

ISSN: 2343 - 6360 / Depósito legal: ppi 201402ZU4464

Nº 9 Junio - Diciembre 2015

Revista Tecnocientífica URU



Universidad **R**afael **U**rdaneta

Revista Tecnocientífica URU

ISSN: 2343 - 6360 / Depósito legal: ppi 201402ZU4464

2015© Fondo Editorial Biblioteca Universidad Rafael Urdaneta
Facultad de Ingeniería
Maracaibo, Venezuela

Coordinación editorial: Lcda. Hosglas Sanchez
Portada: Lcda. Luz Elena Hernández
Diseño y maquetación: Thajía Di Gaetano

SE ACEPTAN CANJES

Se prohíbe la reproducción total o parcial de esta revista en cualquier forma, sin la autorización de los editores.



Revista Tecnocientífica URU

ISSN: 2343 - 6360 / Depósito legal: ppi 201402ZU4464

Comité Editorial

Profesor Alfredo Villalobos
Profesos Edixon Gutiérrez
Profesor Luis Rojas
Profesor Cezar García
Profesor Sergio de Pool

Profesor Jubert Pérez
Profesora Jhanna Brieva
Profesora Russet Riquelme
Profesora Jenny Márquez

Profesora Susana Salinas
Editora - Jefe

Br. María Daniela Uzcátegui
Asistente Editorial

Comité de Asesores

MSc. Oscar Urdaneta (Venezuela)
Dr. Shyam Kalla (India)
Dr. Cezar García (Venezuela)
Dr. José Sarabia (Venezuela)
Dr. José Rincón (Venezuela)
MSc. Zulay Mármol (Venezuela)
Dra. Cateryna Aiello (Venezuela)
Dra. Elba Michelena (Panamá)
Dr. Rafael Aracil (España)
MSc. Salvador Conde (Venezuela)
Dr. Ever Morales (Ecuador)
Dra. Nola Fernández (Venezuela)
Dr. Helí Lugo (Venezuela)
Dr. Ras Patnaik (Estados Unidos)
Dr. Gerardo Aldana (Venezuela)

Dra. Anali Machado (Canadá)
MSc. Ramón Cárdenas (Venezuela)
Dr. Maulio Rodríguez (Venezuela)
Dr. Katsuyuki Nishimoto (Japón)
Dr. Jorge Sánchez (Venezuela)
Dra. Yaxcelys Caldera (Venezuela)
Dra. Oladis de Rincón (Venezuela)
Dr. Nelson Márquez (Venezuela)
Dr. Ramón Cova (Canadá)
Dr. Mourad E.H. Ismail (Estados Unidos)
Dra. Marinela Colina (Venezuela)
Dr. Freddy Isambert (Venezuela)
Dr. Miguel Sánchez (Venezuela)
Dr. Jorge Barrientos (Venezuela)
Dr. Ernesto Cornieles (Venezuela)

Revista Tecnocientífica URU es un instrumento de divulgación científica adscrito a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Rafael Urdaneta, Maracaibo, Venezuela. Es una revista arbitrada con periodicidad semestral, contentiva de artículos científicos originales no publicados en las áreas de Ingeniería y Arquitectura y otras disciplinas directamente relacionadas con éstas, de autoría individual o colectiva, que cumplan con las normas de publicación.

La correspondencia debe ser enviada a: Editor Jefe, ***Revista Tecnocientífica URU***.

Dirección: Universidad Rafael Urdaneta, Av. 2 c/Calle 86, entrada Sur del Parque Vereda del Lago, Maracaibo, Venezuela.
Teléf. (58) (261) - 2000887, Fax (58)(261) 2000868. Correo electrónico: revistatecnocientificauru@gmail.com

La Revista Tenocientífica URU está indizada en el Índice y Biblioteca Electrónica de Revistas Venezolanas de Ciencia y Tecnología REVENCYT (Código RVR-070).

Universidad Rafael Urdaneta

Dr. Jesús Esparza Bracho, Rector
Ing. Maulio Rodríguez, Vicerrector Académico
Ing. Salvador Conde, Secretario

Ing. Oscar Urdaneta
Decano de la Facultad de Ingeniería

Ing. Rómulo Rincón
Decano (E) de la Facultad de Ciencias Agropecuarias

Ing. Jubert Pérez Zabala
Director de la Escuela de Ingeniería en Computación

Ing. Nancy Urdaneta
Directora de la Escuela de Ingeniería Civil

Ing. Arnaldo Largo
Director de la Escuela de Ingeniería Eléctrica

Ing. Nelson Molero
Director de la Escuela de Ingeniería Química

Ing. Ana Irene Rivas
Directora de la Escuela de Ingeniería Industrial

Ing. Carlos Belinskif
Director de la Escuela de Ingeniería en Telecomunicaciones

Arq. Carlos Aguilar
Director de la Escuela de Arquitectura

Contenido

Presentación Presentation	9
Onda de propagación TE en una microcinta abierta con dos dieléctricos TE propagation wave in an open microstrip with two dielectrics <i>Augusto Galo.</i>	11
Lixiviación diferenciada de metales mayoritarios de cenizas volantes. Differentiated leaching of majoritarian metales from fly ash <i>Juan Hernández, José González, Gabriela Carruyo y Cezar García.</i>	19
Control y telemanipulación a distancia de un sistema multivariable. Control and remote accessing of a multivariable system <i>Ernesto Corneiles, German Gutiérrez y Jacobo Ramírez.</i>	33
Aprendizaje constructivista para el análisis de estructuras mediante el uso de un entorno virtual. Constructivist learning for the analysis of structures by using a virtual environmental. <i>Evelyn Marín</i>	41
Análisis de la emisión y dispersión del dióxido de nitrógeno en un sector de alto flujo vehicular. Analysis of the emission and dispersion of nitrogen dioxide in areas of high vehicular traffic. <i>Alberto Córdova, Anali Machado, Neyma Garcia, Gilberto Colina y Cezar García.</i>	51
Teorema para la función de Bessel generalizada que involucran polinomios de Hermite. Theorems for the generalized Bessel function that involving Hermite polynomials. <i>Josefina Matera, Ana Isolina Prieto, Leda Galué y Susana Salinas de Romero.</i>	61
Aporte nutricional de un biosólido avícola obtenido en un proceso de digestión aerobia sobre un cultivo de cebollín. Nutritional contribution of a poultry biosolids obtained in a process of aerobic digestion on the growing of green onion. <i>Leopoldo Ruesga, María Ocando, Miguel López, Enyris Gutiérrez, Yaxcelys Caldera y Edixon Gutiérrez.</i>	71
Opuntia ficus-indica y Opuntia wentiana: estudio comparativo sobre su efectividad como coagulantes en la clarificación del agua. Opuntia ficus-indica and Opuntia wentiana: comparative study on its effectiveness as a coagulant in water clasification. <i>Yolis González, Lorena Fuentes, Ivana Mendoza y Yaxcelys Caldera.</i>	81

Índice acumulado	91
Normas para la presentación de artículos	99
Guides for submitting articles	103

Presentación

El investigador y su buena conducta ética

“Solo es útil el conocimiento que nos hace mejores”
Sócrates (470-339 A.C.)

Quienes trabajamos con investigación, sabemos que el proceso de producir conocimiento exterioriza la esencia moral del investigador, puesto que, muestra sus capacidades cognitivas, sus cualidades, sus infortunios y sus esperanzas; en otras palabras, generar este bien intangible pone de manifiesto el ser interior del sujeto y la buena conducta ética que debe poseer una investigación; tales como la honestidad, la originalidad, y la responsabilidad social.

No hay duda, que las buenas conductas éticas de un investigador pueden dar origen a la formación de una sociedad sólida, basada en conocimiento auténtico y original. Además permite desarrollar una conciencia activa y madura capaz de resolver los problemas de las distintas esferas; por lo tanto, sus valores éticos deben ser evidenciados en todo el proceso de producción de conocimiento. Dicho en otras palabras, es importante enfatizar que las investigaciones se desarrollen en el marco de los más altos estándares éticos, ya que esto es lo que garantiza su utilidad y demuestra que el sujeto investigador ha pensado no solo en su beneficio personal sino también en los beneficios duraderos que proporciona a la colectividad.

En este orden de idea, es innegable el hecho de que un investigador ciertamente debe comprometerse en desprender los sentimientos de propiedad que tenga sobre el objeto de estudio, mantener una ideología abierta y plural a fin de encontrar “la piedra angular del conocimiento” Sagan (1997, p.26-27). Es sumamente necesario, que comprenda que los resultados son la base para el crecimiento y el progreso social, económico, político y cultural. Que su producción siempre debe girar en torno a la búsqueda exquisita de la verdad, es decir una verdad que se pueda comprobar, que esté muy lejos de ser pseudociencia, donde el objetivo sea resolver problemas convencionales y por ello le atañe preguntarse cómo garantizar que el proceso de producción de conocimiento sea auspiciado por conductas éticas positivas que garanticen el rigor científico, de manera que la comunidad científica pueda juzgar y criticar objetivamente el trabajo investigativo y sus resultados.

Finalmente, es importante resaltar, que la investigación no es solo un asunto que atañe al sujeto investigador sino a la sociedad en general, puesto que lo que se investiga permite generar acciones a favor de la resolución de muchos conflictos en la humanidad; y que por tal motivo el proceso de generar un conocimiento nuevo y auténtico puede conllevar a plantear grandes teorías que serán el insumo del mañana.

Lcda. Hosglas Sanchez
Subdirectora del Fondo Editorial Biblioteca
Universidad Rafael Urdaneta

Onda de propagación TE en una microcinta abierta con dos dieléctricos

Augusto Galo

Escuela de Ingeniería en Telecomunicaciones. Facultad de Ingeniería. Universidad Rafael Urdaneta.
Maracaibo, Venezuela. augusto.galo@hotmail.com

Recibido: 16-05-2014

Aceptado: 14-04-2015

Resumen

Se presenta en este trabajo el comportamiento dispersivo de una “microstrip-line” para la onda de propagación TE. En el pasado reciente fue posible estudiar, en el campo de la Teoría de Variable Compleja, las ondas de propagación LSE y LSM en forma separada. También se presenta aquí el modo principal y secundarios de la onda TE para el dispositivo. Se muestra la coincidencia entre los modos principales de las ondas TE y LSE. Esto es, para $n = 1$ la onda LSE coincide con el modo principal de la onda TE, lo cual está de acuerdo con lo que ocurre en las guías de onda metálicas clásicas. Encontramos la constante de fase $\beta(\omega)$ como una función de la frecuencia para todas las ondas antes mencionadas. Tal información se muestra en forma clara en gráficos, en los cuales se realizan comparaciones con anteriores resultados.

Palabras claves: Onda TE, microcinta abierta, dos dieléctricos.

TE propagation wave in an open microstrip with two dielectrics

Abstract

We present in this paper the dispersive behavior of a “microstrip-line” for the TE wave propagation. In the recent past it was possible to study in the field of complex variable theory, the propagating waves LSE and LSM separately. We also present here primary and secondary mode of the TE wave for the device. It shows the agreement between the main modes of TE waves and LSE. That is, for $n = 1$ the LSE match TE main wave, which agrees with what happens in the classic metallic waveguides. We found the phase constant $\beta(\omega)$ as a function of frequency for all the aforementioned waves. Such information is shown clearly in discussion of results, in which comparisons are made with other authors.

Key words: TE Wave open, microstrip, two dielectrics.

1. Introducción

La guía metálica clásica es un dispositivo de microondas (velocidades por encima de los mil millones de ciclos por segundo) que ha desaparecido en la construcción de los circuitos a estas frecuencias. La razón primordial de ello es el advenimiento de los dispositivos microcintas, los cuales presentan excelentes ventajas con las guías clásicas.

Se pueden enumerar algunas de las ventajas principales de la microcinta con respecto a la guía metálica: la microcinta presenta muy bajo peso, dimensiones y costo de fabricación y muy alta reproducibilidad de fabricación en grandes cantidades estandarizadas, con la moderna tecnología de fabricación planar. Además de lo anterior, la microcinta puede convertirse en un elemento radiador de muy pequeñas dimensiones. El cual es base para el uso en la antena plana, de gran interés en las últimas décadas con miles de trabajos publicados a nivel internacional, mientras que la guía clásica solo se conoce como radiador en su forma extendida como antena horn (cuerno) y piramidal, utilizables aún para casos de investigación.

Una vez que se conozca a futuro con gran precisión el modelado de las antenas planas con microcintas sería posible reemplazar la antena parabólica. De hecho ya existen tales antenas y radares bases con control de la constante de fase (en arreglo de fase) en la tecnología militar, pero aún no son atractivos para una comercialización doméstica por su tamaño, peso y costo. Es necesario miniaturizar tales antenas y construirlas en grandes cantidades estandarizadas para que sean asequibles al usuario común.

Los modelos que han estudiado la microcinta abierta hasta el presente muestran el comportamiento “quasi-static” (de aproximación estática) y dispersivo de esta [1-8]. Para ello han utilizado modelos semi-empíricos y computacionales. Denlinger [2] e Itoh y Mitra [3] utilizan el muy conocido método de Galerkin en el dominio espectral. Yuehe y Esselle[6], utilizan funciones de Green. Tsalamengas y Fikioris[7], utilizan el “método de momentos” o método MoM, pero sin la necesidad de la integración numérica en la ecuación integral que resulta al aplicar dicho método en su forma clásica. Yong , Ke-Li y Cheng [8] enfocan el problema utilizando el método de diferencias finitas en el dominio de la frecuencia. Los aportes de estos últimos autores [2-8] y la de muchos otros que no se mencionan aquí, algunos de la década de los noventa y de los años recientes son, básicamente, mejoras en el cálculo numérico del método de momentos y/o utilización de diferencias finitas, sin ofrecer una solución del tipo analítico.

2. Fundamentos teóricos

A. Historia del modelo matemático a seguir

Se resume aquí el modelo TRANSCOPE (Transformaciones Conformes Paredes Electromagnéticas), debido al autor, el cual utiliza las Transformaciones Schwarz-Christoffel y las fronteras eléctricas y magnéticas del problema.

Para el caso de la solución del campo estático [9-11] hemos enfocado el problema utilizando la transformación del plano físico Z (Figura 1) a un plano de transformación compleja P (Figura 2) mediante dos Transformaciones sucesivas Schwarz-Christoffel. Para el caso de onda completa [13,14] se han utilizado funciones potenciales vectoriales y “auto-funciones” para hallar la constante de fase y la constante dieléctrica efectiva en función de la frecuencia, en el plano de transformación P , para los modos LSM y LSE (Longitudinal Section Magnetic y Electric). En este mismo plano de transformación P y utilizando, ahora, funciones potenciales escalares, es posible encontrar la constante de fase, la constante dieléctrica efectiva y el campo EM, para la onda TE (Transverso Eléctrico) como una función de la frecuencia. Podemos, finalmente, comparar éstos parámetros con los encontrados antes para los modos LSM [12] y LSE [13].

En la bibliografía pertinente al modelado de la microcinta abierta, considerada como una guía de onda y mostrada en la Figura 1, no existe información clara respecto a los modos que se propagan en tales guías. Muchos autores suponen que los modos de propagación son “híbridos” TE-TM. Lo anterior significa que el dispositivo permite al mismo tiempo una onda de propagación de corriente (modo TE: Transverso Eléctrico) y una onda de voltaje (modo TM: Transverso Magnético).

Es cómodo suponer este “hibridaje” ya que el modelo de una LTPD (Línea de Transmisión utilizando el modelo de Parámetros Distribuidos) así lo muestra, pero es necesario recordar que dicho modelo es aplicable para un modo de propagación TEM (Transverso Eléctrico Magnético), cuando existe un solo dieléctrico entre los dos conductores de la microcinta, lo cual no es el caso en el problema que aquí se plantea en donde existen dos dieléctricos y el modo deja de ser TEM.

Esto no significa que no se pueda hacer una equivalencia entre los modos TE y TM y el modelo LTPD, siempre y cuando encontremos los parámetros de equivalencia entre estos modelos, lo cual constituye un problema difícil de solucionar. Esta equivalencia constituye algo buscado desde hace décadas por muchos investigadores, lo cual permitiría el tan deseado estudio de la microcinta con dos dieléctricos desde el punto de vista de un circuito clásico y, así mismo, un modelo de acople con la tecnología semi-conductora. Es obvio que un camino adicional para la anterior tarea es encontrar además las ecuaciones que rigen el comportamiento del modo TM.

En la microcinta abierta no ha sido posible definir matemáticamente con claridad dicho “hibridaje” ni tampoco, por consiguiente, el comportamiento con la frecuencia de las constantes de fase y del campo EM (Electro-Magnético). Al plantear la superposición de los modos TE y TM, logramos demostrar que existen dos soluciones independientes de éstos, esto es, existiría evidencia “matemática” de que dicho “hibridaje” no existe para el caso de que no consideremos la fuente alimentadora del dispositivo o que esta se encuentre en el infinito. Para el caso de considerar la fuente cerca al dispositivo microcinta existiría una dependencia lineal entre estos modos, tal dependencia o “hibridaje” se muestra en forma matemática a través de la fuente alimentadora.

Este es un concepto introducido aquí por primera vez y el cual no ha sido reportado por otros autores hasta el presente. Lo anterior está de acuerdo con lo esperado físicamente y más aun con la mediciones realizadas por otros autores. Allí, se muestran las condiciones que son necesarias para que exista “un acoplamiento” físico o “hibridaje” entre los dos modos. El presente trabajo busca dar un poco más de claridad en tal sentido, primero, al conocer el comportamiento dispersivo de tales dispositivos, como ya se ha hecho con anterioridad [12,13] y, segundo, al plantear y dar luz al problema de las ondas por separado en forma analítica.

Es bueno anotar el gran interés surgido en las cinco últimas décadas por el conocimiento del comportamiento de las microcintas en varias áreas de la tecnología, tales como: a) Circuitos para microondas y su uso en telecomunicaciones y computadoras de velocidades muy altas, en el rango de los GigaHertz (mil millones de ciclos por segundo) y aún de los TeraHertz (billones de ciclos por segundo). b) En la Nanotecnología (tecnología en el rango de dimensiones de milmillonésimas del metro). c) En la tecnología MEM (Micro Electromecánica) y NEM (Nano Electromecánica), estas últimas son de nuestro interés y buscamos hacer aportes en un futuro cercano. d) En la OE (Óptica Electrónica) y e) En la RA Definimos, en resumen, el modelo TRANSCOPE como un conjunto de reglas, ecuaciones y transformaciones en el campo de la Variable Compleja que permiten calcular, para una microcinta dada: a) Todos sus parámetros. b) Densidades de corrientes. c) Campos eléctrico y magnético. d) Pérdidas en los conductores y dieléctricos. e) Densidades de flujo de potencia. f) Ubicación óptima tanto de la fuente alimentadora como el equipo de medición. g) Condiciones óptimas de radiación y de acople con otras microcintas. h) Solución óptima al problema EMI (Electromagnetic Interference). Etc.

B. Ventajas de este Modelo con respecto a otros modelos

Se anotan aquí algunas de las ventajas inherentes al modelo TRANSCOPE, tales como: a) Se tiene en cuenta el “efecto pestaña” del campo EM (Electro-Magnético) en las microcintas desde el comienzo. b) Se obtiene una solución del tipo analítica, siendo ésta, quizás, la más importante de las ventajas. c) Se efectúa el cálculo de los modos en términos de funciones potenciales en el plano de transformación P. d) Se encuentra, por primera vez, las densidades de corrientes en la microcinta en forma analítica

en contraposición con otros modelos, en especial el Método de Galerkin o modelo MoM (Método de Momentos, el más utilizado a nivel mundial) en donde se suponen en forma aproximada y, mediante el cálculo matricial iterativo, se encuentra un acercamiento a tales densidades.

En este trabajo, una vez que se hayan planteado las ecuaciones generatrices o funciones potenciales escalares es posible encontrar: los campos EM, las frecuencias de corte, los modos de propagación, la constante de fase $\beta(\omega)$ o comportamiento dispersivo y la constante dieléctrica efectiva $\epsilon_{\text{ef}}(\omega)$, todo en forma analítica.

3. Procedimiento Matemático para la onda TE

En el modelado del modo TE, se utiliza la notación clásica de “onda h_z ” u onda con componente axial (dirección z) del campo Magnético. En la figura 2, la cual es una transformación del plano Z [9-12], se puede escribir una función potencial escalar para dicho modo, a diferencia de [12, 13] en donde se emplearon funciones potenciales vectoriales o Hertzianas.

El tipo de soluciones para las funciones potenciales escalares en ambas regiones son del tipo armónicas, esto es, $\cos(k_u u)$ y $\text{sen}(\alpha_{1,2} v)$, las cuales son funciones par en la variable u , e impar en la variable v , en forma respectiva.

La ecuación de onda de Helmholtz para la función potencial escalar es de la forma

$$\nabla^2 h_{zi}(u, v) + k_{ci}^2 h_{zi}(u, v) = 0 \quad (1)$$

con, $i = 1, 2$ y k_{ci} el número de onda característico para la región i

$$\begin{aligned} \sigma = \infty \quad ; \quad \epsilon_i(v) = \epsilon_R(v) - j \epsilon_I(v) = \epsilon_R(v) \\ k_{ci}^2 = k_i^2 + \Gamma^2 \quad ; \quad k_i^2 = \omega^2 \mu_o \epsilon_i(v) \quad ; \quad \Gamma = \alpha + j\beta \quad ; \quad \alpha = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

En donde, $\alpha = 0$ para el caso de ondas sin pérdidas conductoras y dieléctricas viajando en la dirección positiva de z.

Empleando condiciones de borde adecuadas en la solución de la ecuación de onda de Helmholtz, se encuentra que:

$$(3)$$

$$\text{con} \quad \begin{cases} A_n \cos(k_u u) \text{sen}(\alpha_1 v) e^{jz} \quad ; \quad 0 \leq F_{12}(u, v) \\ B_n \cos(k_u u) \text{sen}(\alpha_2 v) e^{jz} \quad ; \quad F_{12}(u, v) \leq v' \leq K' \end{cases}$$

$$v' = K' - v \quad ; \quad F_{12}[u(x, y), v(x, y)] \quad (4)$$

$$\beta^2 = \epsilon_r k_o^2 - \left[\alpha_1^2 + (n\pi/K)^2 \right] = k_o^2 - \left[\alpha_2^2 + (n\pi/K)^2 \right] \quad (5a)$$

$$\beta^2 = \epsilon_r k_o^2 - k_{c1}^2 = k_o^2 - k_{c2}^2 \quad (5b)$$

en donde, $F_{12}[u, v]$, de parámetros (m, φ) , es la integral elíptica incompleta de la primera ley y la cual separa los dos dieléctricos en el plano P.

K' , es la integral elíptica completa de la primera ley complementaria y $\text{sen}(k_u u)$, $\cos(k_u u)$,

$\sin(\alpha_i v)$ y $\cos(\alpha_i v)$ corresponden a las autofunciones para los medios 1,2 en el Plano-P de la figura 2. Además $u(x, y)$ y $v(x, y)$ son funciones de las variables originarias x, y en el Plano Z ó plano físico de la microcinta, figura 1 [9-11].

Los campos magnético y eléctrico pueden escribirse, en su forma fasorial, en términos de la función potencial escalar, como:

$$\vec{H}_{hi} = \left[-j \frac{\beta_i}{k_{ci}^2} \nabla_i h_z + h_z \hat{u}_z \right] e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (6a)$$

$$\vec{E}_{hi} = \left[-\frac{k_i}{\beta_i} Z \hat{u}_z \otimes \vec{h}_i \right] e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (6b)$$

Definimos los números de ondas característicos para las regiones 1 y 2 de la figura 2, respectivamente, como k_{c1} y k_{c2} .

Empleando (3) en (6a, 6b) y haciendo uso de las condiciones de continuidad de las componentes tangenciales del campo EM en la interfaz de los dos dieléctricos se puede encontrar la ecuación característica como:

$$\alpha_2 \tan[\alpha_1 F_{12}(u, v)] = -\alpha_1 \tan[\alpha_2 F_{21}(u, v)] \quad (7)$$

con $F_{12}(u, v)$ definida por el punto en donde la curva que separa los dos dieléctricos en el plano P intercepta el eje $u = K$ sumado con un factor de corrección debido a la zona dieléctrica que se encuentra por debajo de la curva y por encima de F_{12} . Además,

$$F_{21} = K' - F_{12} \quad (8)$$

La ecuación que relaciona a la constante dieléctrica efectiva $\epsilon_f(\omega)$ con la constante de fase $\beta(\omega)$ está dada en la forma clásica por:

$$\epsilon_{ef} = \left(\frac{\lambda_o}{\lambda_g} \right)^2 = \left(\frac{\beta(\omega)}{k_o} \right)^2 \quad (9)$$

en donde, λ_g es la longitud de onda de la guía.

4. Discusión de resultados

A. Análisis de los resultados matemáticos

Las ecuaciones (5) y (7) proveen la forma de encontrar las raíces que determinan el modo dominante y secundarios de la onda TE. Dicho de otra forma mediante ellas es posible determinar los valores de las diferentes raíces designadas como α_{1n} y α_{2n} para cada $n = 1, 2, 3, \dots$, en el autovalor $k_u = n\pi / K$.

Se puede decir que el valor de n determina a cada uno de los modos (n, α) , en donde $\alpha \equiv \alpha_{1n}, \alpha_{2n}$. Con lo anterior es posible encontrar, finalmente:

a) La constante de fase $\beta_{n,\alpha}(\omega)$, como una función de $n, \alpha_{1n}, \alpha_{2n}$ y ω , utilizando (5).

b) La constante dieléctrica efectiva $\epsilon_{ef}(\omega)$ con el empleo de (9). Así, por ejemplo, para el caso de que $n = 1$ se obtiene la primera solución de $TE_{1,\alpha_{11}}$ o modo principal de la onda h de la microcinta con dos dieléctricos.

B. Análisis de los resultados Numéricos

Para el caso de una impedancia característica de la microcinta de $Z_o = 124(\Omega)$ y una constante dieléctrica relativa $\epsilon_r = 11.7$ (safiro), encontramos una relación de perfil de $\frac{W}{h} = 1.0438$.

Los valores de los números de onda $\alpha_{1n} = \alpha_{11} = 2.56$ y $\alpha_{2n} = \alpha_{21} = 2.53$, dan como resultado una frecuencia de corte $f_{c,n=1,\alpha} = 4.47$ (GHz) para una $\beta_{n=1,\alpha}(\omega) = 0$ (Rad / m). La figura 3 muestra el comportamiento dispersivo a través de esta constante de fase para toda $\omega = 2\pi f$. Se puede observar que la fundamental de este modo está desplazada hacia la izquierda de la curva presentada en [13] para la fundamental del modo LSE, $n=1$, en donde encontramos: $f_{c,n=1,LSE} \approx 5.2$ (GHz), con una discrepancia del 14%. El valor encontrado para la frecuencia de corte del modo $TE_{1,\alpha}$ es exacto. Cuando se realiza una corrección en el cálculo numérico del modo LSE se obtiene una frecuencia de corte de $f_{c,n=1,LSE} = 4.47$ (GHz) coincidiendo con el modo TE.

Para el caso de $Z_o = 127.8(\Omega)$ y una constante dieléctrica relativa de $\epsilon_r = 1.1$ (cercana a la del vacío) y $W/h = 0.98$, la frecuencia de corte es $f_{c,n=1} \cong 15$ (GHz) para $n=1$ y de $f_{c,n=2} \cong 21$ (GHz) para $n=2$. Por tanto una frecuencia óptima, de operación y de medidas del dispositivo, debería ser de $f_{op} = 18$ (GHz), el promedio de estas dos frecuencias. Las mediciones reportadas por [14] son realizadas justamente a esta frecuencia de operación. Con ello se muestra que el modelo utilizado aquí predice con acierto no solo las frecuencias de corte del dispositivo de los modos TE y LSE, sino que también lo hace para el ancho de banda y la frecuencias de operación óptima y de medición.

No es posible realizar comparaciones entre los resultados del presente trabajo para modos secundarios $n=2,3,\dots$ y lo presentado por otros autores (salvo lo indicado antes para el caso de [14]), dado que estos modos secundarios no son posibles de obtener por otros modelos. Estos modos secundarios son reportados y posibles de calcular, por primera vez, siguiendo nuestro modelo TRANSCOPE.

5. Conclusiones

Para una guía de onda metálica clásica y para la microcinta no existe una demostración de coincidencia matemática conocida (al menos no por el autor) entre el modelo de función potencial Hertziana, para el modo LSE, esto es $\bar{\Pi}_h = \bar{u}_v \Phi_h(u,v) e^{-j\beta z}$ [13] y el modelo de funciones potenciales escalares que se presenta aquí, para el modo TE, esto es h_z . El teorema de unicidad de la ecuación de Laplace, para el caso estático de un solo dieléctrico, indica que la solución debería ser única. Extendido este teorema (no demostrado) a la ecuación de onda de Helmholtz, para el caso de dos dieléctricos, la solución también debería ser única. La única evidencia conocida de coincidencia al seguir uno u otro camino son los resultados numéricos mostrados en este trabajo. Esto es, no se conoce, hasta ahora, una demostración de coincidencia matemática pero si una numérica.

El comportamiento de la constante fase $\beta(\omega)$ (Rad / m) Vs. f (GHz), para los modos LSE y TE, indican una acertada similitud entre el dispositivo microcinta y una guía de onda clásica (metálica). Teniendo la salvedad de que el modo dominante en la microcinta es el modo TM o su equivalente LSM [15], en contraposición de lo que ocurre en una guía metálica clásica en donde, es bien conocido que, el modo dominante es el TE para el caso de un solo dieléctrico.

