199 habitantes por km². Esta reducción puede deberse a diferentes fenómenos, entre los cuales están: cambios de uso del suelo urbano (áreas que antes eran para uso habitacional hoy son ocupadas por actividades comerciales, desplazando esta población a nuevas áreas urbanas), especulación (es decir, la inversión en vivienda no responde a las necesidades de la población sino a la especulación inmobiliaria), lavado de dinero, ausencia de regulaciones en el uso del suelo y la tendencia predominante del desarrollo horizontal de la vivienda.

Bibliografía

Alvarado Quiroa, H. (2010). *Análisis del crecimiento urbano y los cambios de uso del suelo durante el período 1964-2006, y propuesta de Unidades Territoriales en los municipios conurbados de la Mancomunidad Metrópoli de Los Altos, Quetzaltenango*. Tesis MSc. Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala. 97 pp.

Ávila Rangel, J. (2005). El control del crecimiento urbano con la ayuda del catastro y del plan de ordenamiento del territorio: estudio del caso de Guanajuato. Tesis MSc. Geomatiques. Francia, Université Laval, Faculté de Foresterie et de Géomatique. 173 pp.

Azócar, G. & Sanhuenza, R. (2003). La incidencia de factores regionales y locales en el crecimiento urbano de Chillan. Chile, Universidad del Bío Bío. 148 pp.

Bazant, J. (2001). Lineamientos para el ordenamiento territorial de las periferias urbanas de la ciudad de México (en línea). México, Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco. Consultado 5 ene. 2007. Disponible en: <http://www.e-local.gob.mx/wb2>

CONAP (Consejo Nacional de Áreas Protegidas, GT), PROPETEN (Proyecto ProPetén, GT). (2001). Plan de ordenamiento territorial, unidad de manejo Buen Samaritano, Parque Nacional Laguna del Tigre, San Andrés, Petén, Guatemala. 164 pp.

Congreso Nacional de la República de Guatemala, GT. (1989). Ley de áreas protegidas, Decreto No. 4-89. 16 p.

Congreso Nacional de la República de Guatemala, GT. (1997). Ley reguladora de las áreas de reserva territoriales del estado de Guatemala, Decreto No. 126-97. 8 pp.

Congreso Nacional de la República de Guatemala, GT. (2005). Ley de registro de información catastral, Decreto No. 41-2005. 33 pp.

Gómez Orea, D. (2002). *Ordenación del territorio*. Instituto Tecnológico Geominero de España-Editorial Agrícola Española. p. 1-17, 25-32.

Hernández, D. & López Blanco, J. (2000). Producción e integración de fotomapas digitales para la evaluación del crecimiento urbano en el municipio de Texcoco, estado de México: período 1970-1 989-1 997. UNAM, Instituto de Geografía. *Boletín* no. 42: 48-66.

Herrera, V. (2001). Estudio del crecimiento urbano de la ciudad de Valdivia (Chile), a través del uso integrado de imágenes de satélites, SIG y equipos GPS. Universidad de Santiago de Chile. 180 Pp.

INAB (Instituto Nacional de Bosques, GT). (2000). *Clasificación de tierras por capacidad de uso, aplicación de una metodología para tierras de la República de Guatemala*. 96 pp.

INE (Instituto Nacional de Estadística, GT). (1996). X censo nacional de población y V de habitación, Departamento de Quetzaltenango 1994. Guatemala. p. 32.

INE (Instituto Nacional de Estadística, GT). (2002). XI censo nacional de población y VI de habitación, 2002. (en línea). Guatemala. Consultado 5 ene 2008. Disponible en: <http://www.ine.gob.gt/index.php/demografia-y-poblacion/42-demografiaypoblacion/75-censo2002>

Análisis de la situación del estado de la Gestión Integral de Residuos (GIR) en el cantón de Guácimo, Costa Rica

Analysis of the solid waste management of Guacimo, Costa Rica

*Rooel Campos-Rodríguez¹
Silvia Soto-Córdoba²*

*Fecha de recepción: 27 de junio del 2013
Fecha de aprobación: 18 de agosto del 2013*

Campos-Rodríguez, R; Soto-Córdoba, S. Análisis de la situación del estado de la Gestión Integral de Residuos (GIR) en el cantón de Guácimo, Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 27, N° 1. Pág 114-124

- 1 Profesor-Investigador. Escuela de Agronegocios. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: rocampos@itcr.ac.cr.
- 2 Doctora en Ciencias Ambientales, Catedrática. Escuela de Ingeniería Ambiental. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: ssoto@itcr.ac.cr.

Palabras claves

Residuos sólidos; municipalidad de Guácimo; GIR; planes de manejo de RSM; aspectos políticos en la GIR.

Resumen

El objetivo de este artículo es mostrar los resultados del análisis de la gestión de los Residuos Sólidos Municipales (RSM), en la Municipalidad de Guácimo, localizada en Limón, Costa Rica. Esta Municipalidad no dispone de suficiente cantidad de información básica, para implementar su sistema de gestión integral de residuos sólidos (GIR), por esta razón, esta investigación provee los insumos necesarios para poder iniciar este proceso de construcción del GIR. Para esto, se recopiló la información bibliográfica disponible de la zona, se desarrollaron los instrumentos de captura de información, se entrevistaron los principales actores sociales, se realizaron visitas de campo y se analizó toda esta información, de forma que se logró sistematizar y organizar en los siguientes tópicos: Gestión administrativa de los residuos sólidos (porcentajes de cobertura de recolección, planes de gestión, camiones recolectores y rutas, limpieza de parques y vías, botadero que utiliza la municipalidad), Actores Sociales (centros de recuperación de residuos sólidos y acciones municipales). La Municipalidad de Guácimo maneja sus residuos sólidos con poca planificación, atendiendo más bien las urgencias que se presentan el día a día, con un presupuesto insuficiente para garantizar un servicio de calidad que proteja el ambiente, por lo que genera grandes impactos ambientales tanto en los procesos de recolección, transporte y disposición, siendo este último el de mayor impacto, ya que los RSM son enterrados en una finca sin ningún tipo de protección ambiental.

