

EFFECTO DEL TIEMPO DE EXPOSICIÓN A LA LUZ SOBRE LA DESAPARICIÓN DE LOS COLIFORMES FECALES

NIBIS BRACHO, PATRICIA FERNÁNDEZ, CARLA ZAMBRANO,
MARÍA PIRE Y LUISA SAULES

*Centro de Investigación del Agua, Facultad de Ingeniería,
Universidad del Zulia, Maracaibo, Estado Zulia, Venezuela
nibisbracho@hotmail.com, patriciavfernandez@gmail.com*

Resumen. Este trabajo determinó el efecto del tiempo de exposición a la luz (TEL) sobre la desaparición de coliformes fecales (CF). Se utilizó el afluente de una laguna de maduración, para alimentar 10 reactores por carga, colocados bajo luz artificial con los siguientes TEL: 0 h, 10 h, 12 h, 14 h y 24 h. Se determinaron: CF, nitrógeno total, nitritos, nitratos, nitrógeno amoniacal, fósforo total, DQO, clorofila, pH, temperatura y OD. Adicionalmente, se determinó la constante de desaparición de los coliformes fecales (K_b), para los diferentes (TEL). La constante de desaparición K_b expresada en día^{-1} fue diferente: 2,07; 2,97; 3,37; 4,48; 5,09 para 0 h, 10 h, 12 h, 14 h y 24 h de luz respectivamente. La máxima remoción de 99,5% resultó en el experimento de 24 h de luz, en presencia de 10,84 mg/L de OD y pH de 8,67, siendo la mínima remoción de 85,62% en ausencia de luz, para un OD y un pH de 1,94 y 7,83, respectivamente. Se obtuvo la ecuación $K_b = 0,16568 (\text{TEL}) + 0,29851 (\text{pH}) - 0,11888 (\text{OD})$, con un $R^2 = 0,99$. Esto indica que la desaparición de CF depende del TEL, pH y OD, mientras que el análisis estadístico del porcentaje de remoción de CF en cada TEL, involucró diferentes variables, las cuales decrecieron a medida que disminuyó el tiempo de exposición a la luz. *Recibido: 14 abril 2009, aceptado: 08 julio 2009.*

Palabras clave. Constante de desaparición de los coliformes fecales, tiempo de exposición a la luz, lagunas de maduración.

EFFECT OF EXPOSURE TIME TO LIGHT ON REMOVAL OF FECAL COLIFORMS

Abstract. We determined the mortality rate constant of fecal coliforms (K_b), for different exposure periods to light. Ten batch reactors, filled with effluent from a maturation pond, were placed under artificial light for 0, 10, 12, 14, and 24 h exposure times. fecal coliforms (FC), total nitrogen, nitrites, nitrates, ammonium, total phosphorus, COD, chlorophyll, pH, temperature and DO were determined. The K_b (day^{-1}) was 2.07 for zero hours, 2.97 for 10 h, 3.37 for 12 h, 4.48 for 14 h, and 5.09 for 24 h of light

exposure. Maximum removal (99.5%) occurred in the 24 h light exposure experiment, in presence of 10.84 mg/L DO and 8.67 pH. Minimum removal (85,62 %), in absence of light, was at 1.94 DO and 7.83 pH. We obtained a model that only depends on exposure time to light, pH, and DO: $K_b = 0,16568 \text{ (ETL)} + 0,29851 \text{ (pH)} - 0,11888 \text{ (DO)}$, and with $R^2 = 0,99$. This indicates that FC removal depends on ETL, pH and DO. Statistical analysis of FC removal (%), for each ETL, involved different variables, which decreased as exposure time to light decreased. *Received: 14 April 2009, accepted: 08 July 2009.*

Key words. Constant die-off of fecal coliforms, sunlight exposure time, maturation ponds.

INTRODUCCIÓN

El mecanismo de remoción de los coliformes se encuentra afectado por diferentes parámetros que han sido estudiados por varios investigadores. De acuerdo a Marais (1974), la constante de desaparición de los coliformes fecales (K_b) depende de la temperatura, mientras que Polprasert *et al.* (1983) considera que depende de la concentración de algas y la carga orgánica expresada como DQO. Otros autores como Sarikaya *et al.* (1987) consideran que la remoción de los coliformes fecales se encuentra afectada por la radiación de la luz solar, la atenuación de la luz y la profundidad de la laguna. Mayo (1989) esta de acuerdo con el último parámetro, considerando que la profundidad de la laguna limita la penetración de la luz solar.