Observamos que el comportamiento dispersivo, tanto de β como de ϵ_{ef} , permiten conocer los campos EM utilizando (6) para el caso de cualquier n y $\alpha \equiv \alpha_{1n}, \alpha_{2n}$.

6. Agradecimientos

A la Escuela de Ingeniería en Telecomunicaciones de la Universidad Rafael Urdaneta, Maracaibo, Venezuela, por su apoyo en el presente trabajo de investigación.

7. Referencias bibliográficas

1. Assadurian F., Rimai E., Proc. of the IRE 40:1651-1657, 1952
2. Denlinger E.J., IEEE Trans. on MTT 19:30-39, 1971.
3. Itoh T., Mittra R., IEEE Trans. on MTT 21:496-498, 1973.
4. Edwards T.C., Owens R.R., "2-18 GHZ Dispersion Measurements on 10-100 Ohm Microstrip Line on Sapphire". IEEE Trans. on MTT 24:506-513, 1976.
5. Getsinger W. J., Trans. on MTT 21:34-39, 1973.
6. Yuehe Ge, Esselle K.P., IEEE Trans. on MTT 50:1556-1560, 2002.
7. Tsalamengas J.L., Fikioris G., IEEE Trans. on MTT 51:1729-1734, 2003.
8. Yong-Jiu Z., Ke-Li Wu, Cheng K., IEEE Trans. on MTT 50:1844-1848, 2002.
9. Galo A. Dispositivos de Microlíneas Planeres de Altas Frecuencias (M.Sc. Theses), Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, Los Teques, Estado Miranda (Venezuela).
10. Callarotti R., Galo A., IEEE Trans. on MTT 32:333-339, 1984.
11. Galo A., Revista Ciencia 1:93-104, 1993.
12. Galo A., Rev. TEC. Ing. Univ. Zulia 27(3):161-167, 2004.
13. Galo A., CIENCIA 12(4):290-297, 2004.
14. Schumacher, W., "Stromverteilung auf der grundfläche der mikrostrip leitung und deren auswirkung auf die ohmsche leitungsdampfung", AEÜ, band 33, pp. 207-212, 1979.

Figura 1. Corte transversal de una microcinta "típica" o "abierta" con dos conductores y dos dieléctricos.

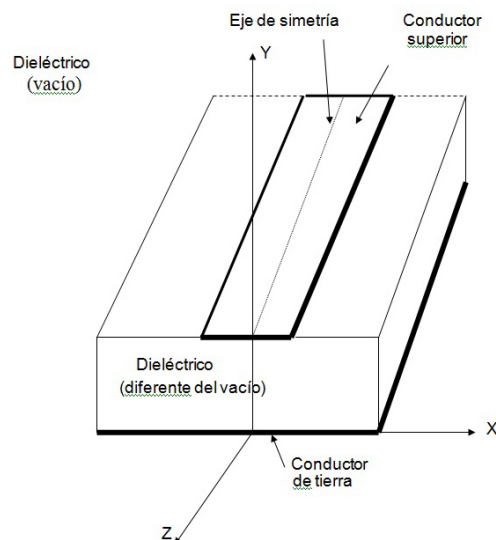


Figura 2. Transformación conforme entre: (a) el semiplano físico (z) de una microcinta y (b) el plano P de un condensador equivalente de placas paralelas.

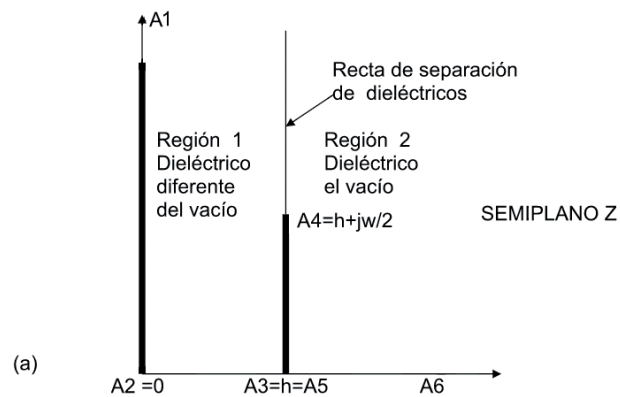
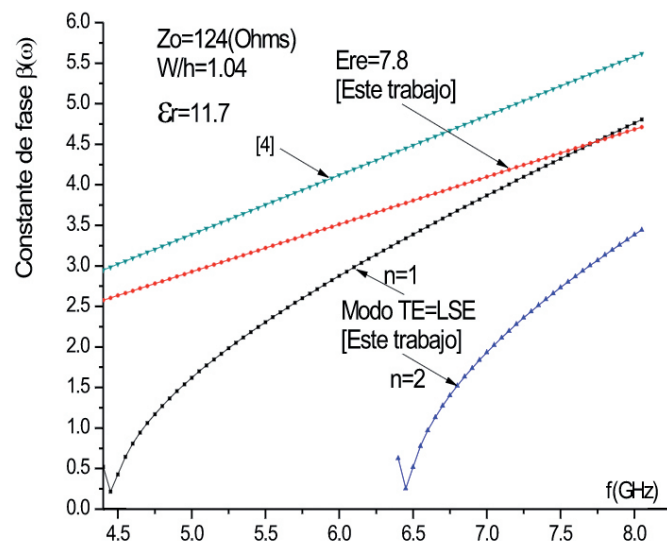


Figura 3: Constante de fase Vs frecuencia según Edwards and Owens [4] con $f_c=0.1(\text{GHz})$. sin frecuencia de corte y modo TE=LSE [Este trabajo] con $f_c=4.48(\text{GHz}, n=1)$ y $f_c=6.46(\text{GHz}, n=2)$



Lixiviación diferenciada de metales mayoritarios de cenizas volantes

Juan Hernandez¹, José Gonzalez¹, Gabriela Carruyo¹ y Cezar García².

¹Laboratorio de Carbón. Escuela de Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia.

² Escuela de Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería. Universidad Rafael Urdaneta. Maracaibo. Estado Zulia. Venezuela.

E-mail: juancho13_20@hotmail.com

Recibido: 24-02-2015 Aceptado: 12-05-2015

Resumen

El objetivo de esta investigación es evaluar la remoción de los metales mayoritarios de las cenizas volantes por lixiviación en procesos diferenciados por carga. El proceso de lixiviación de vanadio y níquel se lleva a cabo de forma diferenciada en ensayos por carga a las distintas condiciones de operación, cinco tamaños de partícula (+0.642, -0.642+0.5, -0.5+0.355, -0.355+0.3 y -0.3+0.125 mm), cinco tiempos de contacto (120, 150, 210, 240 y 300 min) y tres agentes lixiviantes (Agua, NaOH (2M) y HCl (2M)) a temperatura ambiente. Por medio de la data experimental obtenida se determina la cinética y el equilibrio del sistema, modelos matemáticos como el Modelo de Doble Resistencia y el Modelo de Fick, permiten determinar los mecanismos de transferencia de masa y la fase dominante. Con ayuda del programa Matlab se correlaciona el proceso de transferencia de masa en términos de coeficientes de transferencia y difusividades como función de las variables operacionales. Se determina una cinética del tipo exponencial característica de procesos con captación de soluto, los agentes lixiviantes utilizados son más afines a la extracción del vanadio, teniendo mejores rendimientos para las granulometrías de menor tamaño de partícula para ambos metales, el mejor agente lixiviante para níquel en este caso es el HCl y para vanadio el NaOH.

Palabras clave: Cenizas volantes, lixiviación diferenciada, remoción, agente lixiviante.

Differentiated leaching of fly ash majoritarian metals

Abstract

The main object of this investigation is to evaluate the removal of the majoritarian metals of flying ash by lixiviation in load differentiated processes. The vanadium and nickel leaching process are carried away in differentiated forms by trials per charge at different operating conditions, five particle sizes (+0.642, -0.642+0.5, -0.5+0.355, -0.355+0.3 and -0.3+0.125 mm), five contact times (120, 150, 210, 240 and 300 min) and three leaching agents (Water, NaOH (2M) and HCl (2M)) at room temperature. Using the gathered experimental data be able to determine the system's kinetics and balance. Mathematical models like the Dual Resistance Model and Fick's Model, allows to determine the Mass Transfer mechanisms and the dominant phase. With MatLab program's help to correlate the Mass Transfer process in terms of coefficients of transfer and diffusivity as a function of operational variables. A characteristic exponential kinetics of solute catchment is determined, the leaching agents used are more related to vanadium's extraction, achieving a better performance for both metals smaller size particles, in this case the better leaching agent for the nickel is the hydrochloric acid and for the vanadium is the sodium hydroxide.

Keywords: Fly ash, basic leaching, removal, leaching agent.

Introducción

La creciente necesidad de energía eléctrica ha fomentado el desarrollo tecnológico para poder satisfacerla, muchas veces sin darle importancia al impacto negativo que se produce sobre los distintos ecosistemas terrestres, incluyendo la salud de los seres humanos. Desde hace algunos años se viene incrementando la importancia de la protección ambiental a través de estudios que evitan o buscan remediar los impactos negativos producidos por las plantas generadoras de electricidad (Machado y col., 2010).

Una fuente importante de energía eléctrica para la ciudad de Maracaibo, Venezuela, es la planta termoeléctrica Ramón Laguna, la cual produce energía eléctrica a razón de 450 MW/h. En su proceso se consume como combustible el fueloil residual, más conocido como Bunker C, a razón de 60×106 l/mes, con una generación de cenizas o cenizas volantes de 200 m³ al año por caldera. El fueloil residual N° 6 satisface las exigencias de la norma Covenin N° 787 pero presenta valores extremos de 2,7-3% de azufre, 450 ppm de vanadio, 60 ppm de sodio, cenizas sulfatadas entre 0,1 y 0,25%, y viscosidad de 424 cp (González y col., 2004). Este combustible proveniente del petróleo contiene metales pesados que provocan impactos negativos a la salud de los seres vivos; tal es el caso del vanadio y el níquel, que en concentraciones elevadas provocan enfermedades respiratorias y de la piel principalmente (Machado y col., 2010).

Las cenizas volantes (fly ash) son difíciles de manejar y transportar debido a su pequeño tamaño de partícula, a su baja densidad y a la posibilidad de que pueda producirse una combustión espontánea. En Venezuela estas cenizas volantes son consideradas desecho peligroso (Gaceta, 1998), debido a su potencial de lixiviación y percolación (INZIT-CICASI, 1994).

El proceso más utilizado para la determinación de metales es la digestión húmeda con ácidos fuertes a altas temperaturas. Este proceso es muy agresivo y conlleva a cierta pérdida de la muestra, por lo tanto existe la necesidad de estudiar nuevos procesos de determinación y extracción de metales pesados que sean menos agresivos y no generen pérdidas de muestra y sean más rentables a nivel industrial (Machado y col., 2010).

Algunos metales pesados, tales como V y Ni tienen una gran importancia en el campo de la manufactura de aceros aleados, catalizadores, tintes y colorantes, medicina y en la química analítica. La recuperación de V y Ni a partir de las cenizas provenientes de la combustión del fueloil brindaría utilidad a un desecho industrial con posible rentabilidad, y disminuiría la posibilidad de contaminación que podría originar su acumulación (Ghan. 1965; Wick y col., 1987; Akita y col., 1995).

Por lo tanto las tres razones fundamentales que destacan el interés de la recuperación de metales de las cenizas volantes son primeramente, para la reducción de una fuente de polución, segundo el atractivo valor de los metales en el mercado y por último la posibilidad de reusar la ceniza dentro de los mismos procesos de producción (Jamal Stas y col., 2007).

Este trabajo tiene como objetivo investigar las condiciones óptimas para la recuperación de V y Ni mediante la lixiviación de cenizas volantes producidas en las plantas de energía eléctrica que utilizan petróleo pesado, que nos permitan obtener un mayor rendimiento y la mejor pureza del producto final. Es muy importante al momento de estudiar un proceso de separación como lo es la lixiviación, conocer bien a fondo los mecanismos de transferencia de masa, la cinética y el equilibrio del proceso, ya que esto nos ayudan a comprender su comportamiento (Jamal Stas y col., 2007).

La validación de los modelos matemáticos mediante el ajuste de los datos experimentales proporcionará una serie de ecuaciones matemáticas estrictamente necesarias para el diseño y control de las variables operacionales de estos procesos a escala industrial (Alaña y col., 2011). La investigación se realizó en el Laboratorio de Carbón de la Facultad de Ingeniería de La Universidad del Zulia, con muestras de cenizas volantes de la planta termoeléctrica Ramón Laguna, ubicada en el sector Haticos de Maracaibo. Estado Zulia.

Procedimiento Experimental

Extracción de metales de las muestras de cenizas volantes.

Para la realización de la extracción de metales de las muestras de cenizas volantes, mediante lixiviación básica, utilizando como agente lixivante NaOH a concentraciones de 2M. Se trabajó a temperatura ambiente aproximadamente de 23°C y presión atmosférica con las cinco granulometrías, muestra original, -0.642+0.5 mm, -0.5+0.355 mm, -0.355+0.3 mm y -0.3+0.125 mm. El procedimiento se ejecutó de la siguiente forma:

- Se pesó por triplicado 5 gr. de muestra de cenizas volantes a una granulometría específica, utilizando un beaker de 50ml de capacidad, en una balanza digital, marca OHAUS.
- Se midió 50 ml de solución lixivante según fue el caso de concentración a usar (2M) por triplicado, empleando cilindros graduados, marca PIREX de 50 ml. de capacidad.
- Se vertió cada muestra de ceniza y los 50ml del lixivante en Erlenmeyer diferentes cada uno de 250 ml. de capacidad, marca BOECO y KIMAX.
- Se agregó un imán a cada erlenmeyer con la mezcla y se colocaron en la plancha de agitación, marca CIMAREC, durante un periodo inicial de tiempo de 120min.
- Se filtró por gravedad cada muestra, utilizando un papel de filtro cualitativo marca Doble Rings de 12.5mm. de diámetro.
- Se almacenó las soluciones muestras filtradas en envases con capacidad de 60 ml. de PEBD y se identificaron con una etiqueta para su posterior análisis mediante espectrofotometría de absorción atómica con llama.
- Se procedió al secado de las muestras restantes en el papel de filtro utilizando una estufa a una temperatura máxima de 60°C por un periodo de tiempo no mayor a 30min.
- Luego esta muestra de ceniza libre de humedad se guardó en un recipiente hermético identificado, para repetir el ciclo con otros tiempos de contacto (30min, 60min, 30min y 60min).

El procedimiento se repitió de igual forma secuencialmente para todas las muestras con diferentes granulometrías (muestra original, -0.642+0.5 mm, -0.5+0.355 mm, -0.355+0.3 mm y -0.3+0.125 mm) a los distintos tiempos de contacto (120min, 30 min, 60min, 30min y 60min) con los diferentes agentes lixivantes.

Discusión y Resultados

1. Distribución granulométrica

Uno de los objetivos específicos de esta investigación es evaluar el efecto de las variables operacionales del sistema fluido-ceniza, entre ellos la granulometría de la muestra; es por ello que se realizó una distribución granulométrica de la muestra de cenizas volantes, llevando a cabo el tamizado mediante el uso de un electro-vibrador.

Se tamizó un total de 18734,13 g de la muestra de cenizas volantes a partir de la cual se obtuvo cinco sub-muestras con diferentes características granulométricas mostradas en la Tabla 7.

Tabla 1. Distribución granulométrica.

Muestra	Granulometría (mm)	Cantidad (g)	Porcentaje (%)
A	+ 0,642	9670,62	51,62
B	- 0,642 + 0,5	4101,29	21,89
C	- 0,5 + 0,355	2921,37	15,59
D	- 0,355 + 0,3	1307,98	6,98
E	- 0,3 + 0,125	732,87	3,91

En la tabla 7 se muestran las granulometrías obtenidas para cada una de las muestras, entre ellas la muestra A en la cual se encuentran los granos de mayor tamaño, estando por encima de los 0,642 mm y que representa un 51,6% de la muestra total, lo cual indica que las cenizas volantes que se generan como subproducto de la combustión del fuel oil en la planta termoeléctrica Ramón Laguna en su mayoría tienen una granulometría mayor a 0.642 mm. Por otra parte, se puede observar que a menor granulometría menor fue la cantidad registrada luego del tamizado, siendo la muestra D la de menor granulometría estando está por debajo de 0,3 mm y representando un 3,91% de la muestra total.

2. Cinética y Equilibrio

2.1. Níquel

De manera general la extracción de níquel aumenta a medida que se aumenta el tiempo de contacto, se puede ver que la mayor extracción de níquel lograda con este agente lixivante es para tamaños partículas de -0.642+0.5 mm, llegando a extraer 344.0821 mg/l de níquel, luego siguen en orden decreciente los tamaños de partículas +0.642 mm, -0.5+0.355 mm, -0.3+0.125 mm y por ultimo -0.355+0.3 mm, con una extracción para estas granulometrías de 318.6617, 271.3844, 35,8492 y 33.5366 mg/l, respectivamente. La mayor cantidad de níquel extraído para la granulometría de mayor tamaño se debe a que a mayores tamaños de partículas mayor es la cantidad de níquel inicial en la ceniza volante, se observa para la granulometría de -0.642+0.5 mm con respecto +0.642 mm, que a pesar de que la muestra de granulometría de +0.642 mm contiene mayor cantidad de níquel, la misma está compuesta de partículas irregulares muy grandes; en cambio, para la muestra de granulometría de -0.642+0.5 mm los tamaños de partícula son menores y más regulares, por lo tanto a menor tamaño de partícula mayor área superficial y mayor extracción. Para la muestra de granulometría -0.3+0.125 mm con respecto a la de -0.355+0.3 mm, también se observa en este caso que la cantidad de níquel en las mismas es muy similar y por lo tanto la mayor extracción se obtiene para la de menor tamaño de partícula por ser la de mayor área superficial. Lo anteriormente dicho no se cumple de forma regular debido a las altas diferencias de cantidad de níquel que existen entre los tamaños más grandes con respecto a los más pequeños. (Piña y col., 2004; Stas y col., 2006; Navarro y col., 2007)

Se puede ver en las figuras 1-2 que la cinética obtenida para la data experimental es del tipo exponencial, tanto para la fase líquida como para la fase sólida, comportamiento característico de procesos con captación de soluto (Perry Green, 2001). La cantidad de níquel extraída por la fase líquida va creciendo exponencialmente con el tiempo de contacto hasta alcanzar el equilibrio, en contraste la cantidad de níquel en la fase sólida va disminuyendo de forma exponencial hasta que se alcanza el equilibrio en esta fase. (Piña y col., 2004; Stas y col., 2006; Navarro y col., 2007; Rosas y col., 2009)

Los porcentajes de remoción de níquel para todas las granulometrías con agua como agente lixivante son relativamente bajos llegando a ser en el mejor de los casos un 42 %, estos porcentajes de extracción indican la moderada calidad del agua como extractor del níquel esto se debe a que el óxido de níquel forma como se encuentra el níquel en la ceniza es poco soluble en la misma. Si comparamos este resultado con los valores de recuperación obtenidos por Piña y col., 2004; Stas y col., 2006; Navarro y col., 2007; Rosas y col., 2009; Vitolo y col., 2001 son

menores ya que estos autores trabajan con medio ácido (ácido sulfúrico) para la extracción de níquel, el agua y el medio básico son selectivos para vanadio.

El equilibrio no fue alcanzado para ninguna de las fases, debido a que la metodología experimental utilizada no es un proceso continuo. Los resultados de concentración máxima de níquel extraído por el agente lixiviante fueron calculados haciendo el ajuste de los valores de las derivadas de la concentración en función del tiempo con respecto al tiempo de contacto con ayuda del programa curveExpert 1.4. Se determinó mediante el programa, el tiempo en que la variación de la concentración en función del tiempo se hace despreciable y luego se calcula la concentración de níquel a este tiempo. Los datos de reportados indican de manera general que los tiempos donde la variación en la concentración de níquel en función del tiempo para la fase líquida es despreciable esta entre 280 y 300 min, mientras que para la fase sólida están en el orden de los 400 min. Es decir la fase líquida (agua) en el mejor de los casos para una granulometría de $-0.642+0.5$ mm, es capaz de extraer una concentración máxima de 344.345 mg/l a un tiempo de 286.3680 min lo que representa 17.2172 mg de níquel, en cambio la fase sólida alcanza una concentración mínima de 5.6350 mg/g a un tiempo de 420,6530 min lo que representa 18.525 mg de níquel por cada gramo de ceniza; estos valores indican que cuando la fase líquida alcanza su máxima capacidad la fase sólida es capaz de ceder 1.3078 mg de níquel. Se necesitaría otra etapa de lixiviación diferenciada de aproximadamente 120 min para remover estos 1.3078 mg.

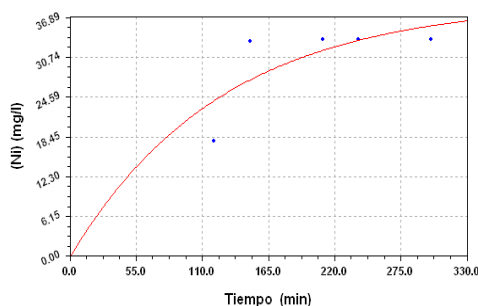


Figura 1. Cinética Fase Líquida

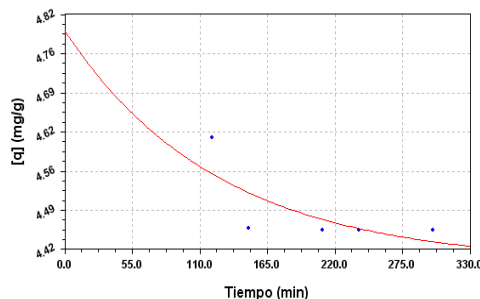


Figura 2. Cinética Fase Sólida

En este caso para solución acuosa de hidróxido sodio 2 M como agente lixiviante, el mismo comportamiento que para el agua: a medida que aumenta el tiempo de contacto aumenta la cantidad de metal extraído, sin embargo los valores de níquel removidos en cada etapa son muy bajos llegando a ser solo en el mejor de los casos 7.6780 mg/l para la fase líquida y 9.2632 mg/g para la sólida. Estos valores tan solo representan el 1.5 % aproximadamente de la cantidad de níquel presente en la ceniza.

Los resultados indican que solo la fase líquida y sólida son capaces de remover y ceder 0.384 mg de níquel, sin embargo la fase líquida se tarda en alcanzar su concentración máxima de extracción un tiempo 6426.19 min mientras que la sólida se tarda 541.43 min, es decir el agente lixiviante tarda en extraer la misma cantidad de níquel más de 10 veces el tiempo en que es capaz de cederlo la sólida. Con respecto a la variación de la concentración en función de la granulometría se obtiene el mismo comportamiento que para el agua, ya que los valores de las concentraciones extraídas son muy bajos y similares entre sí. (Piña y col., 2004; Stas y col., 2006; Navarro y col., 2007)

Similar al comportamiento del agua, que la cinética obtenida para la data experimental es del tipo exponencial, tanto para la fase líquida como para la fase sólida, comportamiento característico de procesos con captación de soluto (Perry Green, 2001). Se obtienen valores de extracción de níquel muy bajos comparados con los valores de recuperación obtenidos por Piña y col., 2004; Stas y col., 2006; Navarro y col., 2007; Rosas y col., 2009; Vitolo y col., 2001 son menores ya que estos autores trabajan con medio ácido para la extracción de níquel, el agua y el medio básico son selectivos para vanadio.

Con respecto al tiempo en que la variación de la concentración en función del tiempo se hace despreciable y se alcanza la mayor extracción posible de forma diferenciada, fue calculado al igual que en el caso anterior. Los valores reportados en las tablas anteriores en el mejor de los casos para tamaños de partículas de $-0.642+0.5$ mm el valor máximo de níquel que puede extraer el hidróxido de sodio es de 26.880 mg/l pero se necesitarían aproxi-

madamente 5 veces el tiempo utilizado en este trabajo (1596.87 min) para poder lograrlo, resultados que no sería factibles debido a que ya a un tiempo de 572.67 min la fase solida alcanza su mínima concentración de níquel durante este proceso de forma diferenciada a una concentración por gramo de ceniza de 9.2369 mg/g, para las demás granulometrías el comportamiento y los valores de concentraciones son similares, pero el tiempo en que se alcanza la concentración máxima en la fase liquida puede llegar a ser 20 veces el de la fase sólida.

En cualquier caso el proceso de lixiviación con hidróxido de sodio como agente lixivante no es un proceso rentable por la baja eficiencia del mismo y los altos tiempos de operación necesarios para obtener los mejores resultados. (Piña y col., 2004; Stas y col., 2006; Navarro y col., 2007; Rosas y col., 2009; Vitolo y col., 2001).

La lixiviación con solución acuosa de ácido clorhídrico 2 M presentan un comportamiento similar al de los casos anteriores para otros agentes lixiviantes: a medida que aumenta el tiempo de contacto aumenta la extracción del metal. En este caso la lixiviación con ácido clorhídrico dio mejores resultados que para la extracción con hidróxido de sodio, pero el agua sigue siendo más efectiva que el medio ácido y básico respectivamente. La mayor extracción de níquel con ácido clorhídrico fue de 163.2647 mg/l y se logro para una granulometría de +0.642 mm, luego le siguieron en orden de mayor extracción las granulometrías de mayor tamaño hasta las de menor tamaño de partícula, existiendo una desviación de este comportamiento para la granulometría -0.355+0.3 mm donde el valor fue superior al de la granulometría -0.5+0.355 mm, siendo sus valores de extracción 59.522 mg/l y 34.0925 mg/l respectivamente. Estos valores de extracción mayores para las granulometrías de mayor tamaño a pesar de tener menor área superficial se debe a lo anteriormente mencionado de que en estas granulometrías los valores de níquel son superiores al de las granulometrías de menor tamaño de partícula. El porcentaje de extracción de níquel con ácido clorhídrico en el mejor de los casos solo fue de un 13 %, valor que indica la mala eficiencia del ácido clorhídrico para la lixiviación de níquel. Comparando estos resultados con los obtenidos por otros autores donde la recuperación del níquel es mejor para el medio ácido, sin embargo no es tan bueno como el ácido sulfúrico. (Piña y col., 2004; Stas y col., 2006; Navarro y col., 2007; Rosas y col., 2009; Vitolo y col., 2001).

Estos porcentajes tan bajos para la extracción de níquel para cada uno de los agentes lixiviantes anteriormente estudiados se deben a la baja solubilidad del oxido de níquel en cada uno de ellos. El oxido de níquel es parcialmente soluble en medio neutro por esta razón los mejores rendimientos para la extracción con agua. (Piña y col., 2004; Stas y col., 2006; Navarro y col., 2007; Rosas y col., 2009; Vitolo y col., 2001). El comportamiento cinético mostrado en las figuras 22-31 es similar al de los dos lixiviantes anteriores.

Con respecto al equilibrio ambas fases tienen el mismo comportamiento alcanzando el equilibrio a tiempos similares. Para las granulometrías de mayor tamaño donde la cantidad de metal es superior, por ejemplo para la granulometría +0.642 mm los datos de equilibrio nos indican que si aumentamos el tiempo de contacto 10 veces el utilizado en esta investigación se puede aumentar el porcentaje de extracción hasta valores de un 77 % aproximadamente, para este caso la fase liquida podría extraer 51.984 mg de metal y la fase solida podría ceder 44.542 mg de níquel. Aumento del tiempo de contacto a valores tan altos implica también mayor cantidad del ácido para la renovación del lixivante, lo que representa altos costos de operación. Para las granulometrías de menor tamaño el equilibrio nos indica que el porcentaje de extracción no sobrepasaría el 13 % anteriormente mencionado.

2.2. Vanadio

Si comparamos los valores para la extracción de vanadio con agua con los reportados por Piña y col., 2004; Stas y col., 2006; Navarro y col., 2007; Rosas y col., 2009; Vitolo y col., 2001, los resultados en la mayorías de los casos son mejores en esta investigación esto se debe a que el proceso de forma diferenciada es mucho mas eficiente ya que no permite el agotamiento de la fase liquida. Para el agua como agente lixivante se observa que a medida que aumenta el tiempo de contacto la extracción de vanadio es mayor logrando extraer en el mejor de los casos hasta un 99.83 % del vanadio presente en la ceniza.

La mayor extracción de vanadio se dio para la granulometría -0.642+0.5 mm con una extracción por la fase liquida de 30923.3082 mg/l luego le siguen de mayor a menor las granulometrías de +0.642 mm, -0.5+0.355 mm, -0.355+0.3 mm y -0.3+0.125 mm con una extracción de 21608.8742 mg/l, 14548.2324 mg/l, 8532.2668 mg/l y 8877.0418 mg/l respectivamente. La extracción de metal se favorece a los tamaños de partículas menores debido a que a menor tamaño de partícula mayor área superficial y por lo tanto mayor extracción, este comportamiento lo podemos observar si comparamos la extracción de las granulometrías -0.642+0.5 mm con +0.642 mm, es mayor

la extracción para la primera debido a que la granulometría $+0.642$ mm son tamaños de partículas muy grandes e irregulares en cambio para la granulometría de $-0.642+0.5$ mm ya estos tamaños de partículas son de menor tamaño más regulares y por lo tanto tienen mayor área superficial y mayor extracción, también podemos observar este comportamiento si comparamos las granulometrías de $-0.355+0.3$ mm con $-0.3+0.125$ mm en este caso también la de mayor extracción es la granulometría de menor tamaño de partícula. No se puede comparar las granulometrías de mayor tamaño de partícula con las de menor ya que en las más grandes la cantidad de este metal existente en ellas es muy superior por lo tanto es mayor la cantidad de metal extraído. (Piña y col., 2004; Stas y col., 2006; Navarro y col., 2007; Rosas y col., 2009; Vitolo y col., 2001; Vitolo y col., 2000).