Este artículo, analiza la interacción entre los factores políticos, organizacionales, culturales, la administración de los residuos sólidos municipales y su impacto en el ambiente, con el fin de proveer algunas alternativas para mejorar la GIR. Se espera que este esfuerzo sirva para poder mejorar e implementar el sistema de gestión integral de residuos sólidos para la Municipalidad de Guácimo.

Key Words

Solid waste, Guacimo Municipality; SWM management plans; political aspects of ISWM.

Abstract

The aim of this paper its shows the results about the analysis of the solid waste management in the "Municipalidad of Guacimo" located in Limón, Costa Rica. The Municipalidad of Guacimo doesn't have the basic records and enough information that is necessary for improve the management of the solid waste. Because of that, this investigation provides the inputs for begin to design the solid waste management for the Municipalidad of Guacimo.

We search quotes bibliographic about the situation and characteristics of the management of solid waste in Guácimo, we develop the methodology for research and obtain primary information, interview the principal people that work with the solid waste in the Municipalidad of Guacimo and gathering the most important information. We sort and systematize the information about the administration for cleaning the streets and municipal parks, the administration of the collect the solid waste from the streets, schedule and routes of collection, operation of the landfill and the state of the recycle centers. The Guacimo Municipality doesn't handle appropriately their solid waste, the administration doesn't have proposals for the adequate management of the solid waste, the budget isn't enough for collect, transport and disposable the solid waste considering the optimal methods for secure environmental protection, instead, the Municipality contributes to increase the environmental contamination in the area, because the solid waste are dumping in inappropriate site.

In this paper, we analyze the interaction among of the politics, organizational culture, management and municipal administration, it's our wish to provides different alternatives and solutions for improve the waste management in the Municipalidad of Guacimo.

Generalidades

El cantón de Guácimo es el sexto cantón de la provincia de Limón y está ubicado en Costa Rica. Las coordenadas geográficas medias son 10°12'13" latitud norte y 83°37'30" longitud oeste (figura 1), cuenta con 576,48 kilómetros cuadrados de extensión y una población de 41 266 habitantes según el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC, 2011).

Está dividido en cinco distritos: Guácimo, Mercedes, Pocora, Río Jiménez y Duacarí. Los límites del cantón son: al norte y al oeste el cantón de Pococí, al sur el cantón de Turrialba, Provincia de Cartago y al este Siquirres (PNUD, FOMUDE, 2009).

En la página oficial de la Contraloría General de la República, (2011) se ubica al municipio de Guácimo en la posición 76, asignándole una nota en aspectos de saneamiento ambiental de 29,9%. Para calcular estos porcentajes la Contraloría utiliza los siguientes criterios de calificación: la recolección de residuos, el depósito y tratamiento de estos y el aseo de vías y sitios públicos (Contraloría General de la República Costa Rica, 2011). En este mismo estudio, se indica que la Municipalidad de Guácimo, no cuenta con estudios de generación ni de composición de residuos sólidos, ni ha determinado el costo por tonelada métrica de los RSM tratados. También se

indica que para el año 2011, esta municipalidad tuvo ingresos reales por US \$223 000 correspondientes al servicio de recolección de residuos, sin embargo, el gasto real del servicio de recolección de residuos ascendió a US \$ 285 000, lo que provocó un déficit estimado de US \$62 000 al año. Adicionalmente, solo se invirtieron US \$270 en maquinaria, equipo y mobiliario lo que representa tan solo un 0,12%.

Según él (INEC, 2011), la cantidad de viviendas ocupadas ascendió a 11,797, con un promedio de 3,5 habitantes por unidad habitacional. Para el año 2011, en el cantón de Guácimo el 6,32% de la población no tenía la educación primaria completa, este índice es superior al nacional de 4,40%, lo que revela el grado de rezago del cantón.

Metodología

Se realizaron entrevistas semiestructuradas con el fin de recabar la siguiente información primaria: situación actual de la administración de los residuos sólidos en el Cantón, estado de la limpieza de vías y parques, identificación de las rutas y horarios de recolección de residuos, estado del manejo del botadero municipal, existencia y tipos de centros de recuperación de materiales y los principales actores sociales del cantón. Estas entrevistas se

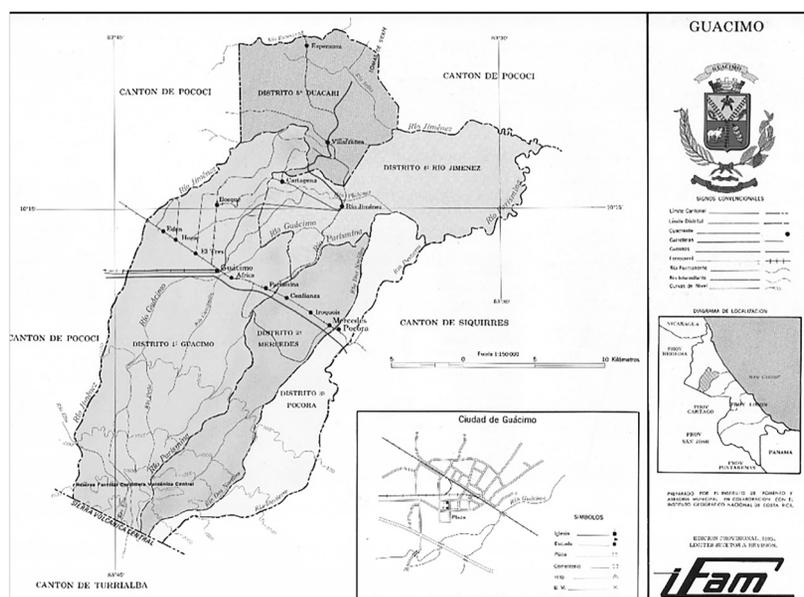


Figura 1. Mapa del Cantón de Guácimo

Fuente: (http://ccp.ucr.ac.cr/bvp/mapoteca/CostaRica/generales/atlas_cantonal_1984/87-Guacimo.pdf)

les aplicaron al: 1) grupo de trabajo denominado "Ambiente Sano, Guácimo Recicla" del Comité Plan de Residuos Sólidos (PRESOL) anillo central de Guácimo, conformado por representantes del Ministerio de Salud, Vice alcaldía municipal, síndicos, regidores y el encargado de saneamiento ambiental de la Municipalidad. (Sánchez Bonilla, 2011) 2) el personal técnico y operativo de la Municipalidad, 3) el Concejo Municipal y la Alcaldía. Las entrevistas se realizaron entre el mes de marzo 2012 hasta marzo del 2013.