En el diseño de lagunas de maduración la ecuación frecuentemente empleada para estimar K_b es la ecuación de Marais (1974), la cual solo depende de la temperatura, cuando existen otras variables que afectan este parámetro, trayendo como consecuencia disparidad entre K_b calculada y K_b experimental (Zambrano 2007, Galán 2008, Fernández 2009). Por otra parte, los modelos hidráulicos como mezcla completa, flujo pistón y flujo disperso involucran la constante mencionada, siendo el flujo pistón el más apropiado para la remoción de bacterias (Kilani y Ogunrombi 1984, Mutamara y Puetpaiboon 1997, Lloyd *et al.* 2002, Bracho *et al.* 2006, Bracho *et al.* 2009), debido a que el flujo se mueve a la misma velocidad y todas las partículas de agua tienen la misma oportunidad de recibir la luz, mientras que en mezcla completa y flujo disperso, existen porciones de agua que viajan más rápido a la velocidad promedio en la laguna ó reactor, trayendo como consecuencia que no reciban el mismo tiempo de exposición a la luz y por ende la misma desinfección natural (Bracho y Casler 2008). Por otra parte la luz solar es la fuente de energía que genera el proceso de fotosíntesis, el cual aporta el oxígeno al agua en lagunas de estabilización, incrementado el pH durante el día a valores por encima de 9

(Curtis 1990, Bracho *et al.* 1995), siendo este pH letal para los coliformes. Sin embargo, para otras condiciones de operación dadas en una laguna de maduración ubicada posterior a un tratamiento biológico convencional, operando a una temperatura máxima 19 °C, período de retención menor a los dos días, pH de 7,67, OD de 7,69, turbidez de 1 NTU y 17 h de exposición a la luz, se obtuvo una remoción de CF de 99,84% (Bracho *et al.* 2006), es decir que existe un mecanismo distinto para la remoción de los CF al propuesto por Curtis (1990).

Es evidente que K_b se encuentra afectado por varios factores y no sólo la temperatura como cita Marais (1974). Por tal razón, es importante investigar que otras variables afectan la desaparición de los coliformes. Para ello, es importante conservar la intensidad de luz constante en condiciones controladas de laboratorio y modificar la actividad fotosintética, variando el tiempo de exposición a la luz en el cual se van a generar diferentes pH, OD y otros parámetros que puedan intervenir en el mecanismo de remoción de los coliformes. Está investigación tiene como objetivo determinar el efecto del tiempo de exposición a la luz sobre la desaparición de coliformes fecales en aguas residuales provenientes de una laguna facultativa.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para determinar la influencia del tiempo de exposición a la luz sobre la desaparición de los coliformes fecales (CF), se realizó un estudio a escala de laboratorio. El mismo consistió en colocar diez reactores por carga de 20 L de capacidad para cinco períodos de exposición, es decir, cada ensayo por duplicado (Fig. 1). Se utilizó el efluente proveniente de la laguna facultativa, el cual es el afluente de la laguna de maduración (C_2) de la serie "C" del sistema de lagunas de estabilización de la Universidad del Zulia, Maracaibo, para alimentar 10 reactores por carga, colocados bajo luz artificial con los siguientes TEL: 0 h, 10 h, 12 h, 14 h y 24 h. En la parte superior de cada reactor se colocó iluminación artificial (lámpara fluorescente de 4 tubos de 40 watts cada uno), la cual fue controlada automáticamente con un regulador, a manera de establecer los períodos de exposición de 24 h, 14 h, 12 h, 10 h y 0 h (ausencia de luz) en cada reactor. Para la ausencia de luz se envolvió el reactor con bolsas plásticas negras.