Es importante resaltar que para estas cenizas la cantidad de vanadio es superior a las obtenidas por autores anteriores llegando a ser hasta 10 veces la cantidad esto se debe a que las mismas son el residuo producto de la combustión de Bunker C última fracción en la refinación del petróleo, por lo tanto la composición del petróleo dependen de las características geoquímicas del mismo, como lo son materia orgánica (Tipo de Kerogeno que le dio origen), y las condiciones físicas y químicas que le dieron origen.

Con respecto al equilibrio al igual que para agua no se alcanza para ninguna de las fases por no ser un proceso continuo, podemos ver en los resultados reportados en las tablas siguientes que la fase líquida es capaz de extraer de forma diferenciada más del 98 % del vanadio presente en la ceniza, y que la fase sólida es capaz de cederlo, valores que son posibles de alcanzar con la adición de solo una etapa de lixiviación diferenciada durante un tiempo de 120 min. Los valores de concentración máxima obtenidos también reportan la selectividad del agua hacia la extracción del vanadio. De acuerdo a los valores de extracción máxima obtenidos por la extrapolación de la cinética experimental la fase líquida de forma diferenciada sería capaz de extraer más de la cantidad de vanadio presente en la ceniza por ejemplo para una granulometría de $-0.642+0.5$ mm el valor de la concentración máxima de vanadio que puede ser extraído por la fase líquida es $C^*=346134.0$ mg/l siendo la cantidad de metal en la ceniza 31573.8 mg/l, a un tiempo de $t=6287.72$ min, tiempo en el cual la variación de la concentración en función del tiempo se hace despreciable.

Si comparamos los valores de extracción de vanadio con solución acuosa de hidróxido sodio 2 M con respecto de los valores de extracción de níquel con el mismo agente lixivante podemos decir que el hidróxido de sodio tiene alta selectividad hacia el vanadio estos resultados son similares a los resultados obtenidos por otros autores que proponen la extracción de níquel en un medio básico. (Stas y col., 2006; Navarro y col., 2007; Vitolo y col., 2001; Vitolo y col., 2000)

Para el solución acuosa de hidróxido sodio 2 M como agente extractor de vanadio los resultados podemos observar los altos rendimientos de este agente lixivante al extraer vanadio, logrando en el mejor de los casos hasta extraer un aproximado del 60 % del vanadio total en la ceniza, este resultado para las cenizas de mayor tamaño, pero para las cenizas de menor tamaño de partícula podemos extraer hasta el 99 % del vanadio presente en la misma, es decir de 460 mg de vanadio presentes en esta granulometría se logra la extracción de aproximadamente 455.93 mg del metal, esto se debe a lo anteriormente mencionado que a menor tamaño de partícula mayor es el área superficial y por lo tanto mayor extracción. (Stas y col., 2006; Navarro y col., 2007; Vitolo y col., 2001; Vitolo y col., 2000).

Los altos valores de extracción para las granulometrías de alto tamaño se deben solo, a que a estos tamaños las cantidades de vanadio son hasta 4 veces la cantidad de las de menor tamaño. Al igual que para el agua es importante resaltar que para estas cenizas la cantidad de vanadio es superior a las obtenidas por autores anteriores llegando a ser hasta 10 veces la cantidad esto se debe a que las mismas son el residuo producto de la combustión de Bunker C última fracción en la refinación del petróleo, por lo tanto la composición del petróleo dependen de las características geoquímicas del mismo, como lo son materia orgánica (Tipo de Kerogeno que le dio origen), y las condiciones físicas y químicas que le dieron origen.

Al igual que para todos los casos anteriores la cinética obtenida para la data experimental es del tipo exponencial, tanto para la fase líquida como para la fase sólida, comportamiento característico de procesos con captación de soluto (Perry Green, 2001). Con respecto a los datos de equilibrio mostrados en las tablas anteriores el hidróxido de sodio es capaz de extraer de forma diferenciada altas cantidades de vanadio y la fase sólida es capaz de cederlo, a tiempos por debajo de los alcanzados por el agua, también se observa que la fase sólida cede mayor cantidad de vanadio al hidróxido de sodio como agente lixivante que al agua.

Resultados anteriores demuestran que a medida que aumentamos la concentración del hidróxido de sodio se obtienen mejores resultados, sin embargo estos autores llegan a trabajar hasta con soluciones de hidróxido de sodio a 8 molar, en este caso de forma diferenciada se pueden obtener excelentes resultados a una concentración de 2 molar, concentración fijada para todos los agentes lixiviantes en esta investigación. (Stas y col., 2006; Navarro y col., 2007; Vitolo y col., 2001; Vitolo y col., 2000).

Con respecto al equilibrio podemos decir al igual que para la extracción de níquel con todos los agentes lixiviantes que este no se alcanza para ninguna de las fases por ser un proceso diferenciado donde se renueva constantemente el agente lixiviante sin permitir que ambas fases lleguen al equilibrio. En las tablas anteriores podemos observar que la solución acuosa de hidróxido de sodio es capaz de extraer de forma diferenciada altas cantidades de vanadio es decir mas del 90 % del vanadio presente en la ceniza y la fase solida es capaz de cederlo, a tiempos por debajo de los alcanzados por el agua, también se observa que la fase solida cede mayor cantidad de vanadio al solución acuosa de hidróxido de sodio 2 M como agente lixiviante que al agua. Los valores de concentración máxima calculados al igual que en las etapas anteriores indican que la fase liquida de forma diferenciada es capaz de extraer mas del níquel presente en la ceniza y los tiempos en que la variación de la concentración en función del tiempo se hacen despreciables son menores a los del agua.

Los resultados obtenidos para la lixiviación de vanadio con ácido clorhídrico, estos resultados muestran que el ácido clorhídrico es el agente lixiviante de los tres estudiados que arroja los resultados menos favorables para la extracción de vanadio. Esto se debe a que el proceso de lixiviación en medio ácido es más selectivo hacia la extracción de níquel. (Stas y col., 2006; Navarro y col., 2007; Vitolo y col., 2001; Vitolo y col., 2000).

El porcentaje de extracción logrado por este agente lixiviante es aproximadamente un 26 % en el mejor de los casos, logrando los mejores rendimiento al igual que en los casos anteriores para las granulometrías de menor tamaño de partícula, la mayor cantidad de metal extraído se logra para la granulometría de mayor tamaño de partícula por ser las que contienen mayor cantidad de metal siendo hasta cuatro veces la cantidad presente en las partículas más pequeñas, para la granulometría de +0.642 mm se logra extraer de forma diferenciada por la fase liquida, es decir renovando el agente lixiviante en cada una de las etapas, lo cual no permite que este se agote, un total de 8890.5730 mg/l o 444.5287 mg de vanadio, en el caso de las granulometrías de menor tamaño como para tamaños de partícula de -0.3+0.125 mm se logra extraer 122.8323 mg de un total de 460.32 mg.

Para este caso los tiempos en que la variación de la concentración en función del tiempo es despreciable son similares, llegando a ser en cualquiera de los casos no superiores a 308 min para ambas fases. Según estos datos la concentración máxima obtenida de la extrapolación de la cinética experimental son similares a los obtenidos a un tiempo de 300 min, lo que nos indica que no es factible otra etapa lixiviación ya que la variación en la concentración no será considerablemente superior a la obtenida durante el último tiempo trabajado.

3. Mecanismo de Doble Resistencia de Ernst

3.1. Níquel

Según los resultados obtenidos para el ajuste de la cinética experimental del proceso de lixiviación de níquel con agua a las diferente granulometrías al modelo de doble resistencia, podemos observar que los coeficientes de transferencia de masa tanto para fase liquida (KLa) como para la fase solida (KSa) son similares entre si, sin embargo en la mayoría de los casos para cada una de las granulometrías el coeficiente en la fase solida es menor al de la fase liquida, por lo tanto la resistencia para la fase solida es mayor y es ella quien rige el proceso de lixiviación diferenciada de níquel con agua para todas las granulometrías. Solo para las granulometrías de menor tamaño -0.355+0.3 mm y -0.3+0.125 mm el coeficiente de la fase liquida es menor.

Los resultados de equilibrio arrojados por este modelo, mantienen el mismo comportamiento a los resultados obtenidos del ajuste de los datos experimentales (Alaña y Col., 2004; Alafara y col., 2009; Jabber y col., 2009; Yang J., 200; Shan y col., 2005).

Para el hidróxido de sodio, el coeficiente de equilibrio de la fase liquida en todos los casos para cada granulometría es inferior por lo tanto es la fase que ofrece mayor resistencia y quien rige el proceso.

Para el ácido clorhídrico los valores del coeficiente de transferencia de masa individuales son muy similares

para ambas fases llegando a ser en algunos casos iguales, esto significa que la fase liquida en medio ácido es mas a fin al proceso de extracción de níquel, aunado a esto se puede decir que ambas fases alcanzan el equilibrio a tiempos y concentraciones equivalentes.

3.2. Vanadio

Para el vanadio con agua, hidróxido de sodio y ácido clorhídrico como agentes lixiviantes, se mantiene el mismo comportamiento, el coeficiente de transferencia de masa individual para la fase solida (KSa) es mayor que el de la fase liquida (KLa), por lo tanto según estos resultados la fase liquida al tener menor coeficiente es quien opone mayor resistencia y es la fase dominante del proceso.

Los resultados de concentraciones de equilibrio nos muestran valores de concentraciones de equilibrio muy altos para la fase liquida, estos resultados indican que la fase liquida utilizada por su alta afinidad con el vanadio, no llegara nunca a alcanzar el equilibrio, esto se debe a que el proceso se realiza de forma diferenciada y se renueva el agente lixivante en cada una de las etapas es la fase solida quien determinara el límite del proceso (Alaña y Col., 2004; Alafara y col., 2009; Jabber y col., 2009; Yang J., 200; Shan y col., 2005).

4. Difusividades

Los valores de difusividad del níquel a través de la ceniza volante siempre son menores a los del vanadio. Los valores de difusividad de níquel se encuentran en el orden de 10^{-9} , mientras que para el vanadio están en el orden de 10^{-7} , estos indican que la velocidad de transferencia de masa a través de la ceniza volante es más rápida para el proceso de lixiviación del vanadio que para el del níquel. Se puede ver en las tablas anteriormente mencionadas que para la lixiviación del níquel el proceso mas rápido y efectivo es la lixiviación realizada en medio acuoso y ácido, siendo la básica un proceso poco eficiente debido a sus bajos valores de difusividad que están en el orden de 10^{-11} y 10^{-12} ; mientras para el vanadio el proceso más rápido y efectivo es el realizado en medio básico y acuoso con difusividades en el orden de 10^{-7} .

Estos resultados de difusividades confirman lo reportado por los datos cinéticos experimentales donde se establece que para la lixiviación de níquel a partir de las cenizas volantes el proceso que arroja mejores resultados es el proceso en medio acuoso y para el vanadio es el proceso en medio básico seguido por el acuoso y el ácido (Alaña y Col., 2004; Alafara y col., 2009; Jabber y col., 2009; Yang J., 200; Shan y col., 2005).

Los valores de difusividad para el proceso de lixiviación son mayores a los encontrados en otros procesos de transferencia como el de intercambio iónico en medios complejos como el intercambio catiónico o aniónico en leche, los valores de difusividad encontrados en este trabajo dependen de la complejidad de la estructura química de la ceniza, así como del tamaño del poro y del agua libre en la fase lixivante ya que esta aumenta el hinchamiento por lo tanto aumenta el tamaño de poro y el coeficiente de difusividad (Alaña y Col., 2004; Alafara y col., 2009; Jabber y col., 2009; Yang J., 2001; Shan y col., 2005).

5. Ajustes Cinéticos de modelos matemáticos para la lixiviación de níquel y vanadio de cenizas volantes

Los valores del número de Fourier y de las fracciones de los metales se introdujeron en los programas desarrollados en Matlab de los modelos cinéticos de transferencia bajo control de la fase solida según las expresiones de difusividad efectiva de Langmuir, Freundlich, Temkin y Gilliland. Obteniéndose así los parámetros difusionales de transferencia α y β por minimización de los errores cuadráticos totales.

5.1. Níquel

El proceso de lixiviación de níquel a partir de cenizas volantes, en función de la fase solida mantiene un comportamiento del tipo exponencial hacia abajo solo los modelos de Gilliland y Temkin fueron capaces de ajustar los datos de concentración de níquel en las cenizas volantes. Se puede decir que los errores obtenidos de la diferencia entre la data experimental y la data calculada por el método de colocación ortogonal son bajos encontrándose

en un rango promedio entre 10-3 y 10-7. El modelo que mejor se ajusta a la data experimental para lixiviación de níquel es el modelo de Temkin con errores promedios de 10-6 (Alaña y Col., 2004; Martínez K., 2003; Alafara y col., 2009; Jabber y col., 2009; Yang J., 2001; Shan y col., 2005).

Los modelos de Langmuir y Freundlich no se ajustaron a la data experimental, por lo tanto el programa no arroja valores difusionales de transferencia α y β .

5.2. Vanadio

La lixiviación de vanadio a partir de cenizas volantes, en función de la fase sólida mantiene un comportamiento del tipo exponencial hacia abajo, solo los modelos de Gilliland y Temkin fueron capaces de ajustar los datos de concentración de níquel en las cenizas volantes. Se puede decir que los errores obtenidos de la diferencia entre la data experimental y la data calculada por el método de colocación ortogonal son bajos encontrándose en un rango entre 10-3 y 10-5. El modelo que mejor se ajusta a la data experimental para lixiviación de níquel es el modelo de Gilliland con errores promedios de 10-4 sin embargo los valores promedios de los errores entre ambos modelos son similares (Alaña y Col., 2004; Martínez K., 2003; Alafara y col., 2009; Jabber y col., 2009; Yang J., 2001; Shan y col., 2005).

Los modelos de Langmuir y Freundlich no se ajustaron a la data experimental, por lo tanto el programa no arroja valores difusionales de transferencia α y β .

Conclusiones

Del análisis de los resultados obtenidos se en este trabajo de investigación se derivan las siguientes conclusiones:

- Mas del 73 % de las cenizas volantes generadas como subproducto en la Termoeléctrica Ramón Laguna están compuestas por partículas granulares de tamaños superiores a 0.5 mm. De los 18734.13 g, 9670.62 g representan partículas superiores 0.642 mm, 4101.29 g a partículas de tamaños inferiores o iguales a 0.642 mm pero menores a 0.5 mm, 2921.37 g a tamaños de partículas inferiores e iguales a 0.5 pero mayores a 0.355 mm, 1307.98 g a partículas que están entre un rango de 0.355 mm y 0.3 mm y por ultimo 732.87 g a partículas inferiores e iguales a 0.3 mm pero superiores a 0.125 mm.

- Según los ensayos de digestión húmeda con ácidos fuertes a altas temperaturas la mayor cantidad de vanadio y níquel presente en las cenizas volantes se encuentra en las partículas superiores 0.5 mm, en función de cada una de las granulometrias los resultados fueron los siguientes:

- Para una granulometría de +0.642 mm, 67.075 mg de níquel y 1650.65 mg de vanadio.
- Para una granulometría de -0.642+0.5 mm, 46.70 mg de níquel y 1578.69 mg de vanadio.
- Para una granulometría de -0.5+0.355 mm, 33.05 mg de níquel y 728.63 mg de vanadio.
- Para una granulometría de -0.355+0.3 mm, 23.95 mg de níquel y 502.36 mg de vanadio.
- Para una granulometría de -0.3+0.125 mm, 23.25 de níquel y 460.32 mg de vanadio.

- La cinética experimental obtenida para la lixiviación diferenciada de níquel y vanadio a las diferentes condiciones de operación es del tipo exponencial. De manera general la extracción de metales por la fase líquida a las diferentes condiciones de operación aumenta a medida que aumenta el tiempo de contacto, siguiendo este mismo comportamiento.

- El proceso de lixiviación diferenciada es un proceso efectivo para recuperar metales mayoritarios de cenizas volantes, debido a que no permite el agotamiento del agente lixivante, la mayor extracción de níquel se obtuvo para el agua como agente lixivante a una granulometría de -0.642+0.5 mm, un tiempo de contacto de 300 min y fue de 17.2041 mg lo que representa el 36.84 %, sin embargo la mayor eficiencia en el proceso para la lixiviación diferenciada de níquel con agua se obtuvo para una granulometría de -0.5+0.355 mm, un tiempo de contacto de 300 min y fue de 13.5692 mg lo que representa el 41,06 % del metal presente en la misma, le siguen en el orden de

mayor a menor extracción el proceso con solución acuosa de ácido clorhídrico a 2 M donde el mayor rendimiento se obtuvo para una granulometría de $+0.642$ mm, un tiempo de contacto de 300 min y fue de 8.1632 mg lo que representa el 12.17 %, por último el proceso menos eficiente para la extracción de níquel es el realizado con solución acuosa de hidróxido de sodio a 2 M obteniéndose porcentajes de extracción inferiores al 1 %.

- La mayor extracción de vanadio se obtuvo para el agua como agente lixivante a una granulometría de $-0.642+0.5$ mm, un tiempo de contacto de 300 min y fue de 1080.4437 mg lo que representa el 97.94 %, sin embargo la mayor eficiencia en el proceso para la lixiviación diferenciada de vanadio con agua se obtuvo para una granulometría de $-0.5+0.355$ mm, un tiempo de contacto de 300 min y fue de 727.4116 mg lo que representa el 99.83 % del metal presente en la misma, le siguen en el orden de mayor a menor extracción el proceso con solución acuosa de hidróxido de sodio a 2 M donde el mayor extracción se obtuvo para una granulometría de $+0.642$ mm, un tiempo de contacto de 300 min y fue de 974.8125 mg lo que representa el 59.06 % y la mayor eficiencia fue de un 99.44 % para una granulometría de $-0.355+0.3$ mm, por último el proceso menos eficiente para la extracción de níquel es el realizado con solución acuosa de ácido clorhídrico a 2 M obteniéndose porcentajes de extracción inferiores al 26.93 %.

- La lixiviación diferenciada de níquel se ve favorecida con agua como agente lixivante y en medios ácidos distintos al ácido clorhídrico como por ejemplo solución acuosa de ácido sulfúrico, mientras que para la extracción de vanadio el proceso más conveniente es la lixiviación con agua y solución acuosa de hidróxido de sodio, este último agente lixivante garantiza procesos de lixiviación altamente selectivos así la extracción de vanadio.

- Los coeficientes de transferencia de masa para la fase líquida (K_L) y fase sólida obtenidos del ajuste de los datos experimentales al modelo de Doble Resistencia de Ernst, indican que para la lixiviación diferenciada de níquel con agua y solución acuosa de ácido clorhídrico a 2 M, en la mayoría de los casos el coeficiente de transferencia de masa para la fase líquida es similar al de la fase sólida llegando a ser en algunas ocasiones para ciertas granulometrías iguales entre sí, lo que indica que ambas fases ofrecen la misma resistencia, solo para el hidróxido de sodio se observa un comportamiento definido por coeficientes de transferencia de masa de la fase líquida (K_L) en el orden de 10^{-4} y 10^{-5} inferiores a los de la fase sólida (K_S) que se encuentran en el orden de 10^{-3} y es entonces la fase líquida quien rige el proceso, con respecto a la lixiviación diferenciada de níquel con agua y solución acuosa de hidróxido de sodio a 2 M, se observa un comportamiento definido por coeficientes de transferencia de masa de la fase líquida (K_L) en el orden de 10^{-4} y 10^{-5} inferiores a los de la fase sólida (K_S) que se encuentran en el orden de 10^{-2} y 10^{-3} en este caso al igual que en el anterior la fase que rige el proceso es la fase líquida, mientras que para la lixiviación de vanadio con solución acuosa de ácido clorhídrico a 2 M el comportamiento es el mismo al obtenido para lixiviación de níquel con el mismo agente lixivante.

- Los valores de difusividad del níquel a través de la ceniza volante siempre son menores a los del vanadio. Los valores de difusividad de níquel se encuentran en el orden de 10^{-9} , mientras que para el vanadio están en el orden de 10^{-7} , estos indican que la velocidad de transferencia de masa a través de la ceniza volante es más rápida para el proceso de lixiviación del vanadio que para el del níquel. Con respecto a la lixiviación diferenciada de níquel, el proceso más rápido y efectivo es la lixiviación realizada en medio ácido, siendo la básica un proceso poco eficiente debido a sus bajos valores de difusividad que están en el orden de 10^{-11} y 10^{-12} ; mientras para el vanadio el proceso más rápido y efectivo es el realizado en medio básico y acuoso con difusividades en el orden de 10^{-7} .

- Los resultados de difusividades confirman lo reportado por los datos cinéticos experimentales donde se establece que para la lixiviación de níquel a partir de las cenizas volantes, el proceso que arroja mejores resultados es el proceso en medio acuoso y para el vanadio es el proceso en medio básico seguido por el acuoso y el ácido.

- El proceso de lixiviación diferenciada de níquel y vanadio a partir de cenizas volantes, en función de la fase sólida mantiene un comportamiento del tipo exponencial hacia abajo, solo los modelos de Gilliland y Temkin representados por las ecuaciones 19 y 20 respectivamente, fueron capaces de ajustar los datos de concentración en función del tiempo de ambos metales en las cenizas volantes, arrojando valores difusionales de transferencia α y β , que minimizan los errores cuadráticos. Se puede decir que los errores obtenidos de la diferencia entre la data experimental y la data calculada por el método de colocación ortogonal son bajos encontrándose en un rango entre 10^{-3} y 10^{-12} para ambos modelos.

• Los modelos de Langmuir y Freundlich representados por las ecuaciones 17 y 18 no se ajustaron a la data experimental, por lo tanto el programa no obtuvo valores difusionales de transferencia α y β que ajustaran la data y minimizaran los errores.

Revisión Bibliográfica

1. Alafara y col., Dissolution Kineties and Leaching of Rutile Ore in Hydrochloric Acid, Department of Chemistry, University of Llorin, Nigeria, Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering, Vol. 8, No. 10, pp.787-801,2009.
2. Arguelles y Ortiz. (2007). Remoción de arsénico presente en las cenizas volantes producto de la combustión de fuel oil. Tesis de Grado. Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia.
3. Feijoo y Rosales. (2010). Evaluación de la recuperación de vanadio y níquel por lixiviación ácida de las cenizas volantes del aceite combustible, Tesis de Grado. Facultad de Ingeniería. Universidad Rafael Urdaneta.
4. Fernández y González (2003). Lixiviación Básica De Metales Pesados En Cenizas volantes por fluidización. Tesis de Grado. Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia.
5. Fernández y Díaz. (2003) Análisis de los factores de enriquecimiento en la lixiviación básica de cenizas volantes. Tesis de Grado. Facultad de Ingeniería. La Universidad del Zulia.
6. García C. y col., “Análisis de las variables operacionales de un sistema de transferencia de masa bajo un campo eléctrico autoinducido”. Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia, Vol. 15, No. 2, pp. 117-130,1992.
7. García C. y col., “Análisis por colocación ortogonal de los efectos de conducción axial y disipación viscosa en la transferencia de calor de fluidos no-newtonianos”. Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia, Vol. 10, No. 1, Edición Especial, pp. 119-128,1987.
8. García C. y col., “Comparación de modelos de difusión en la cinética de adsorción de fenol en fase acuosa”. Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia, Vol. 11, No. 2, pp. 99-110,1988.
10. García C. y col., “Efectos del volumen de la solución en la transferencia de sistemas iónicos”. Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia, Vol. 15, No. 3, pp. 189-200,1992.
11. García C. y col., “Efectos límites de migración iónica en la cinética de intercambio iónico bajo control de la fase sólida”. Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia, Vol. 18, No. 2, pp. 229-238,1995.
12. García C. y col., “Evaluación del efecto de migración iónica en sistemas de intercambio iónico bajo control mixto”. Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia, Vol. 8, No. 2, pp. 37-50,1985.
13. García C. y col., “Factor R_i para la fase líquida controlante en sistemas de intercambio iónico basado en el Modelo de Capa Límite”. Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia, Vol. 7, No. 2, pp. 33-46,1984.
14. García C. y col., “Intercambio iónico del sistema $\text{Na}^+-\text{Ag}^+-\text{Cl}^-$ en un lecho fijo de resinas Dowex 50W”. Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia, Vol. 21, No. 1, pp. 37-46,1998.
15. García C. y col., “Modelos de difusión con control de la fase sólida para adsorción e intercambio iónico”. Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia, Vol. 20, No. 3, pp. 245-255,1997.
16. García C. y col., “Sobre los aspectos integrales del método de colocación ortogonal en la cinética del intercambio iónico bajo control mixto”. Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia, Vol. 9, No. 1, pp. 9-15,1986.
17. García C., “Fundamentos de Intercambio Iónico”. Facultad de Ingeniería. División de Postgrado. Universidad del Zulia. 2000-

18. García C., "Self-induced electric fields effects on bed size for moving-bed ion-exchange units", Master of science in chemical engineering, University of Washintong, 1975.
19. García T., "Análisis por colocación ortogonal de la transferencia de momentum y calor del flujo de fluidos en 2 dimensiones", Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Química LUZ, Maracaibo, 1981.
20. González, José A., García, César, Machado, Analí. (2004), Concentración de vanadio y níquel en cenizas volantes por combustión controlada, Caracas, Venezuela, Septiembre, 2004, http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442004000900006&lng=es&nrm=iso. ISSN 0378-1844, Abril, 2010.
21. Jabber y col., Kinetic Study on Vanadium Recovery From Oil Fire Power Stations, Nahrain University, College of Engineering Journal (NUCEJ), Vol.12, No. 2, pp. 151-160, 2009.
22. Kahalid y col., Nikel Recovery from Residue of Heavy Oil Using Nitric Acid, Chemical Eng. Dept, Nahrain University, Journal of Petroleum Research & Studies, No. 3, 2011.
23. Martinez K., "Cinética del intercambio iónico en sistemas lácteos". Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Maracaibo, 2003.
24. Navarro y col. (2007). Recuperación de vanadio a partir de cenizas volantes de combustible por lixiviación, precipitación y por procesos de extracción con disolventes. *Waste Management* 27 (2007) 425-438.
25. Perry & Green, (2001). Manual del Ingeniero Químico. 7ma Edición. Editorial McGraw-Hill. Arava Madrid.
26. Piña y Dorante. (2001). Efecto de las variables operacionales en la lixiviación ácida de metales pesados presentes en las cenizas del fuel oil. Tesis de grado. Universidad del Zulia.
27. Querol y col. (1999). Síntesis de Zeolitas a partir de cenizas volantes a escala planta piloto. Instituto de Ciencias de la Tierra Jaume Almera. Barcelona España.
28. Sebastiani. (2002), Lixiviación ácida de las cenizas volantes en lecho fluidizado. Tesis de Grado. Facultad de Ingeniería. La Universidad del Zulia.
29. Sebastiani. (2002). Lixiviación Ácida de las cenizas volantes en lecho fluidizado. Tesis de Grado. Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia.
30. Shan y col., Kinetics and model building of leaching of water-soluble compounds of Tilia sapwood, Laboratoire de Chimie Industrielle Genie des Procédés, Paris, France, Separation and Purification Technology Vol. 45 pp. 169-173, 2005.
31. Skoog, West, Holler y Crouch (2001). Química Analítica. 7ma Edición. Editorial McGraw-Hill. México.
32. Treybal R., Operaciones de transferencia de masa, 2da edición, D.F., México, Editorial McGraw Hill, pág. 792, 1980.
33. Vitolo y col. (2000). Recuperación de Vanadio de las cenizas volantes de aceite pesado y orimulsión. Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Pisa 2 56126. Pisa, Italia. ISSN - 0169-4332.
34. Yang J., A Numerical Leach Model Based on Empirical Equilibrium Relationships, Department of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul Korea, Korean Society of Environmental Engineers, Vol. 6, No. 1, pp. 29-38, 2001.

Control y telemanipulación a distancia de un sistema multivariable

Ernesto Cornieles¹, Germán Gutiérrez², Jacobo Ramírez³

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia.
Maracaibo, Edo. Zulia, Venezuela. Apartado 10259 Tele-Fax: +58-261-7598753
E-mail: ¹ecornieles@luz.edu.ve, ²gergutierrez@luz.edu.ve, ³jramirez@luz.edu.ve.

Recibido: 16-05-2014 Aceptado: 25-09-2015

Resumen

El presente artículo tiene como objetivo, la manipulación a distancia vía Internet de elementos e instrumentos electromecánicos, hidráulicos y electronumáticos de un proceso industrial en tiempo real. En general este tipo de manipulación los usuarios pueden acceder a sistemas, laboratorios y a bancos de prueba. Diversos algoritmos nos permiten realizar el estudio comparativo de diferentes técnicas de ajustes de los controladores para un sistema multivariable, que en este caso es nuestra investigación. En el desarrollo de la investigación se ha puesto en marcha un banco de prueba para el control de nivel y temperatura de un tanque de agua. La estructura del sistema de control multivariable se ha implementado con la ayuda del software LabView®. Esta estructura utiliza dos(2) lazos de control: un lazo de control para la regulación de nivel y otro lazo para la regulación de la temperatura. Un desacoplador estático se ha implementado y permite minimizar las interacciones entre los dos(2) lazos de control, la acción de control y las variables a controlar. La metodología empleada permite la telemanipulación del estudiante o el usuario del sistema real, en este caso de un banco de prueba hidráulico donde existen equipos e instrumentos de prototipos industriales. Esta metodología permite constituir el aula de clase clásica en un laboratorio virtual utilizando la red Internet que permite minimizar la utilización de costosos equipos para una gran cantidad de estudiantes, es importante señalar que el banco de prueba se puede acceder desde cualquier sitio, constituyendo una novedad, el sitio virtual. Los resultados permiten concluir que la manipulación a distancia ha permitido con éxito la posibilidad de utilizar Internet como medio de aprendizaje y enseñanza de la Ingeniería de Control.