Adicionalmente, se realizaron visitas para corroborar la información contenida en las entrevistas. Se realizó búsqueda y análisis de información secundaria en diferentes páginas oficiales del país. Con todos estos insumos se analizó la información y se establecieron algunas tendencias y estimaciones que se brindan en este artículo.

Resultados

Gestión Administrativa

a) Porcentajes de cobertura de recolección

Según los resultados del censo del año 2011 realizado por el (INEC, 2011), el 70% de la población en Guácimo utilizan el camión recolector municipal para disponer sus Residuos Sólidos (RS), mientras que el 20% los queman, y el restante los bota en lotes baldíos, ríos quebradas o los entierran. Al contrastar estos datos estadísticos, con la información del número de abonados que maneja la Municipalidad de Guácimo, se observa que solo un 65% (7 723 viviendas) contribuye con el pago del servicio de recolección, de forma que la municipalidad le recolecta a cerca de un 5% de viviendas de más que no pagan por el servicio. En campo se logra observar esta práctica, ya que el camión recolector no logra discriminar entre las bolsas provenientes de los abonados que si pagan por el servicio, y aquellos que aprovechan la situación de la falta de controles y fiscalización. Es común observar en los días de recolección, que algunos vecinos colocan sus bolsas en los puntos de colecta.

Otra práctica que se observa en Guácimo, es la contratación de servicios de recolección privados, esto no pudo visibilizarse en la encuesta del INEC, al no poseer esta opción dentro de su banco de respuestas. Los materiales recolectados mediante

esta modalidad, son enviados al vertedero que también es privado, en el mejor de los casos, pero no se tiene seguridad del destino final de estos materiales.

Es por ello que se determina que la forma de eliminación de RS en el cantón de Guácimo es la siguiente: 70% de las viviendas utilizan el camión recolector; de las cuales un 5% no paga por el servicio, un porcentaje indeterminado, utiliza los servicios privados de recolección y otro porcentaje también indeterminado, quema, entierra o tira los RS en lotes baldíos o en los ríos. Este estilo de disponer los residuos sólidos, hace complejo el manejo de los mismos, ya que erradicar estas prácticas implica conflictos de orden económico y social. Estos elementos deben incorporarse en los planes de GIRS que elabore la municipalidad como aspectos críticos y urgentes de resolver.

b) Planes de Gestión

La municipalidad de Guácimo no cuenta con un Plan integral para el manejo de los residuos sólidos, el cual es obligatorio según la Ley 8839 sobre Gestión Integral de Residuos (Asamblea Legislativa, 2010) y el manual para la elaboración de los planes. (Programa Competitividad y Medio Ambiente (CYMA), 2008). En la municipalidad se tiene solo un funcionario dedicado al saneamiento ambiental, que no cuenta con educación formal en el tema y ha tenido que irse capacitando sobre la marcha, por sus propios medios y sin contar con un plan de capacitación municipal. Este colaborador se dedica a tiempo completo a: fiscalizar el vertedero municipal, inventariar los botaderos clandestinos, administrar y velar por el mantenimiento de los camiones recolectores, es jefe del personal de recolección y de limpieza de vías y miembro del comité PRESOL, responde directamente al Alcalde.

c) Camiones recolectores y rutas

El Cantón solo dispone de dos camiones recolectores con una capacidad de 9 y 11 Toneladas con una antigüedad de 12 años (figura 2), estos camiones no cuentan con sistemas de contención de lixiviados, siendo común la práctica de verterlos directamente en las calles. Tampoco cuentan con aire acondicionado y las ventanas están trabadas, debido a las elevadas temperaturas de la zona (promedio 32 °C), los choferes se agotan y tienen que estar siendo relevados, esto es un peligro inminente por



Figura 2: Camión recolector municipal en el Vertedero de Guácimo (tomada febrero 2013)

una condición que es fácil de resolver. El servicio de recolección generalmente no cumple el horario establecido. No se tiene claridad de la eficiencia del uso de combustible que utilizan estos camiones, ya que los medidores están en mal estado, además de que no se tiene ningún tipo de control de distancias recorridas vs materiales recolectados. Otros insumos tales como llantas, repuestos, aceites, etc., no guardan relación con la calidad y estado de los vehículos, ya que se invierten muchos recursos en estos insumos y de manera generalizada al menos uno de los camiones presenta fallas mecánicas y problemas operacionales, por lo que esto obliga a trabajar en dos turnos de 6:00 am a 12:00 md y de 12:00 md a 6:00 pm, con un solo camión lo que disminuye la vida útil de estos, aumenta los costos operativos y la huella de carbono.

Las rutas de recolección se han establecido sin ningún tipo de estudio de carácter técnico, responden a las necesidades particulares de los operarios, de los vecinos, del alcalde, o bien responden a urgencias en el momento. Por tanto, no se optimiza el uso de combustible, no se cumplen con los horarios de recolección, no existe la planificación en este tema.

Se evidenció en la investigación que hasta la fecha no se han realizado estudios de seguridad ocu-

pacional, cargas de trabajo, tiempos de descanso, peligrosidad, contaminación ni análisis de la situación de salud general de los trabajadores.