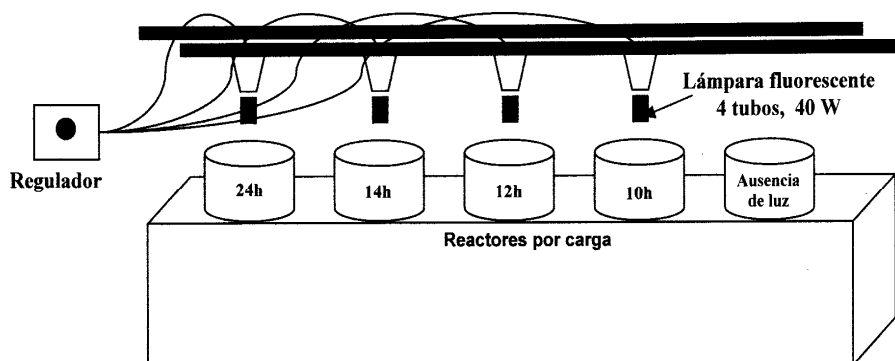


Figura 1. Reactores por carga con lámparas fluorescente para diferentes tiempos de exposición a la luz.

Una vez puesto en marcha el experimento, se captó una muestra diaria de cada reactor por un período de seis días consecutivos, es decir, un total de diez muestras diarias. Las muestras se tomaron en envases de vidrio esterilizados de 500 ml y se identificaron. Posteriormente, se determinaron por triplicado los parámetros de CF (filtración por membrana según Ayres y Mara 1996), nitrógeno total Kjeldahl (Semi-micro Kjeldahl), nitritos y nitratos (colorimétrico), nitrógeno amoniacal (distilación), fósforo total (digestión con Persulfato de Potasio y el método colorimétrico Molibdo vanadato), DQO (colorimétrico de reflujo cerrado), clorofila (extracción con metanol al 90%), pH (pH-metro marca Corning modelo 12), y Temp. y OD (por equipos portátiles marca YSI modelo 57), según lo descrito en la metodología de APHA (1998). Los resultados se procesaron empleando el paquete estadístico Statistix versión 8.0. Se utilizó un análisis de regresión múltiple, con la finalidad de identificar los parámetros que influyen en la desaparición de los CF para cada periodo de exposición a la luz.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 2, se presenta la mortalidad de los CF durante el tiempo de evaluación, se puede observar que a mayor tiempo de exposición a la luz, mayor es la mortalidad de las bacterias. La máxima remoción de CF fue de 99,50% (Tabla 1), la cual ocurrió para el tiempo de exposición a 24 h de luz, con una temperatura promedio de 25,84 °C, y valores promedio de pH y OD de 8,68 y 10,84 mg/L respectivamente, adecuados para la mortalidad de las bacterias (Curtis 1992a, b). También, se observa en la Tabla 1 que a medida

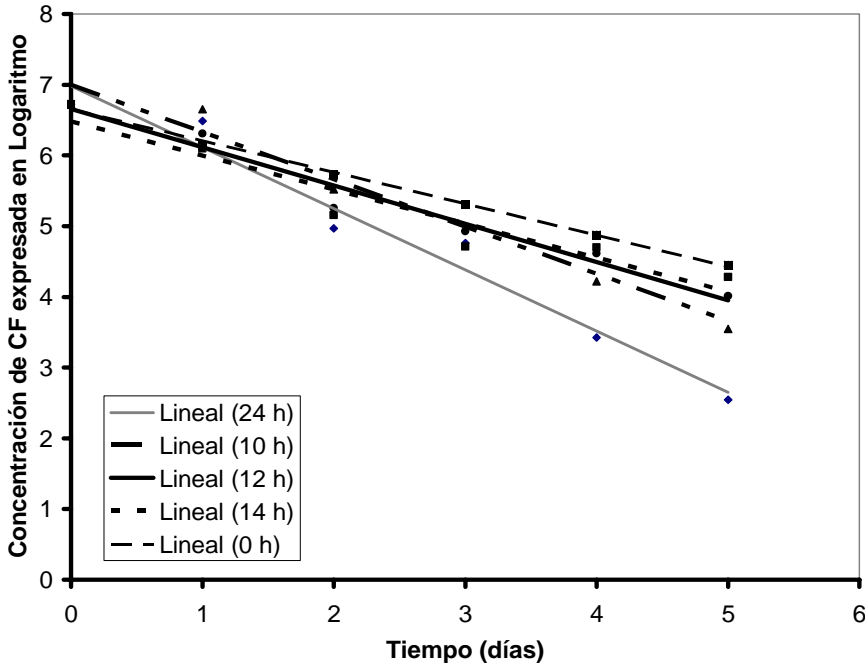


Figura 2. Concentración de coliformes fecales para diferentes tiempos de exposición a la luz.

que el período de exposición a la luz disminuyó, el OD se reduce, así como el pH, la temperatura y por ende la remoción de los CF. En los casos de 10 h y 12 h de luz, ocurrió una variación mínima en el pH y OD, resultando para ambos casos una eficiencia de 98,10%, con una diferencia de temperatura entre ambos experimentos de 1,43 °C (Tabla 1).