Palabras clave: Tiempo real, banco de prueba, sistema multivariable, LabView®

Control and remote accessing of a multivariable system

Abstract

This paper concerns synchronous remote accessing of electro-mechanical, electro-pneumatic or hydraulic devices as well as the control of industrial process in real time and from via the Internet network. An experimental workbench is designed to complete teaching of continuous and discrete control. Users, students or professors can reach the laboratory facilities to participate to one or several manipulations of laboratory work or use the system from afar to get any help about the course material. Using this laboratory, we tested a certain number of algorithms that permitted us to do a comparative survey of different techniques of multivariable system controllers. The workbench allows the regulation of the level and the temperature of a water reservoir in real time. The structure of the multivariable control system was implemented using LabView® software. This structure uses two control loop. The first is for the regulation of level and second for the regulation of temperature. A static decoupling was also

used between the two loops and the action of control as well as the process variable. The telemanipulation in synchronous mode and the process control was implemented to achieve real time experimentations. It is accessible via the Internet network. The manipulation permitted from afar to test, with success, the relevance to use the Internet as a training tool.

Key words: Real time, workbench, multivariable system, LabView®

Introducción

Después de algunos años, el control industrial asistido por computador es el más utilizado para obtener resultados que garanticen la calidad y el mantenimiento de un proceso. Esta evolución tecnológica permite actualmente acceder a distancia vía la red Internet el proceso y manipular los parámetros asegurando la calidad deseada. El laboratorio virtual es un elemento de este aprendizaje a distancia con el objetivo de permitir a los usuarios realizar trabajos de manera similar a los experimentos realizados en el laboratorio convencional.

Este artículo presenta un caso de ese acceso a distancia para controlar un sistema multivariable con una estructura de regulación con un controlador proporcional-integral-derivativo (PID). Esta misma estructura es ilustrada para diferentes tipos de control donde el usuario puede realizar una serie de experimentos con las diferentes técnicas explicadas más adelante. Los otros parámetros (señales de referencia, período de muestreo,...) son accesibles a distancia y pueden ser compartidos por los mismos miembros de un mismo equipo físico distante. La utilización del controlador PID es muy clásico y numerosos trabajos se han desarrollado con el objetivo de obtener un mejor ajuste de las ganancias del PID. Ziegler-Nichols [1] ha utilizado la respuesta en lazo abierto para obtener las ganancias del controlador. Cohen y Coon [1] han propuesto técnicas utilizando la respuesta en lazo abierto del proceso. Ogunnaike et Seborg [1] igualmente proponen técnicas similares basado en el modelo del proceso. García y Morari [4,5] proponen la técnica del control interno para obtener las mejores ganancias del controlador PID. El control multivariable se ha estudiado por los mismos autores utilizando la estructura del control interno. Bristol [1], ha analizado el efecto de las interacciones y las perturbaciones de un sistema multivariable y se comenzó a visualizar la utilización de un desacoplador. Häggblom [6] efectuó el estudio no lineal de un sistema multivariable para la regulación del nivel y la temperatura, luego Camacho y Rojas [2] presentaron un algoritmo general de un controlador en modo deslizante para procesos químicos. Ellos también proponen la utilización de un desacoplador estático para un sistema de control multivariable. Todos estos años de investigación han conducido a proponer un banco de prueba multivariable para analizar las diferentes técnicas de control moderno en tiempo real. Se presenta una comparación experimental de las diferentes técnicas de control moderno en tiempo real. Se presenta una comparación experimental de las diferentes técnicas de ajuste del controlador PID.

Descripción del banco de prueba

El tanque utiliza una capacidad de 0.27 m³ y su secciones constante, 0.38 m². Este tanque es alimentado por dos(2) entradas de agua. Una entrada es la alimentación de agua fría y la otra alimentación es agua caliente. Los flujos de las dos entradas son controlados por dos válvulas independientes. Sobre estos dos elementos del sistema es que el usuario va a poder regular el nivel y la temperatura. El tanque dispone de una válvula que permite ajustar manualmente el flujo de salida (ver figura 1). Se dispone de un medidor para obtener la evolución de la temperatura a la salida del tanque. El sistema está equipado igualmente de un medidor de presión fijado en la parte inferior del tanque. Este medidor suministra la información del nivel del agua (medida hidrostática del nivel).

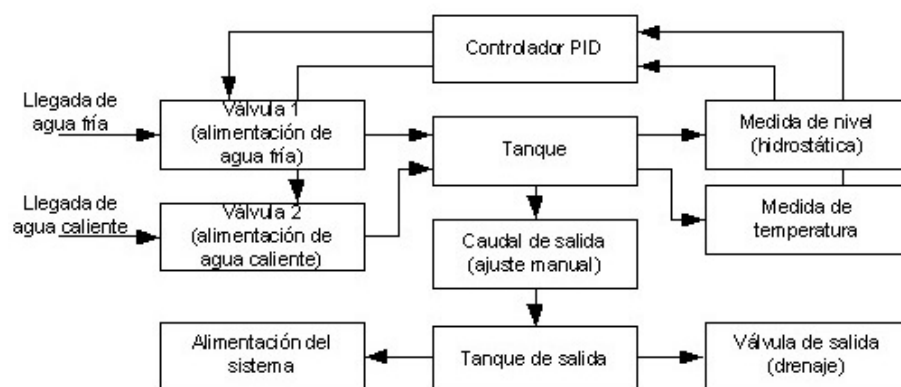


Figura 1 : Presentación funcional del sistema

El controlador se implementó con la ayuda de un computador equipado de un microprocesador Intel. Para interpretar las señales analógicas del sistema (nivel y temperatura) y controlar las válvulas, el computador utiliza una tarjeta entrada-salida de la compañía National Instruments®. Esta tarjeta dispone de dos canales numéricos/analógicos y 16 canales analógicos/numéricos. La tarjeta suministra al controlador las señales relativa al nivel y a la temperatura. Esta funcionalidad es programada en lenguaje de tipo LabView®.

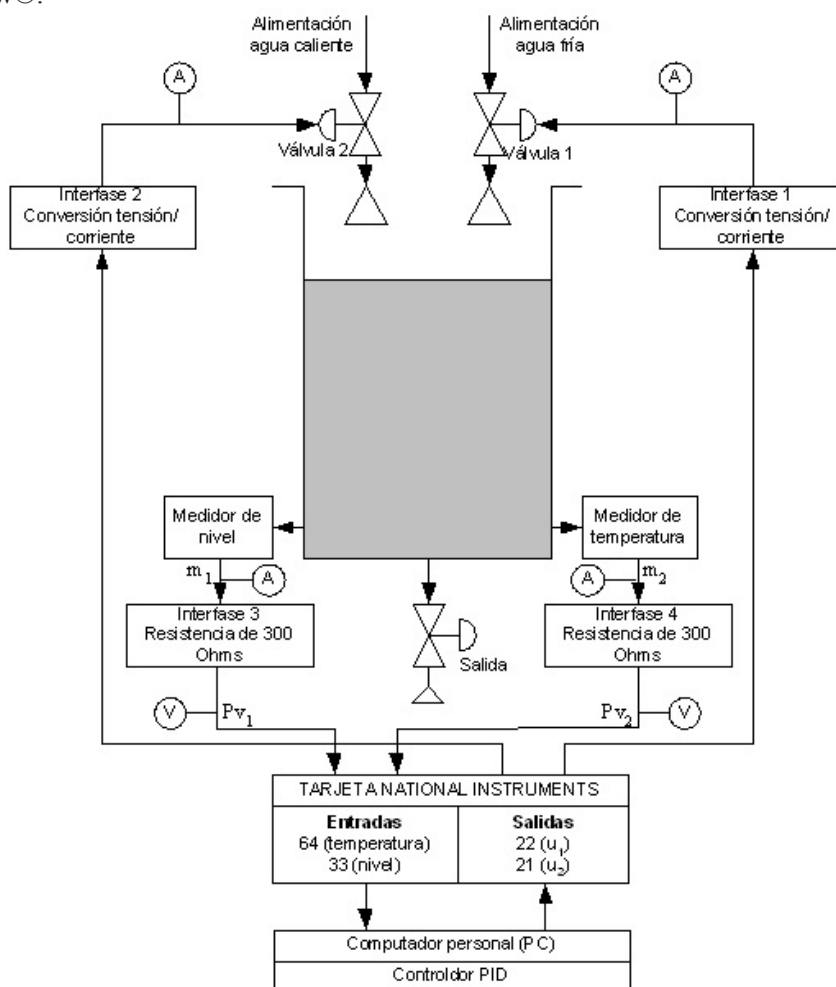


Figura 2 : Representación del sistema de control.

Se designa Pv1 la variable nivel y Pv2 la variable temperatura (ver Figura 2). Para actuar en el sistema el controlador utiliza los canales numéricos/analógicos la tarjeta que permite controlar las válvulas de alimentación. Se designa la acción de control de la primera válvula (agua fría) y u2 la acción de

control de la segunda válvula (agua caliente). Se utiliza una resistencia de 300 W para medir el nivel y la temperatura en voltios. El sistema de control utilizando los dos lazos de control es presentado en la figura 5. Esta representación global del sistema permite visualizar los diferentes componentes del banco de prueba.

Telemanipulación a distancia

La Figura 3 ilustra la arquitectura utilizada. El servidor comunica localmente con el proceso utilizando un protocolo de comunicación serie (RS232 o RS485) o una tarjeta de adquisición de datos. El usuario puede acceder a los equipos y aplicaciones informáticas desarrolladas en tiempo real con una conexión de tipo TCP/IP. La selección de esta arquitectura permite evitar todo problema que puede surgir por retardos e interrupciones momentáneas en la red de Internet.

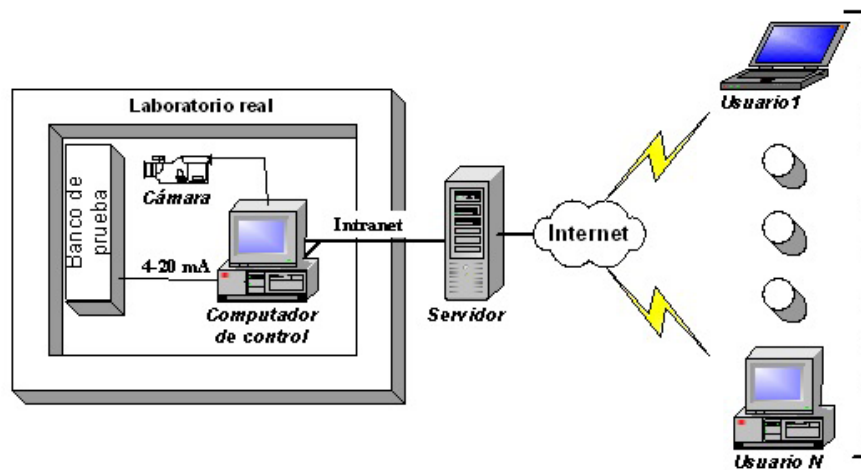


Figure 3 : Representación de la arquitectura del laboratorio virtual:

Estructura del controlador PID

La estructura del controlador a utilizar para la regulación del nivel y la temperatura es programado en lenguaje LabView® y corresponde a un PID clásico y un PID Dual Loop [4].

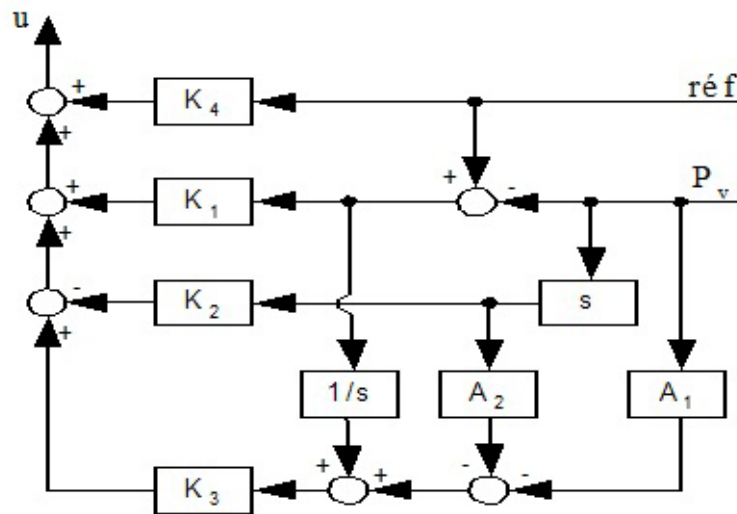


Figura 4 : Estructura del PID Dual Loop

La ecuación del controlador viene dada por:

$$u = K_1(\text{réf} - P_v) - K_2 SP_v + K_3 \left[\frac{(\text{réf} - P_v)}{s} - A_1 P_v - A_2 SP_v \right] \quad (1)$$

donde,

K1 = ganancia proporcional,

K2 = ganancia derivada,

K3 = ganancia integral,

K4 = ganancia anticipativa,

A1 y A2 = parámetros de la función de segundo orden.

réf = referencia deseada

La estructura del controlador PID clásico puede ser obtenido anulando los factores A1 y A2 ($A_1 = A_2 = 0$).

Ajuste del controlador PID DUAL LOOP

Dado que el sistema identificado precedentemente es de primer orden, se debe determinar la mejor respuesta del sistema con un controlador proporcional de manera de obtener un régimen transitorio satisfactorio. La respuesta temporal del sistema se almacena y esta respuesta se aproxima a una función de segundo orden. Si el régimen transitorio obtenido es satisfactorio con la aproximación precedente, los valores siguientes son obtenidos: $A_1 = \frac{2\zeta}{w_n}$ et $A_2 = \frac{1}{(w_n)^2}$ donde ζ y w_n son el coeficiente de amortiguamiento y la frecuencia natural de la aproximación de segundo orden. La etapa siguiente consiste en aumentar K3 evitando el deterioro del régimen transitorio, y reducir la sensibilidad del sistema en presencia de perturbaciones. El ajuste del controlador PID Dual Loop es explicado en la referencia [4].

Sistema de control multivariable

Para poner en funcionamiento óptimo el sistema de control multivariable, se utilizan dos controladores de tipo PID y un desacoplador para minimizar las interacciones entre las variables del proceso a controlar [3]. Dos lazos de control se utilizan. Los dos lazos con el desacoplador nos ofrecen las tres opciones siguientes: el control de nivel, el control de temperatura, y el control multivariable en nivel y temperatura. El esquema del sistema de control es representado en la figura 5. El parámetro a del desacoplador es seleccionado en función de la relación de la proporción agua fría/agua caliente y también en función de las características de las válvulas (válvula agua caliente y válvula agua fría). Para las experiencias se ha seleccionado $a = 2$, que representa .66% de agua fría y 33,33% de agua caliente. Esta repartición garantiza la economía de agua caliente, es el caso del control de nivel para lo cual se utiliza mas agua fría que agua caliente. Los parámetros b_1 y b_2 son utilizados para el control de la temperatura sola y, de nivel y temperatura, caso multivariable. El valor de b_1 debe ser negativo y el de b_2 positivo ya que se debe utilizar más agua caliente para el control de temperatura sabiendo que algunas veces el agua fría es bien fría para ciertos períodos del año.

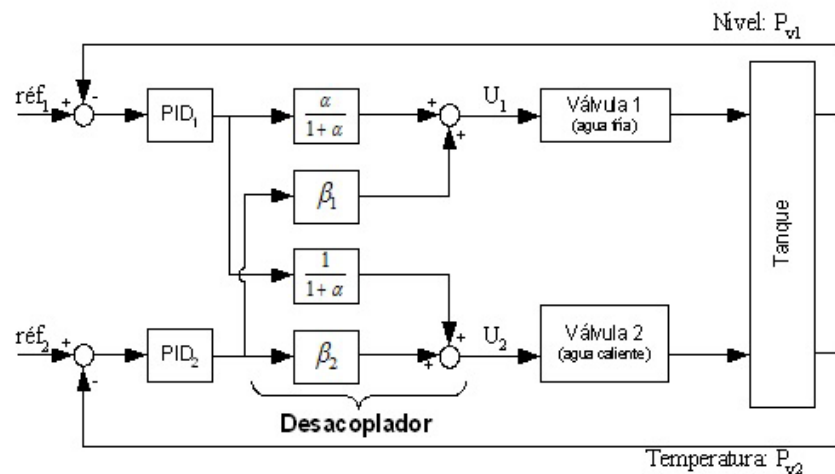


Figura 5 : Sistema de control multivariable.

Resultados experimentales

En esta sección se presentan las experiencias realizadas para verificar el algoritmo de control y el buen funcionamiento del banco de prueba. La interfase de comunicación LabView®-usuario presenta dos controladores.

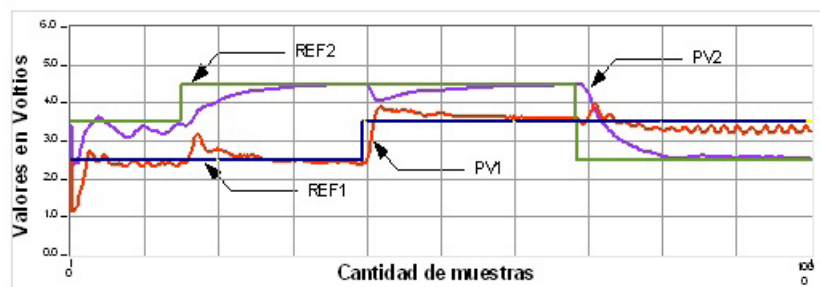


Figura 6a : Control de nivel y temperatura : Técnica del PI Dual Loop

Todas las experiencias se realizaron con un nivel correspondiente al estado de reposo de 0 cm(1.2 voltios), una referencia en nivel de 2.5 voltios(34 cm), la referencia de la temperatura es de 3.5 voltios(35 grados Celsius). La válvula de salida abierta a una posición fija a 45%. PV1: nivel en voltios, PV2: Temperatura en voltios, REF1: referencia del nivel en voltios y REF2: referencia de la temperatura en voltios

Analisis de resultados y conclusión

El objetivo del proyecto, la puesta en marcha de un banco de prueba multivariable y la concepción de dos lazos de control con la ayuda de LabView® para la regulación de nivel y temperatura se ha logrado con éxito. El banco de prueba ha permitido efectuar experiencias que ilustran bien las diferentes técnicas de ajuste y su comportamiento. En nuestro caso, los dos lazos de control con un desacoplador estático ha permitido tener un sistema de control con dos controladores de tipo PID. La técnica Dual Loop para el caso multivariable permiten obtener controladores bastantes robustos en presencia de perturbaciones de tipo cambio de referencia. Es importante señalar que el banco de prueba real se puede convertir en un banco de prueba virtual que contribuye a la manipulación a distancia y el control del mismo. La red Internet ha demostrado la poderosa herramienta para la enseñanza y la transmisión de conocimientos en el área de la Ingeniería de Control, rama sumamente importante dentro de la ciencia y la tecnología. Esta herramienta facilita que los equipos del laboratorio real se puedan compartir de una manera simple y sencilla constituyéndose en una forma elegante para transmisión de los conocimientos en cualquier área del saber.

Referencias bibliograficas

1. B. Ogunnaike, and W.H. Ray, *Process Dynamics, Modeling and Control*, Oxford University, 1994
2. O. Camacho, and R. Rojas, "A General Sliding Mode Controller for Nonlinear" , *Chemical Process*:, Transaction of the ASME, Vol. 22, December 2000
3. E. Cornieles, and C. Bougeret, "Comparaison expérimentale de différentes techniques de réglage du régulateur PID et PID Dual Loop " , *Rapport officiel R97*, EPM, 1997
4. R. M. De Santis, "A Novel PID configuration for a Speed and Position Control", *Transaction of the ASME*, vol.116, pp. 542-549, September 1994
5. C.E. Garcia, and M. Morari, "Design Procedure for Multivariable Systems", *American Chemical Society*, 472-484, 1985
6. K. E. Häggblom, "Experimental Comparaison of Conventional and Nonlinear Model Based Control of a Mixing Tank", *American Chemical Society*, 1993

Aprendizaje constructivista para el análisis de estructuras mediante el uso de un entorno virtual

Evelyn Marín Fernández

Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela
Facultad de Ingeniería. Universidad Rafael Urdaneta. Maracaibo, Venezuela
evelyn.marin320@gmail.com

Recibido: 12-09-2014 Aceptado: 25-09-2015

Resumen

Este artículo tiene como objetivo, evaluar el impacto de la aplicación de un entorno virtual para el aprendizaje constructivista del análisis de estructuras en los estudiantes de mecánica racional de la Universidad Rafael Urdaneta. La investigación de la cual parte este artículo fue desarrollada a partir de un enfoque positivista y se sustenta en los aportes de las teorías constructivistas de Vigotsky así como los enfoques propuestos por Arboleda N. (2005) y Díaz F. y Hernández G. (2001). El tipo de investigación es evaluativa con diseño cuasi – experimental, de campo y longitudinal. Para la recolección de datos, se aplicó una prueba de conocimientos de selección simple, previamente validada por expertos y a la cual se le determinó el coeficiente de confiabilidad Alfa de Crombach cuyo valor fue de 0,87. Para el análisis de datos se utilizó la prueba t para la comparación de medias en los grupos experimental y control. Los resultados del estudio revelaron una diferencia significativa en el rendimiento académico de ambos grupos, siendo superior el del grupo experimental en un 22 % (en promedio). Ante los resultados obtenidos se concluye que el uso de un entorno virtual contribuye al desarrollo del aprendizaje constructivista de los estudiantes. Se recomienda promover el desarrollo de investigaciones donde se incorporen las TIC en el quehacer educativo, igualmente se sugiere el mejoramiento e implementación de este recurso pedagógico dentro de las plataformas informáticas de la Universidad. Se espera que este estudio permita el desarrollo de otras investigaciones orientadas a la aplicación de entornos virtuales enfocados en el aprendizaje estudiantil, así como la aplicación de dichos entornos en otras cátedras de la facultad de ingeniería.

Palabras clave: Entorno virtual, aprendizaje constructivista, estrategia docente, análisis de estructuras.

Constructivist learning for the analysis of structures by using a virtual environment

Abstract

This article aims to evaluate the impact of the implementation of a virtual environment for constructivist learning structure analysis in rational mechanics students from Rafael Urdaneta University. The research from which this article was developed based on a positivist approach and relies on the contributions of Vygotsky's constructivist theories and approaches proposed by Arboleda N. (2005) and Diaz, Hernández (2001). The type of research is evaluative with quasi - experimental, and longitudinal field. For data collection, we applied a test of knowledge of simple selection, previously validated by experts and which was determined the reliability coefficient Alpha de Crombach whose value was 0,87. For data analysis t test was used to compare means between experimental and control groups. The results of the study revealed a significant difference in the academic performance of both groups, being higher in the experimental group by 22% (average). The obtained results showed that the use of a virtual environment contributes to the development of constructivist learning for students. It is recommended

to promote the development of researches where ICT are incorporated into the educational work, also the improvement and implementation of this educational resource within the University computing platforms is suggested. It is expected that this investigation will allow the development of other researches aimed to the application of virtual environments focused on student learning, such as the application of these environments in others subjects of the Engineering Faculty.

Key words: Virtual environment, constructivist learning, teaching strategy, structure analysis.

Introducción

En las últimas décadas, se ha observado el impulso de un sinnúmero de aplicaciones y estrategias didácticas desarrolladas en aras de mejorar el aprendizaje de los estudiantes y en consecuencia, reformar positivamente el sistema educativo. En este sentido, la mayoría de las propuestas, apuntan hacia el uso de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) como estrategia complementaria a las clases tradicionales en el aula. Por ello, muchos son los docentes que han reformulado sus estrategias pedagógicas con la finalidad de contribuir a la mejora del aprendizaje estudiantil, traducido en un incremento tanto del rendimiento académico, como en la autonomía para la construcción de su conocimiento.

Particularmente, la mecánica racional, tal y como lo señalan Marín E. y Ruíz R. (2012), requiere que el estudiante desarrolle habilidades para el análisis de cuerpos rígidos en reposo bajo la acción de cargas, a través de la aplicación de principios y leyes de la física. Esta habilidad, requiere la participación activa del alumno en la construcción de su conocimiento, lo cual implica el compromiso para llevar a cabo un estudio sistemático, analítico y reflexivo de los contenidos desarrollados en la unidad curricular. Por ello, los docentes de esta cátedra recientemente han incorporado, una serie de recursos audiovisuales en línea que puedan estar a la disposición del alumno más allá del aula de clases.

Dadas las condiciones que preceden, se considera que el análisis de estructuras es un área medular, no sólo en la mecánica racional sino además en la ingeniería civil, por ello, se ha propuesto el uso de diversos recursos como hipertextos, videos con ejemplificaciones, casos prácticos, preguntas de análisis, foros y asignación de actividades individuales y grupales, aplicando en su diseño un enfoque constructivista. Todos estos recursos a su vez, han sido consolidados dentro de un entorno virtual, donde los estudiantes tengan a su disposición la información de clases en todo momento.

Por las razones antes descritas, este artículo tiene como propósito evaluar la aplicación de un entorno virtual para el aprendizaje constructivista del análisis de estructuras en los estudiantes del tercer semestre de mecánica racional del tercer periodo académico del año 2012 (septiembre – diciembre) en la Universidad Rafael Urdaneta. Para el desarrollo de este artículo, se utilizaron los fundamentos teóricos propuestos por el Foro OCDE (organización para cooperación y el desarrollo económico, 2010) y los autores Díaz F. y Hernández G. (2001), Arboleda N. (2005), Del Valle A. y Escribano A. (2008), Yanes J. (2009), Fonseca M. y Aguaded J. (2007) y Jonassen D. (2000).

Fundamentos Teóricos

De acuerdo a lo expuesto en el Foro OCDE (2010), desde una visión constructivista, el aprendizaje se basa en la experiencia y siempre ocurre individualmente. El conocimiento nuevo engloba el conocimiento ya existente y puede conducir a su transformación y diferenciación. Esta expansión del conocimiento se lleva a cabo a través de nuevas experiencias o mediante la reflexión crítica de los propios constructos cognitivos confrontados con otros. Los requerimientos específicos relacionados con la organización de oportunidades de aprendizaje son enunciados por Díaz F. y Hernández G. (2001) y se presentan a continuación:

- La creación del conocimiento no se inicia únicamente por los docentes, y siempre será responsabilidad de los estudiantes.
- Se debe promover el intercambio social ya que favorece los procesos del aprendizaje.
- El aprendizaje basado en problemas es deseable ya que contribuye a la construcción del conocimiento

enfocado en aplicaciones.

- Los nuevos contenidos deben resumir el conocimiento previo individual. En correspondencia con los planteamientos anteriores, Arboleda N. (2005), afirma que el principio esencial del constructivismo parte del hecho de considerar a cada sujeto como poseedor de una estructura mental única a partir de la cual construye significados interactuando con la realidad abordada a través del estudio y donde la dimensión social es relevante. El constructivismo reivindica, no sólo el papel protagónico del estudiante durante la construcción de significados mediante el lenguaje como herramienta principal, sino la interacción social en el proceso de aprendizaje a partir de la influencia del docente, sus compañeros de estudio y la aplicación práctica del saber alcanzado, orientados a la solución de problemas en contextos reales.

En este mismo orden de ideas, Díaz F. y Hernández G. (2001), consideran que el enfoque constructivista integra la psicología genética de Jean Piaget; las teorías cognitivas, especialmente la de David Ausubel, sobre el aprendizaje significativo, y la corriente sociocultural de Lev Vigotsky.

Aprendizaje Cognoscitivo

En lo que respecta a este tipo de aprendizaje, según Arboleda N. (2005), el cognitivismo explica el aprendizaje humano mediante un proceso integral en el cual intervienen complejos mecanismos mentales tales como la comprensión, el análisis y la aplicación del saber en contextos sociales. Este enfoque se estructura como una nueva teoría del aprendizaje y su origen proviene de las contribuciones de la escuela psicológica alemana, orientada por el psicólogo Max Wertheimer (1933), citado por Arboleda N. (2005), conjuntamente con los avances de los estudios realizados por Jean Piaget acerca de la psicología evolutiva y epistemología genética.

Aprendizaje Basado en la Solución de Problemas

Respecto a esta dimensión del aprendizaje, Del Valle A. y Escribano A. (2008) señalan que el Aprendizaje Basado en Problemas (ABP) es un sistema didáctico que requiere la intervención activa de los estudiantes en su propio aprendizaje hasta el punto de definir un escenario de manera autodirigida, en este sentido, ni los profesores ni los contenidos constituyen los elementos centrales sino los alumnos son quienes toman la iniciativa de resolver los problemas.

Como puede observarse, muchas de estas características tienen su fundamento teórico en la psicología cognitiva, específicamente en el constructivismo, el cual se basa en la premisa que el aprendizaje es un proceso de construcción del nuevo conocimiento sobre la base del previo. Por esta razón, el ABP constituye un método para promover el aprendizaje integrado dando respuesta al qué, el cómo y el para qué se aprende; de esta manera es tan importante el conocimiento, como los procesos generados para su construcción de forma significativa y funcional.

Aprendizaje Contextualizado

En correspondencia, con los principios anteriormente descritos, Díaz F. Y Hernández G. (2001), afirman que una de las quejas más recurrente de la evaluación tradicional es debido al énfasis en la evaluación de saberes descontextualizados a través de situaciones artificiales. Este problema de descontextualización no sólo se presenta en la evaluación, sino en casi todo el proceso educativo, así entonces, el problema se debe atacar desde sus causas para resolverlo y luego dar respuesta al problema de la evaluación.