Encontramos que el diseño de las rutas no considera la carga de camiones, por lo que no se optimizan las recolectas, tampoco se considera el tránsito de los camiones sobre carreteras en mal estado, alamedas muy angostas o sitios donde transiten niños, tapas de alcantarillado inexistentes, o con un carpeteo muy delgado, lo que este tránsito podría provocar diversos accidentes que van desde daños de tuberías, accidentes de tránsito, daños a los camiones, etc. No se han realizado estudios del riesgo del transporte de materiales que inclusive pueden ser peligrosos por las características de la recolección no discriminada dentro de los vecindarios, ni de los tipos de materiales transportados, ni se tiene claridad del cumplimiento de las distancias y consumos de combustibles asociados, por estas razones no se puede planificar ninguna acción de mejora mientras no se dispongan de estos datos. Para tal fin, en los últimos años la Municipalidad ha contratado en forma intermitente una profesional en gestión ambiental, para que diseñe los instrumentos de control de aseos de vías, consumo de combustibles, cantidades depositadas en el vertedero, rutas de recolección, mantenimiento de vehículos, etc., usando como base las directrices de PRESOL, sin embargo, estos instrumentos a la fecha no se han validado ni puesto en marcha, por lo que el uso de estos recursos ha sido ineficiente.

El programa PRESOL contiene seis tareas, de las cuales, gracias a la contribución de esta profesional se pudo lograr al menos completar parcialmente la primera de estas.

d) Limpieza de Parques y vías

El aseo de parques y vías lo hacen dos funcionarios municipales contratados a tiempo completo, el servicio solo se brinda en el casco central de los distritos de Guácimo y Río Jiménez, no existe ningún plano o ruta definida de control del trabajo realizado, se calcula que entre ellos limpian un aproximado de nueve kilómetros lineales, dos veces por semana en el distrito de Guácimo y una vez por semana en Río Jiménez, no se sabe la cantidad de materiales que recolectan ni los tipos, solamente se conoce que los funcionarios colocan la basura en bolsas y

la dejan en algunos puntos de común acuerdo para que el camión los recolecte, no utilizan el equipo de protección personal, aunque sí usan uniforme. Tampoco existen controles de ruta o trabajo, los trabajadores no marcan tarjeta por lo que se desconoce si cumplen el horario de trabajo, tienen una escolaridad muy baja, lo que dificulta el llenado de hojas de trabajo con información para rendir cuentas de sus servicios, a pesar de esto la Municipalidad no les ha brindado capacidad formal. Los vecinos y dueños de locales colindantes al parque central de Guácimo, colocan sus residuos sólidos en el mismo, aprovechando que este se limpia prácticamente todos los días, debido a que el mismo está frente al Municipio (Coronado, 2012).

No existe un buzón de quejas o registro de inconformidades, y aunque se han presentado algunas quejas esporádicamente, pero a estas no se les ha dado seguimiento.

e) Botadero que utiliza la Municipalidad

Para disponer los RSM, la Municipalidad de Guácimo contrata media hectárea en una finca privada en cuyo contrato se indica que es para "relleno sanitario". La misma se encuentra ubicada en el Distrito de Guácimo, Barrio Carambola, provincia de Limón. La Finca es parte del folio real 7026501-000. El contrato indica que en la finca "se depositarán todos los desechos domiciliarios y de comercios no industriales recolectados, con excepción de los desechos de talleres, de jardines, llantas de camión u otros de similar condición, que recolecten en el cantón de Guácimo, para

ello, el camión de recolección de basura propiedad de la Municipalidad o autorizados expresamente por esta, tendrán acceso sin restricción alguna a la finca dada en arrendamiento". Actualmente el contrato va desde el primero de marzo del 2013 hasta el 31 de diciembre del presente año, por un monto total de US \$7 722. En la práctica, la Municipalidad hace uso discrecional de varias fincas adyacentes posee aproximadamente 10 hectáreas. Estas fincas no cuentan con ningún tipo de infraestructura para atender la disposición de RSM. Para disponer los RSM solamente se cava una fosa de 5 metros de profundidad para depositarlos y luego se vuelve a tapar (figura 3).

Cuando se presentan lluvias importantes en la zona, se presenta el inconveniente que para llegar al vertedero se debe cruzar por una carretera de lastre y también se debe atravesar parte del río Bosque, el cual se desborda con la lluvia. Si por alguna razón el camión inició el recorrido y en el camino se desbordó el río, es necesario devolverse hasta el plantel municipal, y ahí el camión se deja aparcado hasta que las condiciones de la ruta mejoren y se pueda regresar al botadero, mientras tanto no se brinda el servicio de recolección en las calles y la basura se continúa descomponiendo en el interior del camión.

Este vertedero ya ha sido intervenido por el Ministerio de Salud, pues no cumple con los requisitos mínimos para prestar este servicio, aun así, la Municipalidad de Guácimo continúa enviando sus RS al lugar, amparándose en que no tienen otro sitio donde depositar la basura. El Ministerio de Salud realiza una visita mensual sorpresa, esto a



Figura 3. Fotografías del proceso de enterramiento de la basura en el vertedero municipal de Guácimo (tomada febrero 2013)

petición del departamento de saneamiento ambiental. Desde el año 2001 se vienen dando múltiples quejas por este sitio e inclusive se hizo una denuncia ante el tribunal ambiental del Agua.

No existen controles de lixiviados, ni análisis de suelos, ni protección de capas freáticas, protección contra incendios, control de gases, control de roedores, seguridad privada, personal para controlar el ingreso de materiales, ni estadísticas de materiales depositados. El vertedero municipal funciona de lunes a viernes, recibe basura de todo tipo y cantidad, proveniente de otros cantones, empresas privadas como bananeras, piñeras e inclusive se tienen informes de haber recibido pinturas y disolventes orgánicos. Cuando los camiones particulares llegan a depositar los RS en el sitio aprovechan si existe una fosa abierta por la Municipalidad para depositar sus materiales, en caso contrario, los dejan sobre el suelo al descubierto, de forma que la retroexcavadora municipal debe darse a la tarea de enterrar los mismos aún cuando no hayan pagado por el servicio. Se ha observado que los costos por combustible por el uso de la retroexcavadora son inusualmente muy altos, pero esto se ha justificado por la necesidad mantener tapada toda la basura sea municipal o privada, aún cuando estos últimos no paguen por el servicio.