La remoción de los CF puede estar afectada por la concentración de OD y quizás por el pH y no por la variación de la temperatura. Esto puede apreciarse, al comparar el reactor en ausencia de luz con el reactor de 10 h de exposición, entre los cuales se generó una diferencia de temperatura de 1,57 °C, similar al registrado entre 10 h y 12 h de luz 1,43 °C. El OD promedio en ausencia de luz, fue de 1,94 mg/L, mientras que para el reactor de 10 h se registró 3,76 veces mayor, es decir, 7,30 mg/L. Esto indica que el mecanismo que está actuando sobre la desaparición de los CF es el de foto-oxidación citado por Curtis (1992a, b), al descender bruscamente el oxígeno, la remoción desciende de 98,10% a 85,62% es decir 12,48% menor, como consecuencia de la poca disponibilidad de oxígeno para que ocurra la foto-oxidación de las bacterias.

Tabla 1. Parámetros evaluados a diferentes periodos de exposición a la luz en los reactores por carga.

Parámetro	Tiempo de Exposición a la Luz				
	24 h	14 h	12 h	10 h	Ausencia de Luz
K_b (d^{-1})	5,09	4,48	3,37	2,97	2,07
pH	8,68	8,36	8,26	8,24	7,83
Oxígeno Disuelto (OD) (mg/L)	10,84	8,23	7,54	7,30	1,94
Temperatura ($^{\circ}C$)	25,84	25,70	25,60	24,17	22,60
Remoción Coliformes Fecales (CF) (%)	99,50	98,50	98,10	98,10	85,62
Demanda Química de Oxígeno (DQO) (mg/L)	281,52	271,94	221,03	163,39	24,84
Nitrógeno Total (mg/L)	42,24	19,49	13,26	13,12	2,38
Fósforo Total (mg/L)	2,51	2,45	2,31	2,31	0,01
Clorofila (mg/m^3)	409,50	407,72	375,50	345,32	0,00

Se realizó un análisis de regresión múltiple de K_b vs. clorofila, nitrógeno amoniacal, fósforo total, DQO, pH, T, y OD, con la finalidad de identificar cuales de ellos afecta la desaparición de los CF. Para este caso, se obtuvo la ecuación 1, con un $R^2 = 0,99$, lo cual indica que los parámetros que afectan a K_b son el pH, OD y TEL.

$$K_b = 0,16568 (\text{TEL}) + 0,29851 (\text{pH}) - 0,11888 (\text{OD}) \quad (1)$$

De acuerdo a Marais (1974), la constante de desaparición de los coliformes fecales (K_b) depende de la temperatura. Sin embargo, investigaciones dirigidas por Lian *et al.* (1998) señalan que la eficiencia en la remoción de los CF aumenta con la radiación solar, mientras que Curtis (1990) y Curtis y Mara (1994) indican que estos se ven afectado, por la luz en presencia de alta concentración de OD y pH mayor a 9. Los resultados de esta investigación coinciden con los parámetros señalados por Curtis (1990) y coincide con lo reportado por (Davis-Colley *et al.* 1999, Bitton 1999) quienes señalan que la inactivación de las bacterias expuestas a la luz solar es más rápida que en la oscuridad (Tabla 2). Esto es consistente con lo citado por Bracho (2003) y Bracho y Casler (2008) que a medida que la exposición a la luz solar aumenta la remoción de los CF es mayor, tal como ocurrió en esta investigación.

Tabla 2. Efecto de la luz solar sobre la rata de decaimiento de *Echerichia coli* en laguna de estabilización.