Por las razones antes citadas, la identificación de estas tareas auténticas debe ser considerada para llevar a cabo el hecho educativo, incluyendo la evaluación. Esta última, puede contener una amplia variedad de tareas auténticas, de modo que el alumno manifieste la utilización funcional y flexible de los aprendizajes logrados.

Entorno Virtual

En lo referente a los entornos virtuales, Yanes J. (2009), afirma que se ha venido desarrollando con especial fortaleza la riqueza y susceptibilidad de respuesta a un entorno reactivo e inteligente, donde existen variables de alto estímulo las cuales afectan la inteligencia y forman personas inquisitivas, exploratorias, imaginativas, prospectivas, de visión holística, sistémica y cuestionadora, dispuestas a correr riesgos y asumir el error.

En este mismo orden de ideas, según la teoría cognitiva del aprendizaje mediante entornos virtuales, tal y como lo reseñan Fonseca M. y Aguaded J. (2007), los entornos virtuales donde se reduce la carga cognitiva e incrementa la posibilidad de aprender tienen en común cuatro principios: principio de contigüidad, es decir, se aprende mejor cuando la animación y la narración se presentan simultáneamente; principio de coherencia, se refiere a la mejora del aprendizaje cuando no es necesario procesar imágenes o palabras extrañas en la memoria de trabajo; principio de modalidad, significa que se aprende mejor cuando la palabra se presenta a manera de narración y no como texto escrito, y por último, el principio de redundancia, en el cual el aprendizaje se dificulta cuando se presentan al mismo tiempo la narración y texto escrito.

De igual forma, Jonassen D. (2000), sugiere usar los entornos de aprendizaje constructivista (EAC) en procesos educativos, mediante el tratamiento de cuestiones, proyectos, problemas o ejemplos de interés para los alumnos. El núcleo del entorno está orientado al tratamiento del problema a tres niveles: contextualización, representación y manipulación.

Metodología

Esta investigación cuantitativa se desarrollará a partir de un enfoque positivista, el cual, de acuerdo a Vieytes R. (2004), se sustenta en el método experimental o cuasi – experimental, y su propósito es llegar al descubrimiento de leyes y principios que describen o explican un fenómeno. Según Hurtado J. (2010), el tipo de investigación es evaluativa por cuanto contempla como último objetivo la valoración del entorno virtual para el aprendizaje constructivista del análisis de estructuras.

Con base a los planteamientos de Hernández R., Fernández C. y Baptista P. (2010), la investigación plasmada en este artículo se desarrolló a partir de un diseño cuasi – experimental, ya que se emplearon dos grupos (experimental y control), conformados por los estudiantes de mecánica racional al momento de inscribir esta unidad curricular de manera independiente del experimento. Asimismo, el diseño del estudio también es de campo, ya que, según Hurtado J. (2010), los datos serán recolectados directamente de la fuente donde se presenta el evento, específicamente a los estudiantes de mecánica racional del tercer periodo académico en la facultad de ingeniería en la Universidad Rafael Urdaneta.

En este mismo orden y dirección, la investigación pertenece a un diseño longitudinal de tendencia, puesto que, en palabras de Vieytes R. (2004), pretende dar seguimiento a la variable de aprendizaje constructivista en la unidad curricular de mecánica racional. En este sentido, se busca efectuar comparaciones entre grupos en más de un periodo para conocer los cambios en los mismos.

La población considerada para el estudio está conformada por 88 estudiantes de mecánica racional de la facultad de ingeniería de la Universidad Rafael Urdaneta en el tercer periodo académico del año 2012. Igualmente, la muestra estará representada por dos secciones (de las cinco que hay en total) las cuales han sido asignadas aleatoriamente para ser dictadas por la investigadora. Todas las secciones empleadas en la investigación están conformadas por estudiantes con características similares y el investigador no posee control alguno sobre los miembros integrantes de estas secciones; por este motivo, se empleará un muestreo probabilístico por conglomerados.

La primera fase del estudio consistió en la elaboración de una prueba para lo cual se realizó una revisión documental de autores expertos en el área de mecánica racional, con la finalidad de conocer los contenidos tratados en el área de análisis de estructuras. Seguidamente, se procede al diseño de la prueba de conocimientos para identificar el nivel de aprendizaje basado en un enfoque constructivista estructurado en tres dimensiones: aprendizaje cognoscitivo, aprendizaje basado en la solución de problemas y el aprendizaje contextualizado. En palabras de Hurtado J. (2010), el objetivo de una prueba de conocimiento es determinar los aprendizajes, destrezas o habilidades logrados

por una persona o grupo.

La prueba de conocimientos aplicada en esta investigación, fue sometida a validez mediante el juicio de siete (7) expertos, quedando finalmente constituida por treinta y un (31) preguntas cerradas con cinco alternativas de respuestas de las cuales sólo una es correcta. Posteriormente, se llevó a cabo un estudio piloto a una de las secciones de mecánica racional conformada por dieciséis (16) estudiantes. La intención de este estudio fue determinar la confiabilidad del instrumento mediante los resultados de dicha prueba. Ya que existen cinco alternativas de respuesta se utilizó una escala tipo Likert de acuerdo con lo señalado por Hernández et al. (2010) y el modelo empleado para el cálculo de confiabilidad del instrumento fue Alfa de Crombach, el cual arrojó un coeficiente de 0,87. Este valor indica que el instrumento es altamente confiable.

A los resultados de la prueba de conocimiento se le aplicó la estadística inferencial mediante una prueba t para comparación de grupos. Del mismo modo, se utilizó un baremo (tabla 1) para la interpretación de datos, lo cual permitirá establecer una valoración apropiada a los resultados obtenidos de la aplicación de la prueba de conocimientos.

Tabla 1. Baremo de interpretación para la prueba de conocimientos.

Baremo para el nivel de conocimiento (%)	
0 – 25	Bajo
26 – 50	Regular
51 – 75	Suficiente
76 – 100	Alto

Fuente: Marín E. (2013)

Resultados Pre – test

Una vez aplicada la prueba de conocimiento al inicio del semestre a ambos grupos (experimental y control), se procedió a la aplicación de la prueba t con la finalidad de determinar si la diferencia de medias entre las respuestas de ambos grupos difiere significativamente (utilizando un 95 % de nivel de confianza). Estos resultados fueron obtenidos a partir del programa SPSS y se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Comparación de medias entre dos grupos (Pre – Test)

		Prueba t para la igualdad de medias			
		t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias
Calificaciones	Se han asumido varianzas iguales	-.383	27	.705	-.354

Fuente: Marín E. (2013)

Hipótesis Nula: Las medias son iguales

Hipótesis Alternativa: Las medias son diferentes

Puesto que el parámetro de prueba (Sig, Bilateral = 0,705) es mayor a 0,05; se concluye que no se rechaza la

hipótesis nula. Por lo tanto, las medias de los dos grupos son iguales, en otras palabras, los niveles de conocimiento de ambos grupos eran similares al inicio del curso.

Resultados Post - Test

Una vez aplicado el pre – test, ambos grupos recibieron clases a través del sistema tradicional de clases presenciales; es decir, el profesor expone los contenidos en el aula en sesiones teórico – práctica utilizando principalmente la pizarra como recurso instruccional. El grupo experimental sin embargo, tuvo la oportunidad de utilizar fuera del aula un entorno virtual para el aprendizaje del análisis de estructuras. Al finalizar el curso, ambos grupos presentaron nuevamente la prueba de conocimiento cuyos resultados se analizan a continuación en la tabla 3.

Tabla 3. Comparación de medias entre dos grupos (Post – Test)

Prueba de muestras independientes					
		Prueba t para la igualdad de medias			
		t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias
Prueba	Se han asumido varianzas iguales	-6.777	27	.000	-7.692

Fuente: Marín E. (2013)

Hipótesis Nula: Las medias son iguales

Hipótesis Alternativa: Las medias son diferentes

Debido que el parámetro de interpretación (Sig, Bilateral = 0,000) es menor a 0,05; se rechaza la hipótesis Nula. Por lo tanto, se concluye que las medias de los dos grupos son diferentes, en otras palabras, existen diferencias significativas entre los resultados obtenidos del grupo experimental respecto al grupo control. A continuación se muestra la tabla 4 que resume los resultados de la prueba de conocimientos por cada indicador. Estos resultados son expresados en términos porcentuales y no de frecuencia, ya que la cantidad de sujetos en cada grupo es diferente. Estos porcentajes constituyen la base para el análisis del nivel de conocimientos en los estudiantes.

Tabla4. Resultados de la prueba de conocimientos.

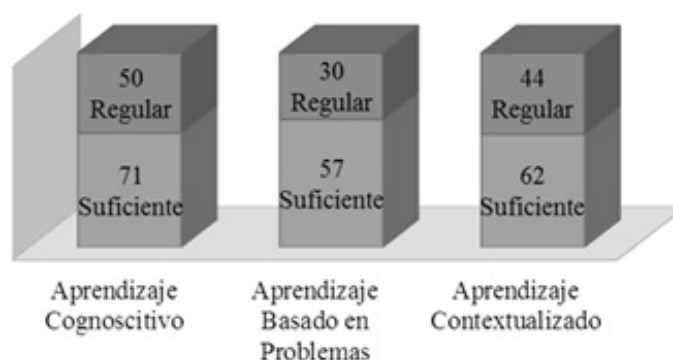
Dim.	Indicador	Ítems	Grupo Experimental	Grupo Control	Diferencia entre grupos
Aprendizaje Cognoscitivo	Reconocimiento de los tipos de estructuras	1, 2 y 3	97,0 %	92,6 %	4,4 %
	Determinación de la condición de un miembro de dos fuerzas (tracción y compresión)	4 ,5 y 6	66,7 %	51,9 %	14,8 %
	Identificación de nodos en condición especial de carga	7, 8 y 9	57,6 %	42,6 %	15,0 %
	Diagrama de cuerpo libre	10 y 11	68,2 %	27,8 %	<u>40,4 %</u>
	Diferencia entre elementos con carga o conexión intermedia y miembros de fuerza axial	12	72,7 %	44,4 %	28,3 %
	Reconocimiento de las cargas internas de una viga	13, 14 y 15	63,6 %	27,8 %	35,5 %

Aprendizaje Basado en Problemas	Cálculo de los grados de libertad de una estructura	16, 17 y 18	63,6 %	35,2 %	28,1 %
	Determinación de reacciones en los elementos estructurales	19, 20 y 21	45,5 %	9,3 %	36,2 %
	Cálculo de las cargas internas en una viga	22, 23 y 24	57,6 %	35,2 %	22,4 %
	Elaboración de diagramas de fuerza cortante y momento flector de una viga	25 y 26	63,6 %	9,3 %	54,0 %
Aprendizaje Contextualizado	Identificación de estructuras según el contexto	27 y 28	59,1 %	52,8 %	6,3 %
	Aplicaciones de las estructuras en contextos reales	29, 30 y 31	63,6 %	38,9 %	24,7 %

Fuente: Marín E. (2013)

Con base a estos resultados, se puede observar que en todos indicadores el porcentaje de respuestas correctas del grupo experimental fue mayor que el del grupo control, lo cual comprueba que el entorno virtual como estrategia complementaria de enseñanza, contribuye significativamente al aprendizaje del análisis de estructuras en los estudiantes de mecánica racional. Asimismo se destaca que en promedio, el porcentaje de acierto de casi todos los indicadores (excepto el asociado a la determinación de reacciones en los elementos estructurales) se ubicó por encima del 51 %, lo cual, de acuerdo con el baremo de interpretación de datos corresponde a un nivel de conocimiento suficiente o alto. La figura 1 muestra los porcentajes de aciertos obtenidos por cada grupo de acuerdo a las tres dimensiones. Cabe destacar que en todas las dimensiones, el grupo que utilizó el entorno virtual de aprendizaje obtuvo un mayor porcentaje de respuestas acertadas respecto al grupo control.

Figura 1. Resultados por dimensión



Fuente: Marín E. (2013)

En este mismo orden de ideas, en lo que respecta al aprendizaje cognoscitivo, se observa que el indicador con mayor porcentaje de variación fue el referido a la elaboración de diagramas de cuerpo libre (40,4 %), lo cual es un indicativo de que los recursos pedagógicos empleados en el entorno virtual para la realización de los diagramas de cuerpo libre contribuye a la mejor comprensión de este tópico.

Por otra parte, el resultado del indicador asociado al aprendizaje basado en la solución de problemas que mostró mayor variación fue el relativo a la elaboración de los diagramas de fuerza cortante y momento flector de

una viga. En este particular, tal y como lo señalan Battro A. Y Derham P. (2002), los diagramas son herramientas poderosas para reconocer el comportamiento de las estructuras, y los entornos virtuales, en palabras de Poole B. (2001), ofrecen la posibilidad de representar dichos diagramas haciendo uso de variados recursos pedagógicos como los videos con ejemplificaciones.

Por último, el aprendizaje contextualizado es una dimensión en la cual los estudiantes aprenden las aplicaciones que poseen las estructuras en situaciones físicas reales. En este sentido, la mayor variación de resultados se registró en el indicador de aplicaciones de estructuras en contextos reales, el cual obtuvo un 24,7 % de diferencia entre el grupo experimental y el grupo control.

Conclusiones

- De la primera dimensión, el objetivo consistió en comparar el nivel de aprendizaje cognoscitivo relacionado con el análisis de estructuras alcanzado por los estudiantes del grupo experimental y grupo control de mecánica racional en la facultad de ingeniería de la Universidad Rafael Urdaneta. De acuerdo con los resultados, el grupo experimental obtuvo porcentajes de aceptación por encima de 51% en todos los ítems, lo que permite comprobar que el uso de los entornos virtuales contribuye al incremento del aprendizaje cognoscitivo en los usuarios.

- Para la dimensión relacionada con el aprendizaje basado en la solución de problemas, el objetivo fue comparar este nivel de aprendizaje en el análisis de estructuras alcanzado por los estudiantes del grupo experimental y grupo control. Las respuestas revelan un rendimiento de regular a bajo, lo cual, aunque no es una situación deseable, corresponde a los resultados esperados en muchas unidades curriculares que demandan por parte de los estudiantes, una considerable dedicación para el estudio de contenidos, práctica para el desarrollo de cálculos, y capacidad de análisis para la interpretación de resultados.

- La tercera dimensión se refiere al aprendizaje contextualizado. Se observó, que el entorno virtual ofrece a sus usuarios la posibilidad de ver aplicaciones de estructuras a través de imágenes y videos donde se contextualicen los contenidos desarrollados en la teoría. El objetivo para medir esta dimensión consistió en comparar el nivel de aprendizaje contextualizado en el análisis de estructuras entre los estudiantes del grupo experimental y grupo control. De acuerdo con los resultados de la prueba de conocimientos, se evidencia una diferencia significativa entre las respuestas del grupo control y el grupo experimental. Este último es el grupo que obtuvo el porcentaje más alto de respuestas correctas en la prueba de conocimientos.

- En lo que respecta a los resultados de la prueba de conocimientos obtenido por el grupo control, llama poderosamente la atención que en promedio (figura 1), el porcentaje de respuestas acertadas se ubicaron entre 30 y 50 % en cada dimensión. Esto lleva a una reflexión entre ambas partes del hecho educativo en el aula: docentes y alumnos. Por una parte, se requiere que los docentes se aboquen al desarrollo de estrategias de enseñanzas que estimulen al alumno al estudio y por otra parte, esto implica un mayor compromiso por parte de los estudiantes en su proceso de aprendizaje.

Recomendaciones

Se recomienda a todos los centros de investigación, promover el desarrollo de investigaciones donde se incorporen las TIC en el quehacer educativo, ya que muchas de las investigaciones actualmente se limitan a la propuesta pero sólo algunas concretan la aplicación.

En este mismo orden de ideas, se recomienda a la facultad de ingeniería de la Universidad Rafael Urdaneta, el mejoramiento e implementación de este recurso pedagógico dentro de sus plataformas informáticas, en principio, para la cátedra de mecánica racional, y de acuerdo con sus resultados, ampliar su aplicación a otras áreas.

Referencias Bibliográficas

1. Arboleda Toro, N. 2005. ABC de la educación virtual y a distancia. Editorial Filigrana. Primera Edición. Bogotá – Colombia.
2. Battro A. y Derham P. 2002. Aprender hoy. Una colección de ideas. Papers Editores. Primera edición. Buenos Aires – Argentina.
3. Del Valle, Á. y Escribano, A. 2008. Narcea S.A. de ediciones. El aprendizaje basado en problemas. Una propuesta metodológica en educación superior. Madrid – España.
4. Díaz – Barriga, F. y Hernández Rojas, G. 2001. Estrategias docentes para un aprendizaje significativo, una interpretación constructivista. Segunda Edición. Mc Graw Hill. Distrito Federal – México.
5. Fonseca Mora, M. del C. y Aguaded Gómez J. I. 2007. Enseñar en la universidad. Experiencias y propuestas para la docencia universitaria. Capítulo 4. Ediciones Netbiblo. La Coruña – España.
6. Hernández R., Fernández C. y Baptista P. 2010. Metodología de la Investigación. Quinta Edición. Editorial Mc Graw Hill. Santiago de Chile - Chile.
7. Hurtado, J. 2010. Metodología de la Investigación. Guía para la comprensión holística de la ciencia. Ediciones Quirón. Cuarta Edición. Bogotá – Colombia.
8. Jonassen, D. H. 2000. Computer as mindtools for schools: engaging critical thinking. USA.
9. Marín, E. y Ruíz, R. 2012. Estática. Fondo Editorial Urbe. Primera Edición. Maracaibo – Venezuela.
10. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico. 2010. Habilidades y competencias del siglo XXI para los aprendices del nuevo milenio en los países de la OCDE. OCDE. Paris - Francia.
11. Poole, B. J. 2001. Docente del siglo XXI. Cómo desarrollar una práctica docente competitiva. Mc Graw Hill. Bogotá – Colombia.
12. Vieytes, R. 2004. Metodología de la Investigación en organizaciones, mercado y sociedad. Editorial de las ciencias. Buenos Aires – Argentina.
13. Yanes Guzmán, Jaime. 2009. Las Tic y la crisis de la educación. Algunas claves para su comprensión. Artículo de publicación electrónica. Biblioteca digital virtual educa. Chile.

Análisis de la emisión y dispersión del dióxido de nitrógeno en un sector de alto flujo vehicular

Alberto Córdova¹, Neyma García¹, Analí Machado¹, Gilberto Colina² y Cezar García³.

¹Centro de Combustibles Gaseosos para Vehículos (CEDEGAS) Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela.

²Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (DISA), Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela. Tel. 0261-4128743

³Escuela de Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería. Universidad Rafael Urdaneta. Maracaibo, Estado Zulia. Venezuela.

acordovaf@gmail.com

Recibido: 24-02-2015

Aceptado: 25-09-2015

Resumen

El propósito de esta investigación es evaluar la dispersión de las concentraciones de dióxido de nitrógeno en ambiente, en un sector de alta densidad vehicular y poblacional. El NO₂ proviene de la oxidación del óxido nítrico (NO) formado en la reacción del combustible con el nitrógeno y oxígeno del aire y de la reacción del NO con el O₃. Se seleccionaron dos puntos de muestreo: una zona de emisión conocida como La curva de Molina y la zona de dispersión ubicada sobre la dirección preferencial de los vientos, en un área cercana a la zona de emisión. Las concentraciones fueron determinadas tanto en época de lluvia, como de sequía, para ambas zonas. La captación de la muestra de NO₂ se realizó en el equipo RAC-5 y el método del arsenito de sodio (COVENIN 1717-82) fue empleado para el análisis del NO₂. Adicionalmente se determinaron las tasas de formación del poluyente y los parámetros cinéticos por época. Las mayores concentraciones de NO₂ se detectaron para la época de lluvia explicable tanto por su baja solubilidad como la ocurrencia de numerosos días de calma. Se encontró mayor tasa de formación de NO₂ en el período de lluvia que en período de sequía; asimismo se obtuvo mayor valor de la constante cinética en el mismo período, indicativo de que el origen del NO₂ proviene tanto por procesos de combustión como por vía fotoquímica.

Palabras claves: Dióxido de nitrógeno, modelamiento, fuentes móviles, tasa de formación.

Analysis of the emission and dispersion of nitrogen dioxide in areas of high vehicular traffic

Abstract

The objective of this study was to evaluate the dispersion of the concentrations of nitrogen dioxide (NO₂) in the environment in an area of high vehicular traffic and high population density. NO₂ forms when nitric oxide (NO), generated by the reaction of fuel, nitrogen and oxygen from the air, reacts with and is oxidized further by O₃. Two concentration sampling sites were selected within the testing area: an emission zone known as Curva de Molina, and a nearby dispersion zone characterized by prevailing winds. The concentrations were determined during the rainy and dry seasons for both zones. The NO₂ samples were captured using RAC-5 equipment, and were analyzed using the Sodium Arsenite Absorption Method (COVENIN 1717-82 Standard). In addition, the rate of formation and kinetic parameters for the pollutant were also determined for each season. The highest concentrations of NO₂ were detected during the rainy season due to both its low solubility in water as well as the occurrence of many days with little or no wind. It was found that the rate of formation of NO₂ was higher during the rainy

season than in the dry season; similarly the kinetic constant was also found to have a higher value during the same season, all of which indicates that NO₂ originates via combustion processes as well as photochemical processes. **Palabras claves:** Nitrogen dioxide, modeling, mobil source, formation rate.

Introducción

La contaminación del aire es causada por diferentes procesos antrópicos y naturales. Entre los contaminantes de mayor interés puede citarse el dióxido de nitrógeno, constituyendo un problema ambiental resultante de las actividades del hombre o contaminación antrópica [1].

El tráfico automotor cumple un rol importante en la contaminación del aire, debido a que sus emisiones han experimentado gran aumento por efecto del crecimiento poblacional en función de las necesidades de transporte y traslado. Aproximadamente un 60 % de la contaminación atmosférica es producida por los vehículos automotores, los cuales representan la mayor fuente individual de emisiones poluentes y, por consiguiente, su grado de contribución a la polución atmosférica es de gran relevancia [2], siendo el NO_x uno de los componentes típicos del gas de escape.

En el proceso de formación del dióxido de nitrógeno en la combustión del nitrógeno del combustible con las moléculas de oxígenos y nitrógeno del aire, se genera principalmente el óxido nítrico (NO), en condiciones de altas temperaturas. El resultado neto es el establecimiento cercano del equilibrio Nitrógeno-oxígeno-óxido nítrico y óxido nítrico-oxígeno-dióxido de nitrógeno [3].



La formación de NO se ve favorecida a altas temperaturas. Las concentraciones de NO y NO₂ son limitadas debido a las propiedades termodinámicas y cinéticas de las moléculas de N₂, O₂, NO y NO₂; los átomos de N y O; la temperatura de la flama; las otras moléculas NO_x; concentraciones moleculares de N₂ y O₂ y la tasa de los gases que se transportan en las diferentes zonas de temperaturas de la cámara de combustión.

El objetivo de este trabajo de investigación es analizar la emisión y dispersión del dióxido de nitrógeno captado en una zona de alta densidad vehicular. Igualmente, fue estimado el coeficiente cinético de formación del NO₂.

Meteorología y climatología de la ciudad de Maracaibo

La cuenca del Lago de Maracaibo está conformada por las tierras cuyas aguas drenan o alimentan la gran reserva lacustre. Abarca aproximadamente 78180 km² y comprende todo el estado Zulia y parte de los estados Táchira, Mérida, Trujillo, Falcón y Lara de Venezuela. En la regulación de la temperatura intervienen los vientos, que en el área son de dos tipos: los alisios que penetran desde el noroeste y están presentes de noviembre a abril; y los llamados vientos locales o brisa del Lago, que se presentan en ausencia de los alisios (aunque muchas veces confluyen) y son creados por un calentamiento y un enfriamiento desigual en el cuerpo lacustre y en el territorio que lo rodea.

En la ciudad de Maracaibo, predominan dos estaciones de clima: una de sequía y otra de lluvia. La primera generalmente comienza entre el mes de Enero a Abril, mientras que la segunda ocurre típicamente de Mayo a Diciembre.

Obtención de la tasa de formación de NO₂

Partiendo del Modelo Gaussiano basado en la Teoría de Dispersión Atmosférica de Turner y una vez determinadas experimentalmente para la zona de emisión las concentraciones de NO₂ en ambas épocas, las tasas de emisiones del NO₂ y los parámetros cinéticos asociados fueron estimados.

A este respecto, partiendo de la ecuación Gaussiana sigue:

$$N(x, y, z; H) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2} \left\{ e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{(H-z)^2}{2\sigma_z^2}\right]} + e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{(H+z)^2}{2\sigma_z^2}\right]} \right\} \quad (3)$$

donde:

x es la concentración del poluente del aire en masa por unidad de volumen (g/m³)

Q es la tasa de emisión del poluente en masa por unidad de tiempo (g/s)

u es la velocidad del viento en el punto de liberación (m/s)

σ_y y σ_z son los coeficientes de desviaciones estándar de la distribución de concentración en la dirección transversal a una distancia x viento abajo y en la dirección vertical a una distancia (m).

H es la altura efectiva de la línea central de la pluma.

y despejando la tasa de emisión Q , se obtuvo la tasa de transformación del NO₂ y sus correspondientes parámetros cinéticos. La generación del mencionado poluente está dada por la cinética dependiente del proceso generado en la fuente dada por:

$$R_i = k_i \cdot C_i^m \quad (4)$$

Donde R_i es la tasa de formación; k_i es una constante de la velocidad de generación; C_i es la concentración del poluente; m : es el orden de la tasa de generación del poluente.

Metodología Experimental

Criterios desarrollados y selección de las zonas de muestreo

La selección de las zonas de muestreo y de los sitios de muestreo para la captación de las muestras, se realizaron tomando en cuenta diversos factores tales como: dirección del viento, desarrollo de zonificación predominante, actividad comercial e industrial, tráfico automotor y densidad demográfica.

Algunos de los criterios utilizados para establecer las zonas de muestreo se presentan a continuación:

Zona de emisión: área con alta densidad vehicular, y problemas de congestionamiento en horas picos; posibilidad de que la zona pueda estar incluida dentro de un plan de desarrollo de la ciudad, el cual contemple una solución a futuro del problema de masificación vehicular; la zona debe estar alejada de fuentes fijas, minimizando así interferencias sobre las emisiones de naturaleza móvil objeto de la investigación. [4, 5, 6].

Zona de dispersión: localizada en área cercana a la que transitan las fuentes móviles (cercana al punto de emisión) y siguiendo la dirección preferencial de los vientos; el modelaje deberá simular el proceso de dispersión a escala media (entre 100 y 500 m).

En la Figura 1 se muestra un plano parcial del Municipio Maracaibo del Estado Zulia en el cual se señala la ubicación general de las zonas de muestreo.

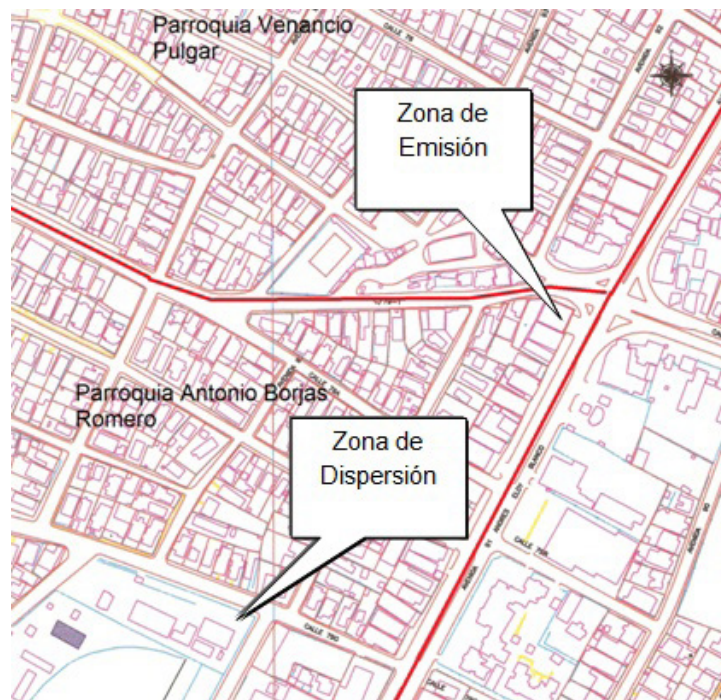


Figura 1. Ubicación geográfica de las zonas de emisión y dispersión.

Captación de las muestras

El lapso de muestreo comprendió dos variaciones climatológicas y estacionales: Septiembre- Diciembre y Enero-Marzo, con una cantidad mínima de veinte (20) muestras efectivas, distribuidas durante todo el lapso de muestreo y una frecuencia mínima de captación de una (1) muestra cada tres (3) días tanto en la zona de emisión como la zona de dispersión.

La captación de la muestra de NO₂ se realizó haciendo fluir aire ambiental a través de un embudo de polipropileno conectado a una sonda de polipropileno que pasa al tubo burbujeador del equipo RAC-5 conteniendo 50 mL de solución absorbente de arsenito de sodio.

El flujo entrante al burbujeador, fué controlado por agujas hipodérmicas calibre GX 27 ½ pulgadas, previamente calibradas proporcionando un flujo aceptable entre 180 -220 mL/min. Es importante destacar que los equipos fueron calibrados antes de ser instalados para cada una de las épocas climatológicas y sitios de muestreo. La altura de muestreo estuvo comprendido entre 2 a 3.5 m según lo establece la norma venezolana COVENIN 1717-82.