De la inspección visual al sitio se verificó la salida de gases desde el suelo, y temperaturas inusualmente altas que se determinan al abrir un hueco en el suelo. También existen reportes de bolsas en estado intacto luego de varios meses de haber sido enterradas.

No existen poblaciones cercanas al vertedero, solamente una piñera y fincas dedicadas a explotaciones agrícolas.

El dueño de la finca, una vez que los residuos son enterrados y ha pasado un tiempo prudencial (6 meses), se da a la tarea de sembrar en el sitio yuca, plátano, pipa, papaya, limones, entre otros, y posteriormente los vende al público en general, se desconoce si estos productos han sido contaminados con el material del vertedero. No se verifican en el sitio "buzos" o recolectores, debido posiblemente a la lejanía de centros poblacionales.

Actualmente no se tiene claridad de la cantidad de residuos depositados en el sitio, sin embargo, los autores utilizando la información de estudios pre-

vios (EARTH), comunicaciones con el encargado de saneamiento ambiental (Coronado, 2012), han estimado que en la operación de los últimos 10 años se han recibido cerca de 76 000 toneladas de RS.

Actores sociales

a) Centros de Recuperación de Residuos Sólidos

Existen ocho Centros de Recuperación de materiales, pero Ministerio de Salud ha cerrado siete apejándose a la ley. El único que sigue trabajando de manera normal es el centro de recuperación de la Escuela del Trópico Húmedo (EARTH), que recolecta papel, cartón, plástico y vidrio de todo tipo.

Por su parte, los centros de acopio Carambola, Manos entrelazadas con el ambiente, Iroquois, Madre Tierra, Recicladora de Metal, Reproa S.A. y Coopeguacimeñas, están sin operación, por lo que no se tienen datos disponibles.

b) Acciones municipales

b.1 Gestión de cobro

La municipalidad cuenta con cobros diferenciados en la recolección y servicio de limpieza de vías públicas y privadas, este cobro es mensual. Para realizar las clasificaciones y los cobros respectivos en teoría, se considera el volumen del material que generan los tipos de usuarios según tres clasificaciones: residencial, comercial-industrial e institucional-religioso. Para el sector residencial se asignan dos categorías según el volumen de RSM, de igual forma para el sector comercial-industrial se asigna cuatro categorías y finalmente para el sector institucional-religioso se asignan 2, los costos por recolección aumentan según la cantidad de material desechado. (cuadro 1).

Debido a que la Municipalidad no cuenta con personal suficiente y solamente una romana para determinar el peso de los RSM, solo se aplican los cobros más bajos de cada categoría

La sostenibilidad del servicio de recolección de residuos según la contraloría (Contraloría General de la República Costa Rica, 2011) es de -27,7 % lo que significa que el sistema no es sostenible y con el tiempo acumulará mayores problemas.

En el cuadro 2, se muestran los datos de morosidad acumulada para el año 2012, los mismos son históricos y en algunos casos se podría asumir como incobrables, debido a que algunas personas deudo-

ras ya han fallecido, sin embargo, la municipalidad no tiene la estructura administrativa ni los recursos para depurar sus bases de datos rápidamente, además la estructura legal del país, principalmente, asociada a las políticas de la contraloría general de la república, no permiten ajustar estos flujos de caja al rubro de incobrables, lo que provoca que año con año la municipalidad reporte pérdidas en este rubro, y se desconozca la situación real de recursos para invertir en el manejo de los RSM (Coronado, 2012).

b.2 Convenios con universidades y ONGs

La Universidad EARTH ha trabajado con la Municipalidad de Guácimo principalmente desarrollando estudios en Pocora y Mercedes (Camacho, Murillo, & Yeomans, 200; Dicent, Yeomans, & Argüedas, 2008; Abubacar, Acosta, & Yeomans, 2008), la UNED firmó en el año 2010 un convenio de coo-

peración para la capacitación en diferentes aspectos municipales (Ureña, 2010) el cual vence en el 2013, pero no ha impactado en el tema de los RSM. También se identifica una tesis con algunos resultados de opinión realizada en la Universidad para la Cooperación Internacional (Vallejo, 2011). El último convenio firmado por la municipalidad responde a los resultados de este trabajo, que permitirán a la misma contar con el análisis de la situación actual de los residuos sólidos y el estudio de generación y composición.

b.3 Ejecución de presupuestos

En la municipalidad de Guácimo se observó un procedimiento de asignación de partidas presupuestarias para los rubros de inversión y contratación de personal de apoyo, que incide directamente en la prestación del servicio de recolección y disposición

Cuadro 1. Cobro por servicios de recolección y tratamiento de los RSM de la Municipalidad de Guácimo

Tipo	Costo (US \$/mes)
Sector residencial tipo 1	2,56
Sector residencial tipo 2	5,12
Comercial-Industrial tipo 1	5,12
Comercial-Industrial tipo 2	12,81
Comercial-Industrial tipo 3	25,63
Comercial-Industrial tipo 4	55,12
Institucional-Religioso tipo 1	3,84
Institucional-Religioso tipo 2	12,81
Servicios de Aseo de Vías y Sitios Públicos para las Residencias tipo 2	5,12
Limpieza de vías metro lineal	0,24

Fuente: Municipalidad de Guácimo

Cuadro 2. Morosidad del servicio de recolección de residuos y aseo de vías y sitios públicos de la Municipalidad de Guácimo

Servicio	Total de morosidad acumulada a diciembre 2012 (US \$)
Servicio de recolección de residuos	420 794
Servicio de aseo de vías y sitios públicos	27 368
TOTAL	448 162

Fuente: Municipalidad de Guácimo, Gestión de Cobro.

de los residuos sólidos. Los rubros de operación no presentan este problema.