Tipo de Agua	Condiciones de Exposición	K_b (hr ⁻¹)
Agua Cruda	Luz	0.051
	Oscuridad	0.021
Efluente de Laguna Facultativa	Luz	0.070
	Oscuridad	0.020
Efluente de Laguna de Maduración	Luz	0.093
	Oscuridad	0.024

Tiempo de retención total en las dos lagunas: 16 días. Original adaptado de Oufdou (1994). Fuente: Bitton (1999).

Sin embargo, para cada reactor se realizó una regresión múltiple entre la remoción de CF vs. clorofila, nitrógeno amoniacal, fósforo total, DQO, pH, T y OD, obteniendo un modelo para cada TEL (Tabla 3). Se puede observar que a medida que el tiempo de exposición a la luz decrece, también disminuye el número de variables que intervienen en la ecuación, por ejemplo en ausencia de luz, sólo interviene la temperatura, la cual afecta directamente la desaparición de las bacterias, puesto que la concentración disponible de clorofila es cero (Tabla 1), pero en presencia de luz se introduce el proceso de fotosíntesis, se generan algas en el sistema las cuales demandan DQO y se incrementa la clorofila (Tabla 1 y 3).

Tabla 3. Modelos de remoción de coliformes fecales para cada tiempo de exposición a la luz.

Tiempo de Exposición (Horas)	Modelo	R^2
24	$CF (\%) = -0,24534 (DQO) + 17,5048 (FT) + 5, 53998 (NH_4)$	0,93
14	$CF (\%) = -0,6785 (NH_4) + 16,4756 (FT)$	0,89
12	$CF (\%) = 0,1175 (Clorofila)$	0,88
10	$CF (\%) = -241,5355 -0,0623(DQO) + 12,1034 (T)$	0,97
0	$CF (\%) = -280,1798 + 13,5660 (T)$	0,96

FT = Fósforo total (mg/L), NH_4 = Nitrógeno amoniacal (mg/L), DQO = demanda química de Oxígeno (mg/L), Clorofila (mg/m³). R^2 = ajuste de un modelo lineal.

Es importante mencionar que esta investigación fue desarrollada con una intensidad de luz constante, mientras que a escala real existen cambios naturales en la intensidad de luz, que juegan un papel importante en la remoción de bacterias (Bracho 2003).

CONCLUSIONES

En esta investigación se demostró que K_b , depende linealmente del tiempo de exposición a la luz, pH y OD, ocurriendo la desaparición de las bacterias por foto-oxidación, como mecanismo principal, siendo insignificante la variación de temperatura.

El mecanismo de remoción de los coliformes fecales varía, en cada reactor para los diferentes TEL, observándose que a medida que el tiempo de exposición a la luz decrece, el número de variables que intervienen en la ecuación disminuye, como consecuencia del aporte de clorofila, que indica la presencia de algas que demandan DQO, lo cual no ocurre en ausencia de luz.

LITERATURA CITADA

- (APHA-AWWA-WEF) AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION - WATER ENVIRONMENT FEDERATION. 1998. Standard methods for the examination of water and wastewater (20 ed.). American Public Health Association, Washington, D.C., USA.
- AYRES, R. M. Y D. D. MARA. 1996. Analysis of wastewater for use in agriculture: A laboratory manual of parasitological and bacteriological Techniques. WHO, Geneva, Switzerland, 36 pp.
- BITTON, G. 1999. Wastewater microbiology (2 ed.). Wiley and Sons, Inc., New York USA.
- BRACHO, N. R. 2003. Optimisation of faecal coliform removal performance in three tertiary maturation ponds. PhD thesis, University of Surrey, Guilford, UK, 273 pp.
- BRACHO, N. R. Y C. L. CASLER. 2008. Improving fecal coliform removal in maturation ponds, Chapter 7. Pp. 203–221, *en* M. B. King (ed.), Progress in environmental microbiology. Nova Science Publisher, Inc., New York, NY, USA.
- BRACHO, N. R., B. LOYD Y G. ALDANA. 2006a. Optimisation of hydraulic performance to maximize faecal coliform removal in maturation ponds. Water Research 40(8): 1677–1685.
- BRACHO, N. R., B. LOYD Y G. ALDANA. 2006b. Rehabilitación de una laguna de maduración utilizando baffles. Ciencia 14 (Número Especial): 309–319.
- BRACHO, N. R., C. GARCIA, G. ALDANA Y T. PERRUOLO. 1995. Applying bod removal models in stabilization ponds. Revista Tecnica de Ingenieria, Universidad del Zulia 18(3):355–362.
- BRACHO, N., F. BRISSAUD, J. L. VASEL Y G. ALDANA. 2009. Pond hydraulics and modeling. Round-table. 8th International IWA Specialist Conference on Waste