Análisis de las muestras

El método empleado para el análisis de dióxido de nitrógeno, fue el método modificado de Jacobs-Hochhieser o método de arsenito de sodio (COVENIN 1717-82).

Para el análisis estadístico se aplicaron varias técnicas tales como media aritmética, desviación estándar, prueba de rechazo Chauvenet; pruebas de medias normales con varianza y medias desconocidas t-Student, coeficientes de correlación lineal [7].

Resultados y discusión

Niveles de concentración y calidad del aire

En la Tabla 1, se resumen los valores máximo, mínimo y promedio de NO₂ por estación durante ambas épocas y el período total de muestreo.

Tabla 1. Valores máximo, mínimo y promedio de NO₂ para ambas zonas de estudio, por época y para el período total de muestreo

Estación	Concentración NO ₂ (µg/m ³)								
	Época lluviosa			Época seca			Período total de muestreo		
	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom
Zona de Emisión	10,469	106,15	47,487	9,394	53,116	33,849	9,394	106,15	42,032
Zona de Dispersión	9,897	23,979	15,782	5,529	13,366	9,793	5,529	15,782	13,386

Como era de esperarse, la estación ubicada en la zona de emisión, exhibió los mayores niveles de concentración para ambas épocas climáticas. De la misma manera, se evidencian valores más bajos durante la época de sequía, experimentándose una reducción de 28,72 % y 59,16% para la zona de emisión y para la de dispersión respectivamente.

Este comportamiento relacionado con niveles de NO₂ superiores durante la época lluviosa se debe principalmente por la conocida baja solubilidad en el agua que tienen los gases ácidos débiles como los NO_x, en especial a las condiciones de temperatura y presión presentes en la tropósfera. El óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂), exhiben coeficientes de la Ley de Henry a 298 K (25° C) con magnitudes de 0,002 y 0,01 M.atm⁻¹ en comparación con el valor del dióxido de azufre (SO₂) de 1,23 M.atm⁻¹; por consiguiente, en general tan solo una fracción despreciable de dichas especies podría ser disuelta en las nubes y sus concentraciones en fase acuosa está por el orden de 1 nM o menores [8]. Aunado a ello, la revisión de las condiciones meteorológicas promedio reinantes (presentadas en la Tabla 2) confirma el hecho de que en la época lluviosa la velocidad del viento fue aproximadamente un 80 % inferior a la de sequía; es decir, durante el período húmedo hubo numerosos “días de calma” con baja dispersión de los poluentes atmosféricos contribuyendo así al incremento en las concentraciones de NO₂ mencionado.

En contraposición, la concentración de NO₂ en la zona de dispersión pareciera permanecer uniforme (casi constante) indiferentemente del período del año. De esta última afirmación, pudiera desprenderse el hecho de estar frente al establecimiento de una concentración basal (o de línea base), información de gran interés para la predicción de niveles de calidad del aire a futuro. Baldauf y col [9], han indicado que aunque el comportamiento es dependiente de las concentraciones de la fuente, de la meteorología y del diseño presente en las vías principales (zona de emisión), mayoritariamente se ha encontrado niveles base dentro de una distancia de 200 a 500 m; es decir, dentro de lo que se considera como una escala media según los criterios de la Agencia de Protección Ambiental estadounidense, abarcando una dimensión entre 100 m y 0,5 km, lo cual es justamente la distancia que separa ambos sitios de medición en este trabajo.

Tabla 2. Parámetros meteorológicos promedios para ambos períodos

Época	Lluvia	Sequía
Vel. Viento (m/s) ¹	1,98 ± 0,71	3,61 ± 1,17
Precipitaciones (mm) ¹	155,70	43,40
Dirección (grados) ¹	287,71±97,51	342,55±50,11
Presión (mb) ¹	1008,48 ± 0,90	1011,20 ± 1,09
Temperatura (K) ¹	300,32 ± 1,39	300,53 ± 1,03
Humedad (%) ¹	82,54±4,34	74,6±5,20
Radiación solar (W/m ²) ²	134,21±5,88	151,57±62,50
Estabilidad ³	A	B

1 Datos suministrados por la Base Aérea Rafael Urdaneta.

2 Datos suministrados por la Estación Meteorológica Jesús Garrillo del Instituto de Investigación de Arquitectura y Diseño (IFAD)

3 Estimado considerando condiciones meteorológicas y técnica de Pasquill-Gifford.

Al realizar comparaciones con otras investigaciones efectuadas en la ciudad de Maracaibo pueden mencionarse: Araujo et al. (1987) [10] con promedio de 18,23 µg NO₂/m³ en época húmeda; Linares et al. [11] con promedio de 24,60 µg NO₂/m³ en época húmeda; Velásquez [12] con promedio anual de 13,3 µg NO₂/m³ y 16,4 µg NO₂/m³ en dos estaciones ubicadas en la zona universitaria de Cabimas. Puede concluirse que en ninguna de las zonas bajo estudio, la concentración anual promedio excedió el límite nacional de calidad del aire de 100 µgNO₂/m³.

Según la Organización Mundial de la Salud y la Comunidad Europea, a partir del 2008 [13], el valor establecido para el NO₂, es de 40 µg NO₂/m³ en período anual. Por lo tanto, el nivel de NO₂ promedio obtenido en La Curva de Molina supera ligeramente en 4,83 % el límite anual internacional mientras que está por debajo del valor fijado para una hora.

Origen de los niveles de NO₂ encontrados

Se realizó un análisis de correlación entre las concentraciones de NO₂ obtenidas para la zona de emisión y la zona de dispersión. La pobre correlación exhibida ($R^2 = 0.0733$) es indicativo de la poca habilidad predictiva lineal de una variable (estación) sobre la otra, es decir sugiere que las concentraciones obtenidas en una estación, vendrían a ser independientes del comportamiento en la otra.

Por tal motivo, se procedió a realizar la prueba t-student, con límite de confidencialidad del 95 % ($\alpha = 0,05$) para verificar la existencia de diferencias significativas en las medias poblacionales entre las zonas de emisión y de dispersión; en la Tabla 3 se revela un resultado positivo por época con respecto a la prueba de hipótesis cuando las medias poblacionales entre una zona y la otra, son diferentes.

Tabla 3. Análisis de media de NO₂ para épocas de Lluvia y Sequía

Período de medición	t ($\sigma_1 = \sigma_2$)	$t_{\alpha/2, n_1 + n_2 - 2}$ ($\sigma_1 = \sigma_2$)	t_o ($\sigma_1 \neq \sigma_2$)	$t_{\alpha, v}$ ($\sigma_1 \neq \sigma_2$)
Lluvia	-	-	3,4249	1,812
Sequía	-	-	4,8730	1,943

Se puede interpretar, que las concentraciones emitidas en la Curva de Molina, no son completamente transportadas hacia la zona de dispersión en forma horizontal, hecho asociado principalmente a la variación de la dirección del viento en cada período climatológico.

Tasa de formación de NO₂ y parámetros cinéticos

En la tabla 4, se relacionan las tasas de formación en función de las concentraciones de NO₂ medidas en la zona de emisión.

Tabla 4. Parámetros cinéticos de la tasa de emisión estimada del dióxido de nitrógeno en épocas de lluvia y de sequía.

Época	d[NO ₂]/dt (ppb/min)		[NO ₂] (ppb)		Parámetros cinéticos		
	Min	Max	Min	Max	m	k	R ²
Lluvia	6,285	21,487	6	56	- 0,353	29,0402	0,318
Sequía	4,185	10,534	5	28	0,177	3,3113	0,079

Shi y Harrison [14] obtuvieron la tasa de formación rápida obtenida a partir de NO a NO₂ medido en un gas de escape diluido de un generador particular de encendido por chispa, entre 1 a 1,5 ppb/min, rango inferior con respecto a este trabajo. Mientras que en el trabajo realizado por Hov y Larssen [15], se encontraron concentraciones de NO₂ entre 50 y 250 ppb entre Diciembre 1980 y Febrero 1981 (Período de invierno) en una calle tipo cañón con un rango entre 0 a 9 ppm/s (0 a 150 ppb/min).

El mayor valor de k en la época de lluvia se puede asociar a la mayor concentración de NO₂ ya mencionada, la cual pudiera ser generada tanto en forma primaria (combustión) como secundaria (fotoquímicamente). Sena [16], encontró altos valores de NO₂/NO y O₃ en el mes de Octubre, mes de lluvia, durante una campaña de monitoreo realizado en Maracaibo por PDVSA-INTEVEP desde 1997 hasta el 2005, específicamente en el sector Saladillo, indicando que la cantidad de ozono dependía de la concentración de NO₂. Por lo tanto, la constante de tasa de formación del poluyente, en parte podría estar asociada a la tasa de absorción específica por la fotólisis del NO₂.

Con respecto a los valores de m, el valor estimado en la época de lluvia es negativo de -0,353, con respecto al obtenido en la época de sequía de 0,117, valores muy bajos con correlaciones de 0,318 y 0,079 respectivamente. Esto indica que la tasa de formación del NO₂ vehicular, no está completamente relacionada con la concentración total medida en la zona de emisión, en cada época; es decir, nuevamente apunta hacia la posible contribución del proceso fotoquímico.

Cabe mencionar adicionalmente que las correlaciones encontradas, constituyen indicios de que el tiempo de viaje entre la fuente y el punto de toma de muestra, es afectado por la dirección y la velocidad del viento [15], conjuntamente con la formación de remolinos por la presencia de estructuras y edificaciones de hasta 4 metros de altura.

Conclusiones

La metodología aplicada para la adecuada ubicación de la zona de emisión, permitió seleccionar a la Curva de Molina perteneciente a la Parroquia Raúl Leoni como sitio de muestreo representativo para estudiar el potencial contaminante asociado con fuentes móviles.

La zona de emisión exhibió los mayores niveles de concentración de NO₂ para ambas zonas de períodos de muestreo, pero evidenciándose en la época de sequía los valores más bajos con reducción de 29 % y 59 % para la zona de emisión y para la de dispersión respectivamente.

Los niveles de NO₂ superiores durante la época lluviosa pueden ser explicables al considerar tanto la baja solubilidad de los gases ácidos débiles a las condiciones ambientales presentes, como la presencia de numerosos “días de calma”, con un promedio en la velocidad del viento inferior en un 80 % a la de sequía (baja dispersión con incremento en las concentraciones de NO₂).

La uniformidad de las concentraciones de NO₂ en la zona de dispersión, indiferentemente del período del año pudiera asociarse con concentraciones de línea base; información de interés para la predicción de calidad de aire a futuro.

Ninguna de las zonas estudiadas excedió el límite venezolano de calidad del aire para NO₂, aunque superó ligeramente en 5%, el límite anual internacional establecido por la Organización Mundial de la Salud y la Comunidad Europea.

Las tasas de formación de NO₂ estimadas presentaron valores entre 6,285 a 21,487 ppb/min para época de lluvia y entre 4,185 a 10,534 ppb/min para la de sequía, indicando mayor tasa de generación en período húmedo.

En relación a la estimación de los parámetros cinéticos k y m , puede concluirse que la obtención en el período lluvioso de un valor de k superior y de un valor negativo de m , es indicativo de que el NO₂ es generado no sólo por el proceso de combustión sino también por vía fotoquímica.

Agradecimiento

Los autores agradecen el apoyo el apoyo financiero otorgado por el Fondo Nacional del Ciencia, Tecnología e Innovación (FONACIT) de Venezuela a través del Proyecto S12001001064, al personal que labora en el Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (DISA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Zulia.

Referencias Bibliográficas

1. ICLAM “Evaluación de la calidad del aire en los municipios Maracaibo, San Francisco y Páez”, Estado Zulia, Venezuela. Instituto de Conservación del Lago de Maracaibo. Maracaibo, Estado Zulia (2004).
2. Meyer, H. “Air Pollution in Cities”, *Atmospheric Environment* 33 (24-25) (1999) 4029-4037.
3. National Academy of Science. “Nitrogen Oxides. Medical and Biological Effects of Environmental Pollutants”. Washington D.C. United States of America (1977).
4. Pandiam, S., Gokhale, S., Kumar, A. “Evaluating effects of traffic and vehicle characteristics on vehicular emissions near traffic intersections”. *Transportation Research Part D* 14. Elsevier Journal, (2009) 180-196.
5. Wark, K., Warner, C. “Contaminación del Aire, Origen y Control”. Editorial Limusa. D.F., México (2005).
6. Machado, A., García, N., Przybylski, J., y Montiel V. “Emisiones de metano en los gases de escape de un motor trabajando con gasolina o GNC como combustible”. *Revista Información Tecnológica*. Vol. 12, No. 1, (2001) p. 51-56.

7. García, N. "Criterios a considerar en la Planificación de una Red de Monitoreo Atmosférico". Trabajo de Ascenso. Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela (1999).
8. Seinfeld, J. H.; Pandis, S. N. "Atmospheric Chemistry and Physics - From Air Pollution to Climate Change". 2nd Edition. John Wiley & Sons, Inc. New York, United of States of America (2006).
9. Baldauf, R., Watkins, N., Heist, D., Bailey, C., Rowley, P., Shores, R. "Near-road air quality monitoring: Factors affecting network design and interpretation of data". *Air Quality, Atmosphere & Health* 2, (1), (2009) 1-9.
10. Araujo, J. Determinación cuantitativa de los contaminantes gaseosos emitidos por la planta Termoelectrica "Ramón Laguna". Trabajo de Grado. Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela (1987)
11. Linares, M. y García, N. "Determinación de los Niveles de Concentración de Dióxido de Nitrógeno. Partículas Suspendidas Totales y Nitratos, en el Aire de Zonas Adyacentes a una Planta Termoelectrica". Trabajo de Grado. División de Postgrado. Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela (1990)
12. Velásquez, H., Díaz, J., González de Nava, M., Sosa de Borrego, B., Cano Y., Morales J. "Concentraciones atmosféricas de dióxido de nitrógeno en dos sitios de Cabimas, Venezuela". *CIENCIA*, 3 Número Especial 13, (1995) 231-240.
13. Anttila, P., Tuovinen, J., Niemi, J. "Primary NO₂ emissions and their role in the development of NO₂ concentrations in a traffic environment". *Atmospheric Environment* 45, (2011) 986-992.
14. Shi, J. P., Harrison R.M. "Rapid NO₂ formation in diluted petrol-fuelled engine exhaust – A source of NO₂ in winter smog episodes". *Atmospheric Environment* 31 (23), (1997) 3857-3866.
15. Hov, Ø., Larssen, S. "Street Canyon Concentrations of Nitrogen Dioxide in Oslo. Measurements and Model Calculations". *Environmental Science Technology* 18, (1984) 82-87.
16. Sena, A. y Díaz, L. "Tendencia de la Concentración de ozono en la ciudad de Maracaibo". I Congreso Internacional de la Cuenca del Lago de Maracaibo, (2006). Maracaibo, Venezuela

Teoremas para la función de Bessel generalizada de tres variables, dos parámetros y un índice

Josefina Matera¹, Ana Isolina Prieto¹, Leda Galué¹ y Susana Salinas de Romero²

¹Universidad del Zulia. Facultad de Ingeniería.
 Centro de Investigación de Matemática Aplicada (CIMA)
 Apartado de correo 10482

²Departamento de Ciencias Básicas. Facultad de Ingeniería. Universidad Rafael Urdaneta
 E-mails: pinamatera@yahoo.es, aisolinap@hotmail.com, lgalue@hotmail.com, susanaderomero@hotmail.com
 Maracaibo-Venezuela

Recibido: 26-05-2015 Aceptado: 25-09-2015

Resumen

Usando el método de la función generadora, obtenemos el teorema de adición, el teorema de multiplicación y el teorema de Graff para la función de Bessel generalizada $J_n(x, y, z; \tau, \delta)$.

Palabras clave: Teorema de adición, teorema de multiplicación, teorema de Graff, función de Bessel generalizada, polinomios de Hermite.

Theorems for the generalized Bessel function of three variables, two parameters and one index

Abstract

Using the generating function method, we obtain the addition theorem, the multiplication theorem and Graff theorem for the generalized Bessel function $J_n(x, y, z; \tau, \delta)$.

Key words: Addition theorem, multiplication theorem, Graff theorem and generalized Bessel function, Hermite polynomials.

Introducción

Las funciones especiales son muy importantes para las ciencias básicas y aplicadas, estas son utilizadas en muchas áreas del conocimiento, entre ellas: matemática, física e ingeniería. Existe un amplio material bibliográfico sobre las funciones especiales, siendo [1, 2, 3] ejemplos muy representativos.

Un caso especial y muy importante de estas funciones especiales son las funciones de Bessel [3]. Dattoli y otros [4] presentan una teoría de la función de Bessel generalizada (FBG). Estas funciones aparecen en la solución de muchos problemas de aplicación.

Se presenta la función de Bessel generalizada (FBG) de dos variables y un parámetro $J_n(x, y; z)$ por medio de la función generadora [5]

$$\exp\left[\frac{x}{2}\left(t - \frac{1}{t}\right) + \frac{y}{2}\left(t^2\tau - \frac{1}{t^2\tau}\right)\right] = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} t^n J_n(x, y; \tau) \quad (1)$$

donde x, y son variables reales y t, τ son complejos diferente de cero con $|t|, |\tau| < \infty$. Se puede ver que para $y=0$,

la función (1) se reduce a la bien conocida función generadora de la función de Bessel de una variable, esto es

$$\exp\left[\frac{x}{2}\left(t - \frac{1}{t}\right)\right] = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} t^n J_n(x), \quad (2)$$

Ana Isolina Prieto y otros [6] introducen la función generadora de la función de Bessel generalizada de tres variables, dos parámetros y un índice por medio de

$$\exp\left[\frac{x}{2}\left(t - \frac{1}{t}\right) + \frac{y}{2}\left(t^2\tau - \frac{1}{t^2\tau}\right) + \frac{z}{2}\left(t^3\delta - \frac{1}{t^3\delta}\right)\right] = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} t^n J_n(x, y, z; \tau, \delta) \quad (3)$$

donde x, y, z son variables reales y t, τ, δ son parámetros complejos con $0 < |t|, |\tau|, |\delta| < \infty$.

Si $z=0$ en (3), se obtiene la función de Bessel (1), y para $y=z=0$ en (3), resulta la ecuación (2).

Los polinomios de Hermite usualmente son un complemento de las FBG. Existe una clase de polinomios de Hermite generalizados de varias variables, denotado por $H_n(x, y)$ para el caso de dos variables, definidos por la función generadora [4]

$$\exp(xt + yt^2) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{t^n}{n!} H_n(x, y), \quad (4)$$

y $H_n(x, y, z)$ para el caso de tres variables, definidos por la función generadora [7]

$$\exp(xt + yt^2 + zt^3) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{t^n}{n!} H_n(x, y, z) \quad (5)$$

Dattoli y otros [8] han investigado la teoría de las funciones de Bessel generalizadas y los polinomios de Hermite.

En este trabajo usamos el método de la función generadora para obtener el teorema de adición, el teorema de multiplicación y el teorema de Graff para las FBG de tres variables, dos parámetros y un índice $J_n(x, y, z; \tau, \delta)$.

Teoremas de la función de Bessel $J_n(x, y, z; \delta, \tau)$

2.1 Teoremas de adición

$$J_n(x \pm u, y \pm v, z \pm w; \tau, \delta) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} J_{n \mp l}(x, y, z; \tau, \delta) J_l(u, v, w; \tau^{\pm 1}, \delta^{\pm 1}) \quad (6)$$

Demostración

Si en (3) se hacen los cambios de variables

$$x = x + u, \quad y = y + v, \quad z = z + w,$$

se tiene

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} t^n J_n(x + u, y + v, z + w; \tau, \delta) = \exp\left[\frac{x+u}{2}\left(t - \frac{1}{t}\right) + \frac{y+v}{2}\left(t^2\tau - \frac{1}{t^2\tau}\right) + \frac{z+w}{2}\left(t^3\delta - \frac{1}{t^3\delta}\right)\right]$$

$$\exp\left[\frac{x}{2}\left(t-\frac{1}{t}\right)+\frac{y}{2}\left(t^2\tau-\frac{1}{t^2\tau}\right)+\frac{z}{2}\left(t^3\delta-\frac{1}{t^3\delta}\right)\right]$$

$$\exp\left[\frac{u}{2}\left(t-\frac{1}{t}\right)+\frac{v}{2}\left(t^2\tau-\frac{1}{t^2\tau}\right)+\frac{w}{2}\left(t^3\delta-\frac{1}{t^3\delta}\right)\right]$$

$$= \sum_{h=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} t^{h+l} J_h(x, y, z; \tau, \delta) J_l(u, v, w; \tau, \delta)$$

Haciendo $n=h+l$, queda

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} t^n J_n(x+u, y+v, z+w; \tau, \delta) =$$

$$= \sum_{n=-\infty}^{\infty} t^n \sum_{l=-\infty}^{\infty} J_{n-l}(x, y, z; \tau, \delta) J_l(u, v, w; \tau, \delta)$$

de donde, al igualar coeficientes de t^n , resulta

$$J_n(x+u, y+v, z+w; \tau, \delta) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} J_{n-l}(x, y, z; \tau, \delta) J_l(u, v, w; \tau, \delta) \quad (7)$$

Análogamente, si en (3) se hacen los cambios $x=x-u$, $y=y-v$ y $z=z-w$, se tiene

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} t^n J_n(x-u, y-v, z-w; \tau, \delta) =$$

$$\exp\left[\frac{x-u}{2}\left(t-\frac{1}{t}\right)+\frac{y-v}{2}\left(t^2\tau-\frac{1}{t^2\tau}\right)+\frac{z-w}{2}\left(t^3\delta-\frac{1}{t^3\delta}\right)\right]$$

$$= \exp\left[\frac{x}{2}\left(t-\frac{1}{t}\right)+\frac{y}{2}\left(t^2\tau-\frac{1}{t^2\tau}\right)+\frac{z}{2}\left(t^3\delta-\frac{1}{t^3\delta}\right)\right]$$

$$\exp\left[\frac{u}{2}\left(\frac{1}{t}-t\right)+\frac{v}{2}\left(\frac{1}{t^2\tau}-t^2\tau\right)+\frac{w}{2}\left(\frac{1}{t^3\delta}-t^3\delta\right)\right]$$

$$= \sum_{h=-\infty}^{\infty} t^h J_h(x, y, z; \tau, \delta) \sum_{l=-\infty}^{\infty} \left(\frac{1}{t}\right)^l J_l(u, v, w; \tau^{-1}, \delta^{-1})$$

entonces,

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} t^n J_n(x-u, y-v, z-w; \tau, \delta) = \sum_{h=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} t^{h-l} J_h(x, y, z; \tau, \delta) J_l(u, v, w; \tau^{-1}, \delta^{-1})$$

Efectuando el cambio $n=h-l$, queda

$$J_h(x, y, z; \tau, \delta) \sum_{n=-\infty}^{\infty} t^n \sum_{l=-\infty}^{\infty} J_{h+l}(x, y, z; \tau, \delta) J_l(u, v, w; \tau^{-1}, \delta^{-1})$$

de donde

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} t^n J_n(x-u, y-v, z-w; \tau, \delta) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} J_{n+l}(x, y, z; \tau, \delta) J_l(u, v, w; \tau^{-1}, \delta^{-1}) \quad (8)$$

Los resultados (7) y (8) se agrupan en (6).

2.2. Teorema de multiplicación

$$J_n(\lambda x, \mu y, \rho z; \tau, \delta) = \lambda^{-n} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{m!} J_{n-m}\left(x, y, z; \frac{\lambda^2 \tau}{\mu}, \frac{\lambda^3 \delta}{\rho}\right) \\ H_m\left(\frac{x}{2}(\lambda^2 - 1); \frac{y \lambda^2 \tau}{2\mu}(\mu^2 - 1) \frac{\lambda^3 \delta z}{2\rho}(\rho^2 - 1)\right) \quad (9)$$

Demostración

Según (3)

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} t^n J_n(\lambda x, \mu y, \rho z; \tau, \delta) = \exp\left[\frac{\lambda x}{2}\left(t - \frac{1}{t}\right) + \frac{\mu y}{2}\left(t^2 \tau - \frac{1}{t^2 \tau}\right) + \frac{\rho z}{2}\left(t^3 \delta - \frac{1}{t^3 \delta}\right)\right] \quad (10)$$

Sumando y restando los términos convenientes, se puede escribir (10) como

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} t^n J_n(\lambda x, \mu y, \rho z; \tau, \delta) = \exp\left[\frac{x}{2}\left(\frac{t}{\lambda} - \frac{\lambda}{t}\right)\right] \exp\left[\frac{y}{2}\left(\frac{t^2 \tau}{\mu} - \frac{\mu}{t^2 \tau}\right)\right] \exp\left[\frac{z}{2}\left(\frac{t^3 \delta}{\rho} - \frac{\rho}{t^3 \delta}\right)\right]$$

$$\exp \left[\frac{x}{2} (\lambda^2 - 1) \frac{t}{\lambda} + \frac{\lambda^2 \tau y}{2\mu} (\mu^2 - 1) \left(\frac{t}{\lambda} \right)^2 + \frac{\lambda^3 \delta z}{2\rho} (\rho^2 - 1) \left(\frac{t}{\lambda} \right)^3 \right]$$

De (2), se tiene

$$\exp \left[\frac{x}{2} \left(\frac{t}{\lambda} - \frac{\lambda}{t} \right) \right] = \sum_{h=-\infty}^{\infty} \left(\frac{t}{\lambda} \right)^h J_h(x);$$

$$\exp \left[\frac{y}{2} \left(\frac{t^2 \tau}{\mu} - \frac{\mu}{t^2 \tau} \right) \right] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} t^{2k} \left(\frac{\tau}{\mu} \right)^k J_k(y)$$

y

$$\exp \left[\frac{z}{2} \left(\frac{t^3 \delta}{\rho} - \frac{\rho}{t^3 \delta} \right) \right] = \sum_{l=-\infty}^{\infty} t^{3l} \left(\frac{\delta}{\rho} \right)^l J_l(z)$$

y de la función generadora (5)

$$\exp \left[\frac{x}{2} (\lambda^2 - 1) \frac{t}{\lambda} + \frac{\lambda^2 \tau y}{2\mu} (\mu^2 - 1) \left(\frac{t}{\lambda} \right)^2 + \frac{\lambda^3 \delta z}{2\rho} (\rho^2 - 1) \left(\frac{t}{\lambda} \right)^3 \right] =$$

$$\sum_{m=0}^{\infty} \left(\frac{t}{\lambda} \right)^m \frac{1}{m!} H_m \left(\frac{x}{2} (\lambda^2 - 1), \frac{\lambda^2 \tau y}{2\mu} (\mu^2 - 1), \frac{\lambda^3 \delta z}{2\rho} (\rho^2 - 1) \right)$$

Luego, se tiene

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} t^n J_n(\lambda x, \mu y, \rho z; \tau, \delta) = \sum_{h,k,l=-\infty}^{\infty} t^{h+2k+3l} \left(\frac{1}{\lambda} \right)^h J_h(x) \left(\frac{\tau}{\mu} \right)^k J_k(y) \left(\frac{\delta}{\rho} \right)^l J_l(z)$$

$$\sum_{m=0}^{\infty} \left(\frac{t}{\lambda} \right)^m \frac{1}{m!} H_m \left(\frac{x}{2} (\lambda^2 - 1), \frac{\lambda^2 \tau y}{2\mu} (\mu^2 - 1), \frac{\lambda^3 \delta z}{2\rho} (\rho^2 - 1) \right)$$

Haciendo cambio de índices $h=s-2k-3l$, queda

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} t^n J_n(\lambda x, \mu y, \rho z; \tau, \delta) = \sum_{s,k,l=-\infty}^{\infty} \left(\frac{t}{\lambda} \right)^s \left(\frac{\lambda^2 \tau}{\mu} \right)^k \left(\frac{\lambda^3 \delta}{\rho} \right)^l J_{s-2k-3l}(x) J_k(y) J_l(z) C$$

$$\sum_{m=0}^{\infty} \left(\frac{t}{\lambda} \right)^m \frac{1}{m!} H_m \left[\frac{x}{2} (\lambda^2 - 1), \frac{\lambda^2 \tau y}{2\mu} (\mu^2 - 1), \frac{\lambda^3 \delta z}{2\rho} (\rho^2 - 1) \right]$$

Usando [6, pág. (33), (4)]

$$J_n(x, y, z; \tau, \delta) = \sum_{h,k=-\infty}^{\infty} \tau^h \delta^k J_{n-2h-3k}(x) J_h(y) J_k(z)$$

resulta

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} t^n J_n(\lambda x, \mu y, \rho z; \tau, \delta) = \sum_{s=-\infty}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \left(\frac{\tau}{\lambda} \right)^{s+m} \frac{1}{m!} J_s \left(x, y, z; \frac{\lambda^2 \tau}{2\mu}, \frac{\lambda^3 \delta}{\rho} \right) C$$

$$H_m \left[\frac{x}{2} (\lambda^2 - 1), \frac{\lambda^2 \tau y}{2\mu} (\mu^2 - 1), \frac{\lambda^3 \delta z}{2\rho} (\rho^2 - 1) \right]$$

Haciendo cambio de índices $s = n - m$, se obtiene

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} t^n J_n(\lambda x, \mu y, \rho z; \tau, \delta) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} t^n \lambda^{-n} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{m!} J_{n-m} \left(x, y, z; \frac{\lambda^2 \tau y}{\mu}, \frac{\lambda^3 \delta}{\rho} \right)$$

$$H_m \left[\frac{x}{2} (\lambda^2 - 1), \frac{\lambda^2 \tau y}{2\mu} (\mu^2 - 1), \frac{\lambda^3 \delta z}{2\rho} (\rho^2 - 1) \right]$$

Igualando coeficientes de t^n , se obtiene (9).