El presupuesto por ley se asigna mediante el PAO (Plan Anual Operativo). El encargado de saneamiento ambiental, diseña el PAO y lo envía a la alcaldía, luego a contabilidad y finalmente al concejo municipal para su oportuna aprobación. Es común que no se aprueben ni los mínimos solicitados.

Es común observar una asignación tardía de algunas partidas que coadyuvan a la GIR lo que no permite que los mismos sean ejecutados, debido a que los controles administrativos, la ley de contratación pública y demás lineamientos, establecen una serie de procedimientos de compra, licitación y adjudicación, que son complejos y requieren de mucho tiempo.

Esta forma de administrar fondos provoca dos efectos, el primero es que todos los años la Municipalidad cuenta con un superávit que le permite al año siguiente financiar nuevamente los proyectos. Esto provoca un rezago año con año pues no se hace inversión en el departamento de saneamiento ambiental, aunque en el plan operativo si se ve reflejada dicha inversión.

El segundo efecto, es la desmotivación de los funcionarios administrativos y operativos, ya que la baja ejecución presupuestaria no permite realizar proyectos necesarios para el departamento de saneamiento ambiental.

Discusión y conclusiones

La municipalidad de Guácimo es la llamada a brindar las pautas a seguir en el manejo, disposición y tratamiento adecuado de los residuos sólidos que se generen en su comunidad. Esta debe propiciar el trabajo conjunto entre los diferentes actores sociales, resolver los problemas de contaminación por tratamiento inadecuado, y brindar un servicio de calidad acorde a los ingresos.

La situación actual de la Municipalidad de Guácimo la coloca en una posición de alta vulnerabilidad en el manejo de los Residuos Sólidos. El problema es multivariado, incluye aspectos de decisión política, dificultades administrativas, problemas de planeamiento, falta de inversión y demás. Sin embargo, es el criterio de los autores, que si bien es cierto, existen algunas deficiencias económicas, este último no es el

principal problema que incide en la mala gestión de los RS en Guácimo.

Dentro los problemas detectados en la municipalidad de Guácimo que inciden en la inadecuada GIR se tienen: la inexistencia de planes de gestión, la baja cobertura de recolección, la inexistencia de controles en la recolección, la ausencia de sitios de tratamiento apropiados, la falta de recursos, el uso poco efectivo de los mismos, la falta de una oficina de gestión ambiental y la necesidad de capacitación del personal, para que logren tomar decisiones públicas sostenibles acordes con la realidad y necesidad del cantón.

En la figura 4 se presenta un análisis comprensivo de los principales problemas y efectos según el nivel de responsabilidad municipal.

Debido a la inexistencia de planes de gestión, la municipalidad actúa conforme a las urgencias, solicitudes y demandas, por lo que no optimizan sus recursos, sobrecargan al personal, resuelven problemas de manera atomizada y no logran darle continuidad a los proyectos, por lo que en el tema de la gestión ambiental quedan debiendo, pues este es un tema de planificación a largo plazo y no se resuelve con acciones puntuales.

Obviamente, ante tal panorama es difícil realizar estudios, invertir en mejoras tecnológicas y optimizar el sistema, por lo que el primer paso para lograr tales mejoras es precisamente, informar, sensibilizar, generar actitudes y valores ambientales en el personal municipal para que se empoderen y realicen acciones ambientalmente positivas.

Si la municipalidad de Guácimo pretende ampliar el margen de cobertura del servicio de recolección de residuos y aumentar el porcentaje actual de 65%, deberá indiscutiblemente de contar a la brevedad posible con los estudios de generación y composición del cantón, para así, poder realizar las proyecciones necesarias y plantear políticas públicas sostenibles en cuanto a las rutas de recolección, flota de recolección, personal, disposición final de los residuos, construcción y equipamiento de la oficina de gestión ambiental y capacitación general para el personal.

El accionar político de la municipalidad es fundamental para comprender el funcionamiento de cualquier proyecto que se ejecute, en los últimos años en Costa Rica han aparecido muchos grupos políticos, que

polarizan o bien no permiten la toma de decisiones oportuna por cuestiones de cálculo electoral. En el caso de la Municipalidad de Guácimo, en la actualidad hay representación de varios grupos políticos como Partido Liberación Nacional (PLN, en el gobierno nacional y al cual pertenece el alcalde) en este momento mayoritario en la Municipalidad, el Partido acción ciudadana (PAC), el Movimiento Libertario (ML) y Partido renovación costarricense (PRC).

Todos estos grupos son ideológicamente contrarios, van desde grupos neoliberales hasta izquierda y de índole religiosa, es común observar en las sesiones de consejo, gran cantidad de discusiones, muchas veces infructuosas y por cuestiones poco productivas. Cada grupo política busca sostener su punto de vista y se utilizan muchas horas buscando culpables a las múltiples acciones inconclusas que hay en la municipalidad. Este accionar atrasa la toma de decisiones, no permite la oportuna fiscalización y control, y es muy costoso para el municipio, tanto en términos económicos como de oportunidad y desarrollo.

El 63% de los síndicos y regidores y también el alcalde, solo cuentan con la primaria completa, a pesar de ser personas muy inteligentes y con gran liderazgo, esta carencia educativa incide negativa-

mente en algunas decisiones de carácter técnico, por la misma complejidad de las mismas, ya que se ve como un desperdicio la inversión de recursos en la planificación, la fiscalización, los controles, la compra de vehículos, el uso de tecnología, la inversión en profesionales especializados, la compra de equipo de cómputo, la inversión en capacitación del personal, etc.

Si el municipio de Guácimo desea resolver sus problemas de GIR debería considerar las siguientes experiencias positivas de otros países y municipios:

1. La toma de decisiones técnicas debe realizarla un ente técnico y no debe estar supeditada a los vaivenes políticos, ya que es un asunto de largo plazo y no puede estarse improvisando según cada administración.