- Stabilisation Ponds, May 26 to 30, Belo Horizonte, Brasil. (Memoria electronica sin pp.).
- CURTIS, T. P. 1990. Mechanisms of removal of faecal coliforms from waste stabilisation ponds. PhD. Thesis, University of Leeds, Leeds, UK. 150 pp.
- CURTIS, T. P. Y D. D. MARA. 1994. The effect of sunlight mechanisms for the die-off faecal coliform bacteria in waste stabilisation ponds. Research Monographs in Tropical Public Health Engineering, No. 1, 93 pp.
- CURTIS, T. P., D. D. MARA Y S. A. SILVA. 1992a. Influence of pH, oxygen, and humic substances on ability of sunlight to damage faecal coliformes in waste stabilization ponds. Applied Environ. Microbiology 58(4): 1335–1343.
- CURTIS, T. P., D. D. MARA Y S. A. SILVA. 1992b. The effect of sunlight on faecal coliformes in ponds: Implications for research and design. Water Science and Technology 26(7–8): 1729–1738.
- DAVIES-COLLEY, R. J., M. DONNISON, D. SPEED, C. ROSS Y J. NAGELS. 1999. Inactivation of faecal indicator micro-organisms in waste stabilisation ponds: Interactions of environmental factors with sunlight. Water Research 33(5): 1220–1230.
- FERNÁNDEZ, P. V. 2009. Parámetros de diseño de un sistema de lagunas de estabilización para tratar afluentes combinados. Tesis de Maestría, Centro de Investigación del Agua, Facultad de Ingeniería, Postgrado de Ingeniería Ambiental, Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela, 190 pp.
- GALÁN, D. 2008. Evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales industriales de la empresa Criadores Avícolas del Zulia, C.A. Tesis de Maestría, Centro de Investigación del Agua, Facultad de Ingeniería, Postgrado de Ingeniería Ambiental, Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela, 80 pp.
- KILANI, J. S. Y J. A. OGUNROMBI. 1984. Effects of baffles on the performance of model waste stabilization ponds. Water Research 18(8): 941–944.
- LIAN, Y., R. Y. CHEUNG, S. EVERITT Y H. WONG. 1998. Reclamation of wastewater for polyculture of freshwater fish: Wastewater treatment in ponds. Water Research 32(6): 1864–1880.
- LLOYD, B., C. VORKAS Y K. GUGANESHARAJAH. 2002. Reducing hydraulic short-circuiting in maturation ponds to maximize pathogen removal using channels and wind breaks. 5th International IWA Specialist Conference on Waste Stabilisation Ponds, New Zealand, Vol. 2, pp. 445–458.
- MARAI, G. V. R. 1974. Faecal bacterial kinetics in stabilisation ponds. J. Environ. Eng. Div. ASCE 100(EE1): 119–139.
- MAYO, A. 1989. Effect of pond depth on bacterial mortality rate. J. Environ. Eng. 115(5): 964–977.
- MUTTAMARA, S. Y U. PUETPAIBOON. 1997. Roles of baffles in waste stabilization ponds. Water Science and Technology 35(8): 275–284.
- POLPRASERT, C., M. G. DISSANAYAKE Y N. THANH. 1983. Bacterial die-off kinetics in waste stabilisation ponds. Water Pollution Control Federation 55(3): 285–296.
- SARIKAYA, H. Z., A. M. SAATCI Y A. F. ABDULFATTAH. 1987. Effect of pond depth bacterial die-off. J. Environ. Eng. 113(6): 1350–1361.

ZAMBRANO, C. V. 2007. Determinación de las constantes cinéticas del sistema de lagunas de estabilización de LUZ. Tesis de Maestría, Centro de Investigación del Agua, Facultad de Ingeniería, Postgrado de Ingeniería Química, Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela, 100 pp.