2.3. Teorema de Graf

Sea $J_n(x, y, z; \tau, \delta)$ una función de Bessel generalizada de tres variables, dos parámetros y un índice, como definida en (3), entonces

$$\left(\frac{x - \frac{u}{\xi}}{x - u\xi} \right)^{\frac{k}{2}} J_k(a, b, c; \gamma, \rho) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \xi^m J_{m+k}(x, y, z; \tau, \delta) J_m(u, v, w, \tau', \delta') \quad (11)$$

donde x, y, z, u, v, w, a, b y c , son variables reales; $\tau, \delta, \tau', \delta', \gamma, \rho$ son parámetros complejos con $0 < |\tau|, |\delta|, |\tau'|, |\delta'|, |\gamma|, |\rho| < \infty$, y

$$a(x, u, \xi) = \sqrt{\left(x - u\xi\right)x - \frac{u}{\xi}} \quad (12)$$

$$b(y, v, \xi, \tau, \tau') = \sqrt{\left(y\tau - \frac{v}{\xi^2 \tau'}\right)\left(\frac{y}{\tau} - v\xi^2 \tau'\right)} \quad (13)$$

$$c(z, w, \xi, \delta, \delta') = \sqrt{\left(z\delta - \frac{w}{\xi^3 \delta'}\right)\left(\frac{z}{\delta} - w\xi^3 \delta'\right)} \quad (14)$$

$$\gamma(x, y, u, v, \xi, \tau, \tau') = \sqrt{\frac{y\tau - \frac{v}{\xi^2 \tau'}}{\frac{y}{\tau} - v\xi^2 \tau'}} \left(\frac{x - u\xi}{x - \frac{u}{\xi}} \right) \quad (15)$$

$$\rho(x, z, u, w, \xi, \delta, \delta') = \sqrt{\frac{z\delta - \frac{w}{\xi^3 \delta'}}{\frac{z}{\delta} - w\xi^3 \delta'}} \left(\frac{x - u\xi}{x - \frac{u}{\xi}} \right)^{3/2} \quad (16)$$

Demostración

Considerando el producto de dos funciones $J_n(x, y, z; \tau, \delta)$ y usando la función generadora

$$\exp\left[\frac{x}{2}\left(t-\frac{1}{t}\right)+\frac{y}{2}\left(t^2\tau-\frac{1}{t^2\tau}\right)+\frac{z}{2}\left(t^3\delta-\frac{1}{t^3\delta}\right)\right]=\sum_{n=-\infty}^{+\infty}t^nJ_n(x,y,z;\tau,\delta)$$

se obtiene

$$\exp\left[\frac{x}{2}\left(t-\frac{1}{t}\right)+\frac{y}{2}\left(t^2\tau-\frac{1}{t^2\tau}\right)+\frac{z}{2}\left(t^3\delta-\frac{1}{t^3\delta}\right)\right]$$

$$\exp\left[\frac{u}{2}\left(s-\frac{1}{s}\right)+\frac{v}{2}\left(s^2\tau'-\frac{1}{s^2\tau'}\right)+\frac{w}{2}\left(s^3\delta'-\frac{1}{s^3\delta'}\right)\right]=$$

$$\sum_{m,n=-\infty}^{+\infty}t^n s^m J_n(x,y,z;\tau,\delta)J_m(u,v,w,\tau',\delta').$$

Haciendo el cambio $t \rightarrow \frac{\xi}{t}$, se tiene

$$\exp\left[\frac{x}{2}\left(t-\frac{1}{t}\right)+\frac{y}{2}\left(t^2\tau-\frac{1}{t^2\tau}\right)+\frac{z}{2}\left(t^3\delta-\frac{1}{t^3\delta}\right)\right]$$

$$\exp\left[\frac{u}{2}\left(\frac{\xi}{t}-\frac{t}{\xi}\right)+\frac{v}{2}\left(\frac{\xi^2\tau'}{t^2}-\frac{t^2}{\xi^2\tau'}\right)+\frac{w}{2}\left(\frac{\xi^3\delta'}{t^3}-\frac{t^3}{\xi^3\delta'}\right)\right]=$$

$$\sum_{m,n=-\infty}^{+\infty}t^{n-m}\xi^m J_n(x,y,z;\tau,\delta)J_m(u,v,w,\tau',\delta').$$

Aplicando las propiedades de las exponenciales en el lado izquierdo de la ecuación, resulta

$$\exp\left[\frac{t}{2}\left(x-\frac{u}{\xi}\right)-\frac{1}{2t}\left(x-u\xi\right)+\frac{t^2}{2}\left(y\tau-\frac{v}{\xi^2\tau'}\right)-\frac{1}{2t^2}\left(\frac{y}{\tau}-v\xi^2\tau'\right)+\frac{t^3}{2}\left(z\delta-\frac{w}{\xi^3\delta'}\right)-\right.$$

$$\left.\frac{1}{2t^3}\left(\frac{z}{\delta}-w\xi^3\delta'\right)\right]=\sum_{m,n=-\infty}^{+\infty}t^{n-m}\xi^m J_n(x,y,z;\tau,\delta)J_m(u,v,w,\tau',\delta'). \quad (17)$$

Ahora, haciendo los cambios

$$t\left(x-\frac{u}{\xi}\right)=ar \quad (18)$$

$$\frac{(x-u\xi)}{t}=\frac{a}{r} \quad (19)$$

$$t^2\left(y\tau-\frac{v}{\xi^2\tau'}\right)=br^2\gamma \quad (20)$$

$$\frac{\left(\frac{y}{\tau}-v\xi^2\tau'\right)}{t^2}=\frac{b}{r^2\gamma} \quad (21)$$

$$t^3 \left(z\delta - \frac{w}{\xi^3 \delta'} \right) = cr^3 \rho \quad (22)$$

$$\frac{\left(\frac{z}{\delta} - w\xi^3 \delta' \right)}{t^3} = \frac{c}{r^3 \rho}, \quad (23)$$

y sustituyendo (18)-(22) en (17), resulta

$$\exp \left[\frac{a}{2} \left(r - \frac{1}{r} \right) + \frac{b}{2} \left(r^2 \gamma - \frac{1}{r^2 \gamma} \right) + \frac{c}{2} \left(r^3 \rho - \frac{1}{r^3 \rho} \right) \right] = \sum_{m,n=-\infty}^{+\infty} t^{n-m} \xi^m J_n(x, y, z; \tau, \delta) J_m(u, v, w; \tau', \delta').$$

Efectuando el cambio de índice $k = n - m$ y usando (3), se obtiene

$$\sum_{k=-\infty}^{+\infty} r^k J_k(a, b, c; \gamma, \rho) = \sum_{k,m=-\infty}^{+\infty} t^k \xi^m J_{k+m}(x, y, z; \tau, \delta) J_m(u, v, w; \tau', \delta').$$

De (18) y (19)

$$r = t \sqrt{\frac{x - \frac{u}{\xi}}{x - u\xi}} \quad (24)$$

y sustituyendo en la ecuación anterior, queda

$$\sum_{k=-\infty}^{+\infty} t^k \left(\frac{x - \frac{u}{\xi}}{x - u\xi} \right)^{\frac{k}{2}} J_k(a, b, c; \gamma, \rho) = \sum_{k,m=-\infty}^{+\infty} t^k \xi^m J_{k+m}(x, y, z; \tau, \delta) J_m(u, v, w; \tau', \delta').$$

Al igualar coeficientes de t^k , se concluye que

$$\sum_{m=-\infty}^{+\infty} \xi^m J_{k+m}(x, y, z; \tau, \delta) J_m(u, v, w; \tau', \delta') = \left(\frac{x - \frac{u}{\xi}}{x - u\xi} \right)^{\frac{k}{2}} J_k(a, b, c; \gamma, \rho).$$

Por otro lado, los resultados (12)-(16) se obtienen como se indica en la Tabla 1:

Tabla 1. Deducción de los resultados (12-16)

Ecuación Usada	Resultado Obtenido
(18) y (19)	$a(x,u;\xi)$
(20) y (21)	$b(y,v, \xi, \tau, \tau')$
(22) y (23)	$c(z,w, \xi, \delta, \delta')$
(20), (24) y (13)	$\gamma(x,y,u,v,\xi,\tau,\tau')$
(22), (24) y (14)	$\rho(x,z,u,w,\xi,\delta,\delta')$

Agradecimiento

Las autoras agradecen al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad del Zulia por el soporte financiero brindado.

Bibliografía

1. Erdelyi, A., Higher Transcendental Function, 3 vols., Mc Graw-Hill, New York, 1953-1955.
2. Lebedev, N.N., Special Functions and Their Applications, Dover Publ. Co. New York (1992).
3. Watson, G.N., A Treatise on the Theory of Bessel Functions, Cambridge University Press, London, (1952).
4. Dattoli, G., Torre, A., Lorenzuta, S., Maino, G. and Chiccoli, C. Theory of Generalized Bessel Functions II. Nuovo Cimento B106 (1991), 21-51.
5. Chiccoli, C., Dattoli, G., Lorenzuta, S., Maino, G. and Torre, A., Theory of one-parameter generalized Bessel functions. Quaderni del Gruppo Nazionale per L'Informatica Matematica del CNR, No. 1, Firenze (1992), 1-47.
6. Ana Isolina Prieto, Josefina Matera, Leda Galué y Susana Salinas, Algunos resultados de la función de Bessel de tres variable y dos parámetros. Revista Tecnocientífica URU, No. 6, (Enero-Junio 2014), 31-41.
7. Dattoli, G., Chiccoli, C., Lorenzuta, S., Maino, G. and Torre, A., Generalized Bessel Functions and Generalized Hermite Polynomials. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 178, 509-516, (1993).
8. Dattoli, G., Torre, A., Lorenzuta, S. and Maino, G., Generalized forms of Bessel functions and Hermite polynomials. Ann Numer. Math. No. 2, (1995), 211-232.

Aporte nutricional de un biosólido avícola obtenido en un proceso de digestión aerobia sobre un cultivo de cebollín

Leopoldo Ruesga¹, María Ocando¹, Miguel López¹, Enyris Gutiérrez¹, Yaxcelys Caldera² y Edixon Gutiérrez³

¹Centro de Investigación del Agua (CIA). Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia. Maracaibo, estado Zulia, Venezuela. *leopoldoruesga@gmail.com, egutierr12@gmail.com

²Laboratorio de Investigaciones Ambientales del Núcleo Costa Oriental del Lago (LIANCOL). Universidad del Zulia. Cabimas, estado Zulia. Venezuela. yaxcelysc@gmail.com

³Escuela de ingeniería Química. Facultad de Ingeniería. Universidad Rafael Urdaneta. Maracaibo, estado Zulia, Venezuela.

Recibido: 25-09-2015 Aceptado: 17-11-2015

Resumen

Los biosólidos generados en los sistemas de tratamiento de aguas contienen macronutrientes y micronutrientes que son de gran importancia a nivel agronómico. En esta investigación se evaluó el aporte nutricional de un biosólido avícola, obtenido en un proceso de digestión aerobia, sobre un cultivo de cebollín (*Allium fistulosum* L.). El biosólido fue recolectado a la salida del sistema de tratamiento de lodos de una industria avícola y se trabajó con tres tratamientos 0, 20 y 40 Mg.ha⁻¹ de biosólido y un control utilizando fertilizante de origen químico 15:15:15. Se encontraron aumentos significativos en los contenidos de nitrógeno total y fósforo extraíble en el suelo acondicionado con respecto al control, mientras que desde el punto de vista morfológico se obtuvo la mayor altura de hoja para el tratamiento de 40 Mg.ha⁻¹. En cuanto a los parámetros microbiológicos, los biosólidos empleados mostraron un contenido de coliformes fecales de 3,103 NMP.g⁻¹ constituyéndose en lodos clase B según la EPA, mientras que en las plantas cosechadas no se detectó coliformes fecales y *Salmonella*. La aplicación de biosólidos avícolas de la industria zuliana, estabilizados de manera aerobia, representa una alternativa para suplir los requerimientos nutricionales del cultivo de cebollín.

Palabras clave: Biosólido, industria avícola, digestión aerobia, cebollín (*Allium fistulosum* L.)

Nutritional contribution of a poultry biosolid obtained in a process of aerobic digestion on the growing of green onion

Abstract

Biosolids generated in wastewater treatment systems contain macronutrients and micronutrients that are of great importance in the agronomic field. In this study the nutritional contribution of a poultry biosolids obtained in a process of aerobic digestion on the growing of green onion (*Allium fistulosum* L.) was evaluated. The biosolid was collected at the outlet of the sludge's treatment system from the poultry industry and three treatments were evaluated 0, 20 and 40 Mg.ha⁻¹ of biosolid and a control using chemical fertilizer 15:15:15. Significant increases in the contents of total nitrogen and extractable phosphorus were found in the soil conditioned with regard to the control, whereas from the morphologic point of view the major height of leaf was obtained for the treatment of 40 Mg.ha⁻¹. Concerning to the microbiological parameters, the biosolids employed showed a content of 3.103 NMP.g⁻¹ fecal coliforms constituting class B sludge according to the EPA, while in the harvested plants it was not detected to

contain fecal coliform and Salmonella. The application of biosolids from the Zulia's poultry industry, aerobically stabilized, is an alternative to meet the nutritional requirements of growing green onions.

Key words: Biosolid, poultry industry, aerobic digestion, green onions (*Allium fistulosum* L.).

Introducción

La disposición inadecuada de los biosólidos generados en procesos de tratamiento de aguas puede generar distintos problemas ambientales, derivados de una mala gestión de estos residuos, como son: la proliferación de vectores, la contaminación de suelos y aguas subterráneas, entre otros [1,2]. Como alternativa de reutilización su uso como acondicionadores en los suelos mejora sus propiedades texturales, dado que el material húmico que contienen mejora las capacidades físicas y la capacidad de intercambio catiónico del suelo [3]. Adicionalmente, los biosólidos de acuerdo a sus características y procesos de origen, contienen macronutrientes y micronutrientes esenciales para la fertilización de cultivos [4].

Debido al alto crecimiento poblacional existe un aumento en la generación de biosólidos, esto aunado a un crecimiento en la demanda de fertilizantes y al alto costo de los mismos, por lo que, una alternativa atractiva para muchos agricultores, a los fertilizantes químicos comerciales, es el uso de fertilizantes orgánicos como los biosólidos [5]. Actualmente, la industria avícola zuliana utiliza como alternativa de disposición de los biosólidos el relleno sanitario lo que genera gasto de transporte asociados por lo que se plantea buscar una opción más favorable que permita darle un valor adicional a este residuo.

La utilización de los biosólidos en Venezuela no está regulada por lo que sus posibilidades de reutilización son limitadas [6], en contraste, en países como Estados Unidos, Chile y México su manejo está regulado por normas que establecen las especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final; al cumplir dichas normas los lodos residuales pueden ser aprovechados como abono orgánico en suelos agrícolas [7,8,9].

El estudio de la dinámica de los componentes nutricionales presentes en el lodo residual y su efecto sobre el cultivo, es fundamental para establecer un régimen óptimo de aplicación, ya que los biosólidos liberan lentamente los nutrientes, los cuales permanecen disponibles para la planta durante el ciclo de cultivo [10], por ello el objetivo de este estudio fue evaluar el aporte nutricional de un biosólido avícola, obtenido en un proceso de digestión aerobia, sobre un cultivo de cebollín.

Parte Experimental

La unidad de estudio experimental consistió en una barbacoa construida dentro de un umbráculo localizado sobre una parcela experimental, ubicada en el Centro de Investigación del Agua (CIA) de la Universidad del Zulia. La misma se dividió en 12 unidades experimentales con los diferentes tratamientos. Cada unidad experimental tuvo un área de 0,80 metros cuadrados con 12 plantas de cebollín separadas 20 cm aproximadamente una de la otra.

Se evaluaron cuatro tratamientos T0 blanco, T20 suelo preacondicionado con 20 Mg.ha⁻¹ de lodo, T40 suelo preacondicionado con 40 Mg.ha⁻¹ de lodo y TF que es un suelo enriquecido químicamente empleando fertilizante químico comercial de fórmula 15:15:15. Se aplicaron análisis de comparación de medias por Tukey y el procesamiento de la información se realizó empleando el paquete estadístico SPSS.

El biosólido utilizado provino del tratamiento de agua residual generada durante el proceso de matanza de aves en una industria avícola ubicada en el estado Zulia, Venezuela. El sistema de tratamiento de aguas residuales tiene un proceso de lodos activados, y el lodo es estabilizado mediante digestión aerobia y secado en lechos de secado. El suelo utilizado para esta investigación fue extraído de una zona de cultivo de cebollín de la región zuliana y presentó un pH promedio de 8,23 con contenido de arenas de 80%, de limo de 15% y de arcilla de 5%, considerándose de clasificación textural Arenoso Francoso.

Se realizó el proceso de plantación a partir de una cepa inicial donde se seleccionaron las plantas más grandes, vigorosas y sanas y de características uniformes, luego se procedió al cortado del tallo verdadero para inducir un rápido crecimiento y se realizó la plantación a una profundidad de 4-5 cm. El ciclo de cultivo para el cebollín

comprendió un período de ocho semanas necesarias para el desarrollo de las plantas, durante las cuales se tomaron muestras de suelo de cada unidad experimental y se registraron las variables morfológicas de las plantas.

Las variables fisicoquímicas que se midieron en las muestras de suelos recolectadas fueron: pH, conductividad eléctrica, contenido de nitrógeno total Kjeldahl, contenido de fósforo, contenido de potasio y contenido de metales los cuales fueron determinados mediante los métodos establecidos para muestras de suelos y plantas por Ryan et al. [11]; mientras que los contenidos de coliformes fecales y de Salmonella fueron medidos empleando el estándar método para análisis de muestras de agua [12].

Resultados y Discusión

Caracterización inicial del biosólido

En la Tabla 1 se observa la caracterización inicial del biosólido avícola, este presentó un pH de 5,80, una conductividad eléctrica de 165,07 $\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$ y un contenido de materia orgánica de 65,00 %. Desde el punto de vista nutricional los contenidos de nitrógeno total Kjeldahl y de fósforo total fueron de 4,48% y de 3,38% respectivamente. Estos contenidos presentes en el biosólido de origen avícola son superiores a los reportados por autores [13,14,15] e indican el alto valor potencial a nivel nutricional. Rathod et al. [13] obtuvieron valores de 2,00% de nitrógeno para lodo residual doméstico, mientras que Salcedo et al. [14] encontraron valores de 2,00% de fósforo para lodo residual doméstico con aplicaciones satisfactorias para cultivos cebolla (*Allium Cepa*) y de maíz.

Tabla 1. Caracterización fisicoquímica del lodo residual.

Parámetro	Valor
pH	5,80
Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$)	165,07
Nitrógeno Total Kjeldahl (%)	4,48
Contenido de fósforo total (% P_2O_5)	3,38
Contenido de potasio total (%K)	0,17
Contenido de materia orgánica (%)	65,00

Con relación a los factores que limitan la aplicación de biosólidos en actividades agrícolas se evaluaron los contenidos de metales regulados por normativas internacionales como lo son el plomo, cadmio, cromo, zinc y cobre obteniendo contenidos menores a los establecidos en las normas EPA y SERMARAT (Tabla 2). Estos resultados obtenidos coinciden con los obtenidos por Bedoya et al. [15] quienes reportan resultados similares al evaluar los contenidos de cromo, cadmio y plomo en lodos residuales de origen doméstico, todos los valores estuvieron dentro de los parámetros recomendados por la norma.

Desde el punto de vista microbiológico, el biosólido avícola presenta un contenido de coliformes fecales mayor a 1000 NMP.g-1 (Tabla 2), por lo que excede el valor recomendado por las normativas para caracterizarse como lodo clase A, apropiado para su uso a nivel agronómico. Sin embargo, autores como Torres et al. [16] sugieren que la aplicación de tratamientos posteriores como el tratamiento alcalino o el compostaje pueden mejorar las características microbiológicas del lodo residual.

Tabla 2. Contenido de metales y características microbiológicas del biosólido.

Parámetro	Biosólido avícola	Estados Unidos (EPA) ⁷	México (SERMARAT) ⁹
Plomo (mg.kg ⁻¹)	35,45	300	300
Cadmio (mg.kg ⁻¹)	3,52	40	39
Cromo (mg.kg ⁻¹)	32,42	3000	1200
Zinc (mg.kg ⁻¹)	286,15	2800	2000
Cobre (mg.kg ⁻¹)	394,17	1600	1000
Coliformes fecales (NMP.g ⁻¹)	3*10 ³	Menor de 1000 (Lodo clase A)	Menor de 1000 (Lodo clase A)
<i>Salmonella</i> (NMP.g ⁻¹)	Ausente	Ausente	Ausente

Características fisicoquímicas durante el proceso de cultivo

Los valores de pH encontrados a lo largo del periodo de cultivo se observan en la Figura 1, presentándose en la fase inicial del ciclo valores mínimos de 8,04 y máximos de 8,41 unidades, considerados de neutros a medianamente básicos. Se observa que el tratamiento control y el blanco mantuvieron los valores de pH a lo largo del cultivo, mientras que en los tratamientos T20 y T40 el pH decreció, desde pH de 8,10 y 8,04 hasta valores de 7,14 y 6,43, respectivamente.

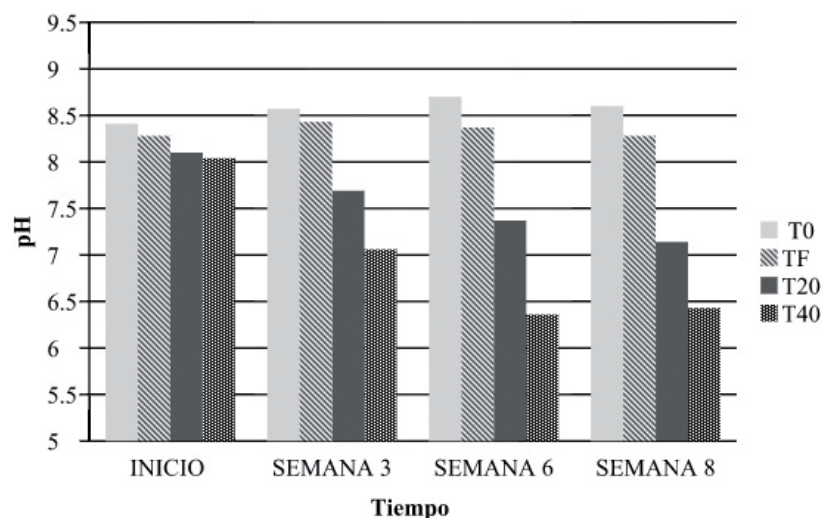


Figura 1. Valores de pH en el suelo acondicionado durante el ciclo de cultivo.

Por otra parte, a medida que la dosis de biosólido en el suelo es mayor el pH disminuye, por esta razón se podría decir que el material aporta acidez al suelo acondicionado. Además, el suelo acondicionado fue más ácido que T0 y TF; coincidiendo así con Ortiz et al. [17] quienes en su investigación encontraron que después de la adición del lodo residual al suelo el pH presentó diferencias significativas ya que cambió de alcalino a ligeramente ácido (7,23 a 6,82). Igualmente, Caldera et al. [18] observaron una disminución del valor del pH con respecto al incremento de la dosis de lodo y con relación al valor inicial del suelo, sugirieron que esto podría deberse al aporte de acidez del lodo que estaban empleando.

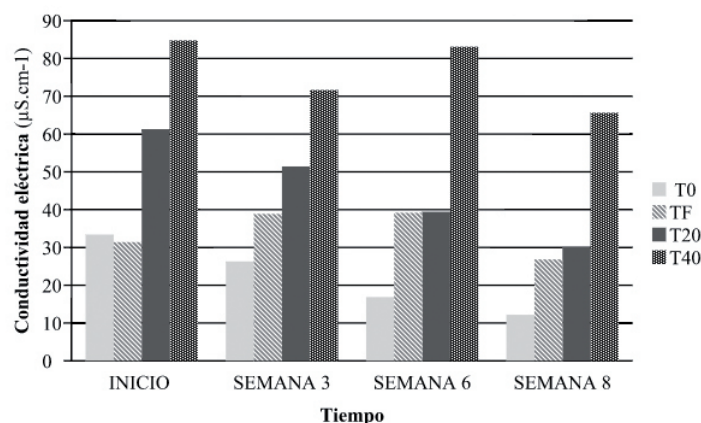


Figura 2. Valores de conductividad eléctrica en el suelo acondicionado durante el ciclo de cultivo.

En la Figura 2, se puede observar que la conductividad eléctrica es mayor en los tratamientos T20 y T40 que en los TF y T0. Con relación al nivel de biosólido aplicado, la mayor conductividad eléctrica se encontró en T40 de 84,77 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ y este comportamiento se mantuvo a lo largo del ciclo, siendo originado por la presencia de sales en el biosólido avícola que mostró un valor de conductividad marcadamente mayor al valor de conductividad del suelo.

Estos resultados coinciden con los obtenidos por Jamil et al. [19] quienes mostraron en su estudio que la conductividad eléctrica en el suelo con tratamiento de lodo aumentó luego de la aplicación de lodos residuales. Adicionalmente, se puede observar que entre el principio y el final del ciclo de cultivo hubo una disminución en los niveles de conductividad para todos los tratamientos, posiblemente debido a que las sales solubles en el suelo se ionizaron produciendo así las cargas necesarias para la captación de los cationes contenidos en los nutrientes del suelo acondicionado producto del riego periódico.

Contenido de nitrógeno total Kjeldahl, fósforo extraíble y potasio intercambiable en el suelo acondicionado

Con respecto al contenido de nitrógeno total Kjeldahl en el suelo acondicionado se puede observar en la Tabla 3 que se evidenciaron diferencias significativas con relación al nivel de biosólido aplicado. El tratamiento T40 presentó el mayor contenido de nitrógeno de 602,43 mg.kg^{-1} al inicio del ciclo de cultivo y a su vez los tratamientos T20 y TF presentaron contenidos de nitrógeno más elevados que el presentado por T0 de manera significativa.

Este aumento en el contenido de nitrógeno coincide con los resultados presentados por Rathod et al. [13] quienes evaluaron la utilización de lodo residual durante el cultivo de cebolla (*Allium Cepa*) encontrando aumento en los niveles de nitrógeno en el suelo acondicionado con lodo residual, destacando que el lodo residual puede ser un sustituto para suplir el nitrógeno requerido por esta planta. Por otra parte, para todos los tratamientos incluyendo T0, se presentó una disminución gradual del contenido de nitrógeno a medida que transcurría el ciclo de cultivo lo que puede originarse por distintos factores entre los cuales están el consumo por parte de las plantas, la volatilización del nitrógeno y la lixiviación ocasionada por el riego periódico.

Tabla 3. Contenido de nitrógeno total, fósforo extraíble y de potasio intercambiable en el suelo acondicionado (mg.kg-1).

Tratamiento	Nitrógeno Total		Fósforo extraíble		Potasio intercambiable	
	Inicio	Final	Inicio	Final	Inicio	Final
T0	124,68 ^c	91,76 ^b	19,81 ^b	22,48 ^b	41,13 ^b	39,40 ^b
TF	231,16 ^{bc}	98,07 ^b	68,37 ^a	28,42 ^b	98,97 ^a	98,07 ^a
T20	434,31 ^{ab}	196,14 ^b	68,88 ^a	63,32 ^a	61,63 ^{ab}	42,80 ^b
T40	602,43 ^a	441,31 ^a	65,16 ^a	68,20 ^a	75,63 ^{ab}	42,15 ^b

Letras diferentes en cada columna indican medias significativamente diferentes por Tukey a un $\alpha < 0,05$

Con respecto al contenido de fósforo extraíble en el suelo acondicionado respecto al nivel de biosólido aplicado se obtuvo el mayor contenido de fósforo extraíble para T20 al inicio del ciclo de 68,88 mg.kg-1. Este valor fue significativamente similar al obtenido para TF indicando un aporte similar de este nutriente en su forma extraíble por parte del biosólido, efecto que coincide con el estudio presentado por Potisek et al. [20] quienes reportaron aumentos significativos en el fósforo luego de la aplicación de lodos residuales, concluyendo que este material es una fuente potencial de nutrimentos para las plantas.

Es necesario destacar que al final del ciclo de cultivo los valores de fósforo para los tratamientos donde se utilizó biosólidos se mantienen estables, en contraste con los presentados por el fertilizante químico donde se observó una disminución hasta niveles significativamente similares al blanco en la semana 8. Este comportamiento puede relacionarse al efecto gradual de disponibilidad de este nutriente característico de los fertilizantes orgánicos y a la poca movilidad de este nutriente. Finalmente, los tratamientos donde se aplicó biosólido muestran cantidades significativamente iguales de potasio que el suelo sin ningún tipo de tratamiento (T0), lo que evidencia un escaso aporte por parte del lodo de este elemento en su forma extraíble.

Caracterización de las plantas de cebollín al momento de la cosecha

Durante el análisis de comparación de medias establecido en la Tabla 4 es importante destacar que se presentaron diferencias significativas relacionadas al nivel de biosólido aplicado cuando se analizó la variable altura de la hoja y diámetro del pseudotallo, donde se observó que la mayor longitud la presentaron las plantas que crecieron en suelos que recibieron biosólidos avícolas (T20 y T40), siendo el mayor T40 con una altura promedio de 32,97 cm y un diámetro de 5,23 cm. En contraste, no se detectaron diferencias significativas relacionadas a las variables número de macollas y longitud de la raíz probablemente debido a la baja sensibilidad de estos parámetros y a la dispersión mostrada en los resultados para estos indicadores.