Contar con una oficina de gestión ambiental puede ser algo costoso en una primera etapa, por lo que una excelente opción es construir alianzas con universidades para la capacitación y asesoramiento, contar con la pasantía de estudiantes de último nivel que desarrollen tesis en temas específicos para la construcción del Programa GIR. Otra opción es contratar consultores privados para actividades específicas

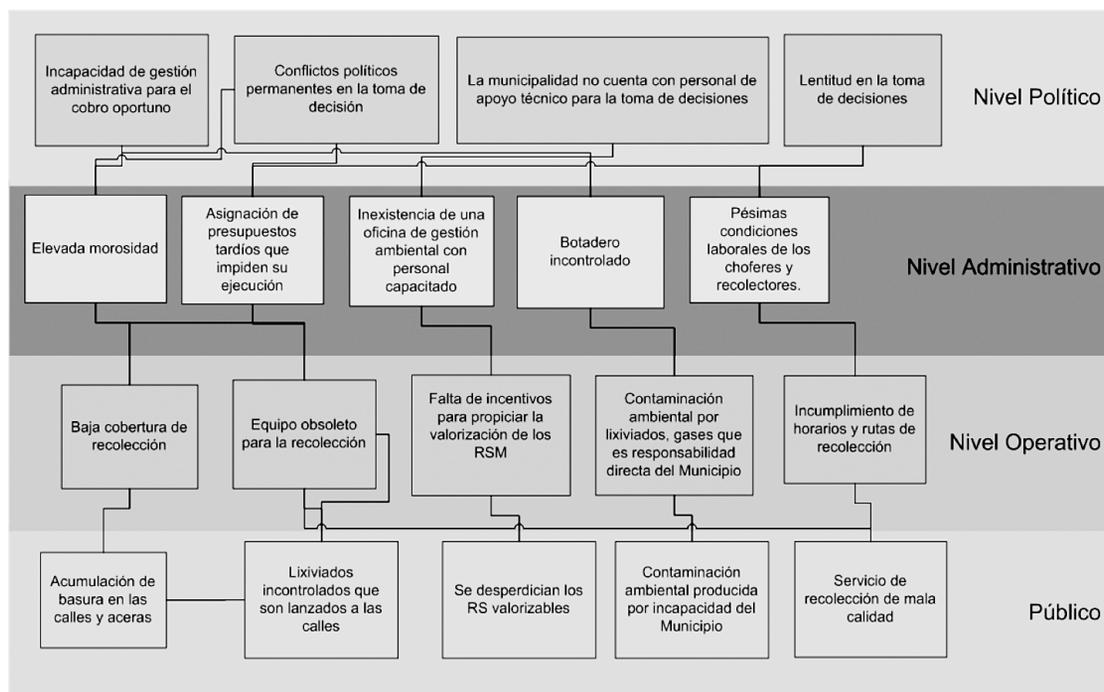


Figura 4. Relación de causas y efectos y sus problemas en el caso de la GIR de la Municipalidad de Guácimo.

bien definidas, también se puede contar con profesionales y equipo de planta, lo cual le da al proceso mayor fortaleza y sostenibilidad, y finalmente, el municipio puede establecer alianzas con otras municipalidades para contar con un grupo común de técnicos para atender estas acciones.

Al contar con este ente técnico la municipalidad podría resolver los problemas operativos más comunes como el incumplimiento de horarios, la falta de fiscalización de operarios, las condiciones de trabajo, las rutas y horarios de recolección, etc. logrando con esto mejorar el servicio que se ofrece a los abonados.

2. Los presupuestos de inversión no deben comprometerse para otras actividades del Municipio.

Esta práctica tan indeseable debe erradicarse del accionar político pues no resuelve los problemas, sino más bien va generando otros más complejos como la desmotivación del personal. Es imperativo que la municipalidad incorpore estos recursos para la inversión respectiva y así mejorar el servicio.

3. Es urgente resolver el problema del botadero municipal.

La municipalidad no puede convertirse en un generador de contaminación, si a la fecha el ministerio de salud no ha logrado el cierre del sitio, esta no debe ser la razón por la cual el municipio continúe con esta contaminante práctica.

4. La valorización de los residuos.

Es una obligación según la ley GIR, por lo cual, mientras no se logren resolver estos problemas anteriores, será imposible comenzar con esta etapa. Para esto, es necesario conocer la composición de los RSM mediante un estudio de composición, esta actividad podría ser abordada por el ente técnico que haya seleccionado la municipalidad de Guácimo.

Agradecimientos

A la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica, por el financiamiento del proyecto "Fortalecimiento de las actividades ambientales municipales mediante el apoyo en la planificación de la gestión integral de los residuos sólidos en el Cantón de Guácimo", Código 5401-1431-3001.

Bibliografía

- Asamblea Legislativa. (2010). *Ley para la Gestión Integral de Residuos*. Costa Rica.
- Abubacar, I., Acosta, J., & Yeomans, J. (2008). Gestión administrativa para un programa de manejo de desechos en comunidades rurales. *Tierra Tropical*, 4(1), 83-118.
- Camacho, J., Murillo, J., & Yeomans, J. (2008). Plan de negocios para la implementación de un centro de recuperación de materiales en Guácimo, Costa Rica. *Tierra Tropical*, 4(1), 119-162.
- Contraloría General de la República Costa Rica. (Diciembre de 2011). *Sistema integrado de información municipal*. Obtenido de <http://cgrw01.cgr.go.cr/apex/?p=142:1:3194664249822071>
- Coronado, R. (28 de setiembre de 2012). Gestor Ambiental, municipalidad de Guácimo. (R. Campos, Entrevistador)
- Dicent, Y., Yeomans, J., & Argüedas, M. (2008). Modelo de manejo de desechos sólidos ordinarios para el distrito de Pocora en Costa Rica. *Tierra Tropical*, 4(1), 31-82.
- INEC. (23 de Febrero de 2011). *INEC Costa Rica*. Obtenido de <http://www.inec.go.cr/Web/Home/GeneradorPagina.aspx>
- PNUD, FOMUDE. (2009). *Plan de Desarrollo Humano, Guácimo*. Costa Rica.
- Programa Competitividad y Medio Ambiente (CYMA). (2008). *Manula para la Elaboración de Planes Municipales de Gestión Integral de Residuos Sólidos*. San José.
- Sánchez Bonilla, Y. (2011). *Tarea 1: Unamos voluntades para hacer el Plan de Municipal de Gestión integral de Residuos Sólidos del Cantón de Guácimo*. Costa Rica.
- Ureña, S. L. (7 de setiembre de 2010). *Universidad Estatal a Distancia*. Obtenido de Acontecer: http://www.uned.ac.cr/acontecer/index.php?option=com_content&view=article&id=361:uned-presente-enguacimo-tras-firma-de-convenio&catid=51:gestion-universitaria&Itemid=76
- Vallejo, S. (2011). *Diagnóstico de la gestión de los desechos sólidos generados en la comunidad de Guácimo de Limón para el cumplimiento de la ley 14423*. San José: UCI.

Cronograma 2014

	Vol. 27-1	Vol. 27-2	Vol. 27-3	Vol. 27-4	Vol. 28-1	Vol. 28-2	Vol. 28-3
Recepción de artículos	Mayo - julio 2013	Agosto - octubre 2013	Noviembre 2013 - enero 2014	Febrero - abril 2014	Mayo - julio 2014	Agosto - octubre 2014	Noviembre 2014 - enero 2015
Evaluación de expertos y aprobación	Agosto - setiembre 2013	Noviembre - diciembre 2013	Febrero - marzo 2014	Mayo - Junio 2014	Agosto - setiembre 2014	Noviembre - diciembre 2014	Febrero - marzo 2015
Revisión de estilo y corrección	Octubre 2013	Febrero 2014	Abril 2014	Julio 2014	Octubre 2014	Enero 2015	Abril 2015
Diagramación y correcciones finales	Enero 2014	Marzo 2014	Mayo - junio 2014	Agosto - setiembre 2014	Noviembre - diciembre 2014	Febrero - marzo 2015	Mayo - junio 2015
Publicación del número	Febrero 2014	Mayo 2014	Julio 2014	Octubre 2014	Febrero 2015	Abril 2015	Julio 2015



Editorial Tecnológica
de Costa Rica

La revista *Tecnología en Marcha* es publicada por la Editorial Tecnológica de Costa Rica, con periodicidad trimestral. Su principal temática es la difusión de resultados de investigación y de la práctica profesional y docente en temas científicos y tecnológicos, así como su importancia para el desarrollo del conocimiento. El contenido de la revista está dirigido a investigadores, especialistas, docentes y estudiantes universitarios.

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 cinco y 15 páginas de 21,59 x 27,94 cm (8,5 x 11 pulgadas). Se debe presentar en un documento de Microsoft Word, con interlínea de espacio y medio, en una columna, en letra Times 12 pts.
3. Los títulos de los artículos deben ser sencillos, claros, cortos y estar en español e inglés.
4. Es necesario indicar claramente el nombre y los dos apellidos del autor; nacionalidad, profesión, teléfonos, correo electrónico, dirección exacta, lugar de trabajo y país de origen de dicha entidad.
5. Las palabras clave deben presentarse en español y en inglés. Además, el resumen debe estar compuesto por 250 palabras y aparecer en ambos idiomas.
6. Las imágenes se deben enviar en un archivo aparte del documento principal. En caso de ser escaneadas, la resolución mínima es de 300 ppi. Los formatos permitidos son: .jpg, .tiff, .eps, .psd y .ai.
7. Las fórmulas y ecuaciones matemáticas deben realizarse con el editor de ecuaciones de Word.
8. En lo pertinente, se usará el Sistema Internacional de Unidades.
9. La bibliografía debe aparecer al final del documento, ordenada alfabéticamente por el apellido del autor y de acuerdo con el formato APA (American Psychological Association) edición 2010, que establece, entre otros aspectos:
 - **Libro impreso:** Apellido, iniciales del autor: (Año de publicación). *Título del libro*. Lugar de publicación: Editorial.
 - **Libro electrónico:** Apellido, iniciales del autor: (Año de publicación). *Título del libro*. Obtenido desde <http://>
 - **Artículos de revista impresa:** Apellido, iniciales del autor: (Año de publicación). Título del artículo. *Título de la revista*, volumen (número), número de página inicial y final.
 - **Artículos de revista en versión electrónica:** Apellido, iniciales del autor: (mes, año de publicación). Título del artículo. *Título de la revista*, volumen (número), número de página inicial y final. Obtenido desde <http://>
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 for authors wishing 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, and professional and teaching practice on scientific and technology topics, as well as their importance for knowledge-building. The journal's contents are intended for researchers, experts, teachers and university students.

1. All articles must be originals, unpublished, and cannot be simultaneously used in other processes.
2. Papers may be 5-15 pages long (8.5 × 11 in, or 21.59 × 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, the International System of
9. Bibliography will be included at the end of the document, arranged in alphabetical order based on the authors' names, and in keeping with the 2010 edition of the APA (American Psychological Association) format, establishing the following aspects, among others:
 - **Printed book:** Last name, author's initials. (Year of publication). *Book title*. Place of publication: Editorial.
 - **Electronic book:** Last name, author's initials. (Year of publication). *Book title*. Available from <http://>
 - **Printed journal articles:** Last name, author's initials. (Year of publication). Article title. *Name of Journal*, Volume (Number), First and last page numbers.
 - **Electronic journal articles:** Last name, author's initials. (Month, year of publication). Article title. *Name of Journal*, Volume (Number), First and last page numbers. Available from <http://>
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.