Autores como García et al. [21] evaluaron los niveles de minerales en cultivos sembrados en suelos preparados con lodos de industrias lácteas y afirman que el mejor crecimiento de la planta se observó cuando se emplearon las dosis de T20 y T40 coincidiendo así con los resultados obtenidos para este estudio, por lo que se deduce que los nutrientes aportados por el biosólido avícola generan un mejor crecimiento en cuanto a la altura de las plantas de cebollín y otras variables morfológicas cuando se emplean niveles adecuados de lodo que permiten suplir los requerimientos nutricionales de las plantas en niveles equilibrados.

Tabla 4. Variables morfológicas de las plantas al final del ciclo de cultivo.

Tratamiento	Longitud de la hoja (cm)	Diámetro del pseudotallo(cm)	Número de macollas	Longitud de la raíz
T0	22,40 ^c	3,37 ^c	15,00 ^a	6,10 ^a
TF	27,67 ^{ab}	3,90 ^{ab}	19,00 ^a	5,90 ^a
T20	28,80 ^{ab}	4,50 ^{ab}	14,00 ^a	5,10 ^a
T40	32,97 ^a	5,23 ^a	13,67 ^a	5,53 ^a

Letras diferentes en cada columna indican medias significativamente diferentes por Tukey a un $\alpha < 0,05$

Por otra parte, en la Tabla 5 se observa el contenido de metales y de indicadores microbiológicos en las plantas de cebollín al momento de la cosecha resaltándose que los contenidos de cromo, cobalto y cobre presentes en el tejido de las plantas no aumentaron de manera significativa con respecto al nivel de biosólido aplicado. Este comportamiento es comparable al presentado por Hossain et al. [22] quienes evaluaron el contenido de diversos metales incluyendo los metales mencionados y determinaron que no existió una bioacumulación significativa en frutos de tomate empleando lodo residual

Tabla 5. Contenido de metales y de indicadores microbiológicos en las plantas de cebollín al momento de la cosecha.

Tratamiento	T0	T20	T40
Cromo (mg.kg ⁻¹)	3.24 ^a	3.80 ^a	3.67 ^a
Zinc (mg.kg ⁻¹)	44,72 ^b	63,02 ^{ab}	71.76 ^a
Cobalto (mg.kg ⁻¹)	1.70 ^a	2.01 ^a	2.31 ^a
Cobre (mg.kg ⁻¹)	8.32 ^a	10.62 ^a	11.83 ^a
Coliformes fecales (NMP.g ⁻¹)	Ausente	Ausente	Ausente
<i>Salmonella</i> (NMP.g ⁻¹)	Ausente	Ausente	Ausente

Letras diferentes en cada columna indican medias significativamente diferentes por Tukey a un $\alpha < 0,05$

En contraste, el nivel de zinc en las plantas fue mayor significativamente para T40 (71,76 mg.kg-1) con respecto al blanco (44,72 mg.kg-1). Este aumento es consecuencia del aporte del biosólido que posee un contenido de zinc de 286,15 mg.kg-1 mayor al del suelo (48,24 mg.kg-1). Este efecto acumulativo de zinc concuerda con el obtenido por Day et al. [23], quienes encontraron un incremento en el nivel de zinc en las hojas para un cultivo de *D. morfolium*. Finalmente, desde el punto de vista microbiológico en las plantas cosechadas no se detectó contenido de coliformes fecales y de *Salmonella* indicando que el cultivo no presenta contaminación microbiológica de acuerdo a estos dos indicadores importantes.

Conclusiones

La aplicación de biosólidos avícolas de la industria zuliana, estabilizados de manera aerobia, representa una alternativa para suplir los requerimientos nutricionales del cultivo de cebollín.

El biosólido avícola, estabilizados de manera aerobia, no presenta limitaciones de acuerdo al contenido de metales, en contraste, su contenido coliformes fecales indica la necesidad de postratamiento para su acondicionamiento microbiológico.

Agradecimiento

Al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico (CONDES) de la Universidad del Zulia (LUZ) por el financiamiento de este proyecto.

Referencias Bibliográficas

1. Ferradás M., Núñez A. y Seoane S. Riesgos de contaminación por lixiviados de enmiendas orgánicas estabilizadas aplicadas sobre suelos. *Edafología*, Vol. 10, No. 2, (2003), 161-170.
2. EPA. Environmental Regulations and Technology. Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge. Estados Unidos. (2003).
3. Manahan S. Introducción a la química ambiental. Primera Edición. Editorial Reverte: México. (2007).
4. Mtshali J., Tiruneh A. y Fadiran A. Characterization of sewage sludge generated from wastewater treatment plants in Swaziland in relation to agricultural uses. *Resources and Environment*, Vol. 4, No. 4, (2014), 190-199.
5. Khalid U., Sarfaraz K. , Said G. , Muhammad U., Niamatullah K. , Muhammad A. y Shad K. Sewage sludge: an important biological resource for sustainable agriculture and its environmental implications. *American Journal of Plant Sciences*, Vol. 3, (2012), 1708-1720
6. Martínez Y., Fung Y., Brea Y. y Subero N. Evaluación del contenido de fósforo en un suelo agrícola de la cuenca del lago de Valencia tratado con lodo proveniente de una industria de alimentos. *Ingeniería y Sociedad*, Vol. 7, No. 147, (2012), 69-78.
7. EPA. Part 503 Implementation Guidance. Estados Unidos. (1985).
8. CONAMA. Reglamento para el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas. Chile. (2009).
9. SERMANAT. Norma oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. (2002).
10. Henry C., Sullivan R., Dorsey K. y Cogger C. Managing nitrogen from biosolids. Washington state department of ecology. North West Biosolids Management Association. (1999).
11. Ryan J., Estefan G., y Rashid A. Soil and Plant Analysis Laboratory Manual. International Centre for Agricultural Research in dry areas ICARDA. Segunda Edición: Siria. (2001).
12. APHA, AWWA y WEF. Standard methods for the examination of water and wastewater. Vigésima Edición: Estados Unidos. (1998).
13. Rathod P., Patel J, Shah M. y Jhala A. Recycling gamma irradiated sewage sludge as fertilizer: a case study using onion. *Applied Soil Ecology*, Vol.4, No.1, (2009). 223-233.

14. Salcedo E., Vazquez A., Krihnamurty L., Zamora F., Hernandez E. y Rodríguez R. Evaluación de lodos residuales como abono orgánico en suelos volcánicos de uso agrícola y forestal en Jalisco. México. *Interciencia*, Vol. 32, No. 2, (2007), 115-120.
15. Bedoya K., Acevedo J., Peláez J. y Agudelo S. Caracterización de biosólidos generados en la planta de tratamiento de agua residual San Fernando, Itagüí. *Revista de Salud Pública de la Universidad Nacional de Colombia*, Vol. 15, No. 5, (2013), 778-790.
16. Torres P. y Madera J. Mejoramiento de la calidad microbiológica de biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas. *Revista EIA*, Vol. 11, (2009), 21-37.
17. Ortiz M., Sánchez E., y Gutiérrez M. Efectos de la adición de lodos residuales sobre un suelo agrícola y un cultivo de maíz. México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, Vol. 15, No. 2, (2003), 69-77.
18. Caldera Y., Gutiérrez E., Blanco E., Torres M., y Gutiérrez E. Caracterización fisicoquímica y microbiológica de lodo residual como acondicionador de suelo durante el crecimiento de un cultivo de Cebollín. *Ciencia*. Vol. 15 No.3, 2007, 371-379.
19. Jamil M., Qasim M. y Umar M. Utilization of sewage sludge as organic fertilizer in sustainable agricultura. *Journal of Applied Science*, Vol. 6, No. 3, (2006), 531 – 535.
20. Potisek M., Figueroa U., González G., Jasso R. y Orona I. Aplicación de biosólidos al suelo y su efecto sobre contenido de materia orgánica y nutrimentos. *Terra Latinoamericana*. Vol. 28, No. 4. (2010), 327-333.
21. García Y., Ferrer O., Marín M. y Gado J. Niveles de minerales en cultivos sembrados en suelos preparados con lodos de industrias lácteas. *Ciencia*, Vol. 7, No.1, (1999), 46-56.
22. Hossain M., Strezov V., Chan K. y Nelson P. Agronomic properties of wastewater sludge biochar and bioavailability of metals in production of cherry tomato (*Lycopersicon esculentum*). *Chemosphere*, Vol. 78. No. 9, (2010), 1167 – 1171.
23. Day J., Chen L., Zhao J., y Na M. Characteristics of sewage sludge and distribution of heavy metal in plants with amendment of sewage sludge. *Journal of Environmental Sciences*, Vol. 18, No.6, (2006), 1094-1100.

Opuntia ficus-indica y Opuntia wentiana: estudio comparativo sobre su efectividad como coagulantes en la clarificación del agua

Yواليس González, Lorena Fuentes, Iván Mendoza y Yaxcelys Caldera

Laboratorio de Investigaciones Ambientales del Núcleo Costa Oriental del Lago (LIANCOL).

Universidad del Zulia. Cabimas, estado Zulia, Venezuela.

yoalis_gonzalez@hotmail.com

Recibido: 23-06-2015 Aceptado: 10-11-2015

Resumen

Para remover las partículas suspendidas y materia orgánica en descomposición presentes en las aguas naturales es necesario aplicar coagulantes que permitan obtener un agua de calidad para consumo humano. Por esta razón, se han desarrollado diversos estudios con especies vegetales del género *Opuntia* para clarificar las aguas, como alternativa a los coagulantes de origen químico. Este estudio tuvo como objetivo comparar la efectividad de *Opuntia ficus-indica* y *Opuntia wentiana* como coagulantes en la clarificación de aguas destinadas al consumo humano. Se seleccionaron varias investigaciones desarrolladas en el área de clarificación de aguas con coagulantes extraídos de *O. ficus-indica* y *O. wentiana*, se realizó una matriz de registro de dichos coagulantes y la metodología para su obtención. La efectividad de estos coagulantes se evidenció a partir de los porcentajes de remoción de turbidez y color después de la etapa de sedimentación. Las investigaciones demostraron la efectividad que poseen estas cactáceas, pues se registraron remociones de turbidez por encima de 82,98% con *O. ficus-indica* y por encima de 79,30% utilizando *O. wentiana*, ambas en forma cruda y desecada. Se determinó que *O. ficus-indica* (cruda) es más eficiente en la clarificación del agua y representa una alternativa para su aplicación a gran escala.

Palabras clave: Coagulantes, *O. ficus-indica*, *O. wentiana*, remoción de turbidez, clarificación del agua.

Opuntia ficus-indica and Opuntia wentiana: comparative study on its effectiveness as a coagulant in water clarification

Abstract

To remove the suspended particles and organic matter in decomposition present in the natural waters it is necessary to apply coagulants that allow to obtain a quality water for human consumption. For this reason, diverse studies have developed with vegetable species of the genus *Opuntia* to clarify the waters, as alternative to the coagulants of chemical origin. This study had as aim compare the effectiveness of *Opuntia ficus-indica* and *Opuntia wentiana* as coagulants in the clarification of waters destined for the human consumption. There were selected several investigations developed in the area of water clarification with coagulants extracted of *O. ficus-indica* and *O. wentiana*, was realized a counterfoil of record of the above mentioned coagulants and the methodology for his obtaining. The efficiency of these coagulants was demonstrated from the percentages of removal of turbidity and color after the stage of sedimentation. Investigations demonstrated the effectiveness that possess these cactacea, as they were removal of turbidity above 82,98% with *O. ficus-indica* and above 79,30% using *O. wentiana*, both in raw and dried form. It was determined that *O. ficus-indica* (raw) is more efficient in water clarification and represents an alternative for its application on a large scale.

Keywords: Coagulants, *O. ficus-indica*, *O. wentiana*, turbidity removal, water clarification.

Introducción

A nivel mundial, la contaminación de los cuerpos de agua se ha convertido en un grave problema que afecta directamente a la población y biodiversidad. Todo ser vivo necesita agua para su adecuado desarrollo. Por esta razón, el hombre está obligado a hacer un mejor uso de este recurso y evitar en lo posible la degradación de la calidad de las aguas. Sin embargo, muchas veces, el origen de la contaminación de las aguas se debe principalmente a la actuación humana, a partir de la descarga de desechos y el desarrollo de actividades agrícolas [1].

En Venezuela, las fuentes de agua dulce provienen de agua superficial (60%) y aguas subterráneas (40%). Los recursos disponibles permiten abastecer a un 87% de la población nacional y a 387.500 Ha bajo riego. De esa disponibilidad se estima que el 43% se destina al consumo humano o doméstico, el 46% para uso agrícola, mientras que el 11% restante es para uso industrial [2]. Esta cantidad de agua dulce disponible, generalmente presenta partículas en suspensión que le confieren elevada turbiedad y color. Para ajustar estos parámetros a las normativas establecidas, el agua se somete a una serie de tratamientos que constan de varias etapas: coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección. En la primera etapa, es necesario utilizar agentes coagulantes como sulfato de aluminio, cloruro férrico o policloruro de aluminio, entre otros, para causar la desestabilización de las partículas, a través de una agitación rápida.

Para establecer los valores máximos de aquellos componentes o características del agua, que pudieran representar un riesgo para la salud de la comunidad, se cuenta con las Normas Sanitarias de Calidad de Agua Potable [3], la cual establece los valores ideales de los parámetros turbidez, color, olor, pH, acidez, dureza y sólidos disueltos totales, entre otros.

Por otra parte, debido al vínculo establecido por varios investigadores entre el aluminio presente en los coagulantes químicos y las enfermedades neurodegenerativas [4], resulta conveniente utilizar productos naturales en el tratamiento del agua, que permitan remover eficientemente la turbidez y color, sin causar efectos colaterales a la salud. Entre los coagulantes de origen natural que se han reportado en la literatura se tienen las semillas de *Moringa oleifera*, las cactáceas *Stenocereus griseus* (Haw.) Buxb., *Hylocereus lemairei* (Hook.) Britton & Rose, *Opuntia wentiana* (Britton & Rose) y *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. (Cactaceae), entre otras.

Tomando en cuenta lo planteado, en este estudio se consideró oportuno comparar la efectividad de *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. (Cactaceae) y *Opuntia wentiana* (Britton & Rose) en la remoción de turbidez y color de aguas destinadas al consumo humano, pues estas especies han demostrado ser efectivas en la clarificación de aguas crudas y sintéticas.

Metodología

Técnicas e instrumentos de recolección

Se utilizó la técnica de revisión documental, a partir de la selección de cinco investigaciones realizadas en el Laboratorio de Investigaciones Ambientales del Núcleo Costa Oriental del Lago de la Universidad del Zulia, Venezuela. Dichos estudios están orientados al uso de coagulantes naturales del género *Opuntia* para la potabilización del agua. Se realizaron matrices de registro (instrumento) para señalar el procedimiento en la obtención del mucílago o componente activo de las especies vegetales *O. ficus-indica* y *O. wentiana* para favorecer la coagulación y floculación. También se contempló la dosis de coagulante aplicada a los distintos valores de turbidez inicial.

Asimismo, se plasmó la información referida a los porcentajes de remoción de turbidez y color en las aguas tratadas con cada coagulante, y se consideró la variación de pH y alcalinidad después del tratamiento. Los valores reflejados en la matriz de registro se compararon con lo establecido en las Normas Sanitarias de Calidad del Agua Potable de Venezuela [3], en cuanto a niveles de turbidez, color y pH.

Finalmente, a partir de los valores reportados en las investigaciones, se realizó una comparación entre ellas a fin de determinar cuál de los coagulantes resulta más efectivo en la remoción de color y turbidez, partiendo de la dosis óptima.

Resultados y discusión

Para describir la efectividad que poseen *O. ficus-indica* y *O. wentiana* como coagulantes, es necesario plantear la metodología aplicada por los investigadores para la obtención del mucílago responsable de la formación de flóculos. En la Tabla 1 se presenta la matriz de registro con dicha información, además de las dosis de coagulante aplicadas y los niveles de turbidez inicial estudiados.

El procedimiento para extraer el agente coagulante es similar para las dos cactáceas en estudio (*O. ficus-indica* y *O. wentiana*), dependiendo de su forma de aplicación (cruda o desecada). En cuanto a la obtención de estas plantas, la mayoría de ellas se recolectaron en la Costa Oriental del Lago, específicamente en el municipio Cabimas del estado Zulia, quiere decir que en esta zona se reproducen estas especies en abundancia, al igual que otras cactáceas como *Stenocereus griseus* (Haw.) Buxb. [5] y *Opuntia cochinellifera* [6].

Cuando estos coagulantes se aplican en forma cruda, los investigadores [7] resaltan la importancia en el control del tiempo de licuado, ya que un exceso de éste podría afectar la elasticidad del mucílago y por tanto, la capacidad para la formación de flóculos disminuiría considerablemente. Asimismo, Aldana et al. [8] y Riera et al. [9], quienes utilizaron *O. ficus-indica* y *O. wentiana*, respectivamente, destacan la importancia del control de la temperatura al momento de someter el tejido parenquimatoso a desecado, pues una temperatura mayor de 60 °C podría causar la desnaturalización de las proteínas presentes en estas cactáceas y por ende, la disminución de su potencial coagulante.

Con respecto a los niveles de turbiedad estudiados, se observa que en su mayoría, sobrepasan las 100 UNT, lo cual implica que posiblemente los coagulantes aplicados deben tener una elevada efectividad para eliminar las partículas suspendidas presentes en las aguas. También se observa que las dosis aplicadas son diferentes y los valores de color se ubican entre 50 y 400 UC Pt-Co.

Para iniciar el tratamiento con los coagulantes, los investigadores siguieron los pasos establecidos en el Standard Methods [10]. Utilizaron un equipo de jarras que se encarga de reproducir a escala de laboratorio las etapas de coagulación, floculación y sedimentación, comúnmente efectuadas en las plantas de potabilización. Activaron el equipo a 1 minuto de mezclado rápido (100 rpm), 20 minutos de mezclado lento (30 rpm) y 30 minutos de sedimentación; posteriormente, sometieron las muestras a filtración. Los parámetros físicos turbidez y color los determinaron a través de un turbidímetro y colorímetro, respectivamente. Para registrar los valores de pH utilizaron un potenciómetro y la alcalinidad la midieron por titulación con H₂SO₄ (0,02 N) y usaron anaranjado de metilo como indicador. Dichos parámetros los evaluaron antes y después de la etapa de filtración.

Tabla 1. Matriz de registro de la metodología utilizada para la obtención de coagulantes a partir de las especies *O. ficus-indica* y *O. wentiana* en la clarificación de las aguas.

Cactácea	Metodología para la obtención del coagulante	Dosis de coagulante aplicadas (ppm)	Valores de turbidez inicial (UNT)	Rangos de color inicial (UC Pt - Co)
<i>O. ficus-indica</i> (cruda) [7]	Recolectados los cladodios (Callejón Cabimas, municipio Cabimas, Edo. Zulia), se procedió a lavarlos muy bien, se les retiró la epidermis y se separó el mesófilo. Se cortó en trozos pequeños para someterlos a un licuado durante 5 segundos hasta obtener una mezcla mucilaginosa. Seguidamente, se preparó una suspensión al 50 % m/v.	250	100	300 - 400
		350	120	
		450	140	
		550	160	
		650	180	
			200	
<i>O. ficus-indica</i> (desezada) [8]	Se recolectó en el sector Las 40, municipio Cabimas, edo. Zulia, se trasladó al laboratorio. Se procedió a lavarla y retirarle la epidermis, para la obtención del parénquima. Posteriormente, se sometió a calentamiento en la estufa a una temperatura no mayor de 60°C, durante 24 horas. Se trituro el desecado hasta obtener un polvo fino, se tamizó para separar las partículas gruesas y se guardó en un envase hermético a una temperatura de 5 °C. Finalmente se preparó una mezcla al 10 % m/v.	150	118	200 - 280
		200	133	
		250	162	
		300	178	
		350	259	
			288	
<i>O. wentiana</i> (cruda) [11]	La tuna se recolectó en el sector Monte Pío de la Costa Oriental del Lago, Cabimas, edo. Zulia, Venezuela. Obtenido el tejido parenquimatoso en el laboratorio, se licuó en un procesador doméstico durante 50 segundos, se separó la fase sólida de la acuosa con ayuda de un lienzo de gasa y se agregó en agua destilada para obtener una mezcla heterogénea mucilaginosa en una relación 1:1.	300	100	≥100
		400	120	
		500	140	
		600	160	
		700	180	
			200	

<i>O. wentiana</i> (cruda) [12]	Se seleccionaron los cladodios en el sector El Menito, Lagunillas, edo. Zulia. Se realizó una limpieza de la cactácea que consistió en remover las espinas y la epidermis para obtener el tejido parenquimatoso. Luego se licuó por 30 segundos para obtener una muestra mucilaginoso para la preparación de la mezcla coagulante al 50 % m/v.	100	20	50 - >100
		200	40	
		300	60	
		400	80	
		500	100	
<i>O. wentiana</i> (cruda) [9]	Se recolectaron los cladodios de <i>O. wentiana</i> , en el sector Monte Pío (Cabimas, edo. Zulia), se trasladaron al laboratorio, se eliminó la epidermis y se separó el tejido parenquimatoso. Consecutivamente, se sometió a desecado en una estufa a una temperatura no mayor de 50 °C, durante 24 horas. Luego se trituró, tamizó y refrigeró para su preservación. Posteriormente, se preparó una mezcla al 9 % m/v y se almacenó durante 24 horas a 4 °C para la hidratación del mucílago.	81	100	100 - 400
		108	120	
		135	140	
		162	150	
		189	160	
			180	
			200	

Efectividad de *O. ficus-indica* y *O. wentiana* en su forma cruda, después de la etapa de sedimentación

En la Figura 1 se muestra la efectividad en cuanto a remoción de turbidez de los coagulantes (en crudo) una vez finalizada la sedimentación de los flóculos, tomando en cuenta las dosis óptimas reportadas por García y Brito [12] (*O. wentiana* cruda), Parra et al. [11] (*O. wentiana* cruda) y González et al. [7] (*O. ficus-indica* cruda). Para valores de turbiedad inicial comprendidos entre 20 y 100 UNT, se observa que con *O. wentiana* obtuvieron porcentajes de remoción superiores al 75%, a partir de dosis óptimas de 200, 300, 400 y 500 ppm, se observó que a medida que aumenta la turbidez inicial, las muestras de agua requieren de una dosis mayor de coagulante, excepto para una turbidez inicial de 100 UNT, pues ésta no se ubicó en la misma tendencia de los valores anteriores, por lo cual puede decirse que requiere una mayor dosis del coagulante para obtener un porcentaje de remoción de turbiedad más elevado. Sin embargo, la remoción obtenida fue de 83% aproximadamente (al aplicar 500 ppm del coagulante), y se considera aceptable. No obstante, se puede observar que este porcentaje de remoción varía con respecto al obtenido por Parra et al. [11], 92% aproximadamente, a partir de una dosis de 700 ppm.

En relación al comportamiento de *O. wentiana* a valores más altos de turbidez, se observa que para las turbiedades de 120 y 160 UNT, con una dosis óptima aplicada de 700 ppm, el porcentaje de remoción disminuyó de 92,11% a 85%. Al aumentar el valor de turbidez inicial, las dosis de coagulante fueron menores (600 ppm) y se removió en un mayor porcentaje la turbiedad (hasta 95% aproximadamente). Por tanto, se puede decir que a mayores turbiedades, se requiere menos dosis de coagulante para la remoción de partículas.

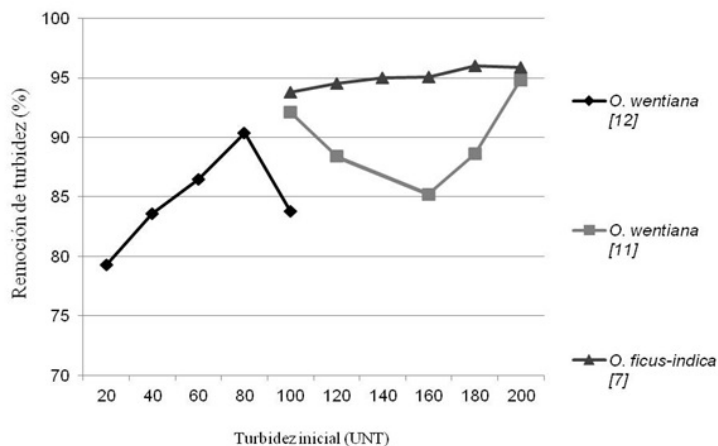


Figura 1. Remoción de turbidez utilizando *O. ficus-indica* y *O. wentiana* en forma cruda, considerando las dosis óptimas.

Los valores reportados por González et al. [7] (*O. ficus-indica* cruda) muestran porcentajes de remoción más elevados, entre 93,78% y 95,89%, a valores de turbidez inicial de 100 a 200 UNT. Dichos valores se alcanzaron a partir de la aplicación de 350 y 450 ppm de coagulante.

Los porcentajes de remoción referidos por Parra et al. [11] (*O. wentiana* cruda) y González et al. [7] (*O. ficus-indica* cruda), correspondientes a las turbiedades de 100 y 200 UNT, son muy similares, entre 93% y 95%, respectivamente. Pero las dosis aplicadas de *O. ficus-indica* son mucho menores que las de *O. wentiana*, por lo cual puede afirmarse que la cactácea *O. ficus-indica* en forma cruda es más efectiva para la remoción de turbidez.

Efectividad de *O. ficus-indica* y *O. wentiana* en forma desecada, después de la etapa de sedimentación

Los estudios realizados con *O. ficus-indica* y *O. wentiana*, en forma desecada, se han realizado a valores altos de turbidez inicial, desde 100 a 288 UNT. En la Figura 2 se observa para ambos coagulantes, porcentajes de remoción superiores al 80%.

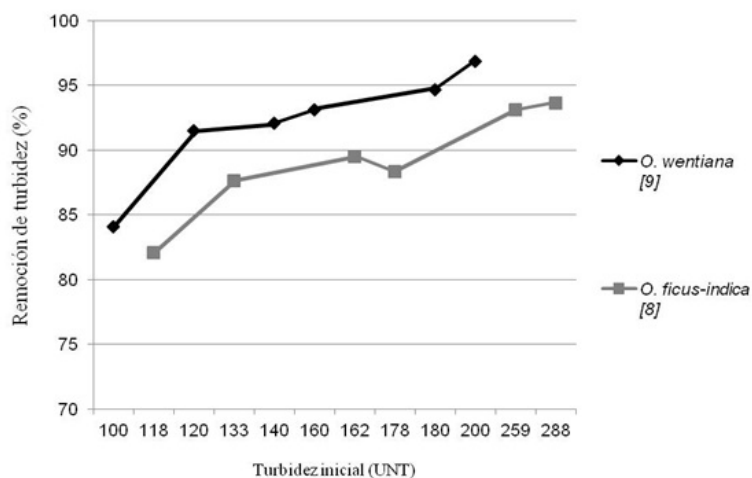


Figura 2. Remoción de turbidez utilizando *O. ficus-indica* y *O. wentiana* en forma desecada, considerando las dosis óptimas.

Específicamente, Riera et al. [9] (*O. wentiana* desecada) alcanzaron porcentajes de remoción de turbidez comprendidos entre 84,1% y 96,9% con la aplicación de dosis óptimas de 108, 135, 162 y 189 ppm. Se observa que a medida que aumenta el nivel de turbidez inicial, aumentan los porcentajes de remoción. La dosis utilizada para una turbidez de 100 UNT fue de 189 ppm y para 200 UNT fue de 162 ppm, lo cual revela que a mayor turbidez se requiere menor dosis de coagulante. Con esta última dosis se alcanzó el porcentaje de remoción más alto (96,9%).

Por su parte, Aldana et al. [8] señalan porcentajes de remoción de turbidez entre 82,09% y 93,66% con la aplicación de 150, 200 y 250 ppm de la mezcla coagulante de *O. ficus-indica* (desecada). En cuanto a la efectividad de este coagulante, se observa un comportamiento similar a *O. wentiana*, es decir, a medida que aumenta la turbidez, se obtiene una mayor remoción. Sin embargo, estos investigadores aplicaron dosis más altas y obtuvieron porcentajes de remoción menores a los mostrados por Riera et al. [9]. Para este caso, el coagulante más eficiente fue *O. wentiana*.

Al comparar los resultados obtenidos por García y Brito [12] (*O. wentiana* cruda), Parra et al. [11] (*O. wentiana* cruda), González et al. [7] (*O. ficus-indica* cruda), Riera et al. [9] (*O. wentiana* desecada) y Aldana et al. [8] (*O. wentiana* desecada), se observa que la efectividad de *O. ficus-indica* y *O. wentiana* es excelente, ya que los porcentajes de remoción de turbidez superan el 80%. Estos porcentajes son mayores a los registrados por Almendárez [13] con el uso del desecado de *Opuntia cochinellifera*, donde se obtuvo una remoción de 63% sin corrección de pH. Por otra parte, los valores reportados por Fuentes et al. [14] son similares a los analizados en este estudio, ya que obtuvieron porcentajes de remoción de turbidez entre 78,59% y 85,88% utilizando *O. cochinellifera* (cruda) como coagulante. Sin embargo, las dosis óptimas del coagulante variaron de 4500 ppm a 8000 ppm. Asimismo, Jiménez et al. [15] al emplear la misma cactácea reportaron remociones de turbidez y color de 100% y 94%, respectivamente, a partir de una dosis de coagulante de 45 ppm, cabe destacar que dicho coagulante lo aplicaron en aguas artificiales, pues según los autores, la cactácea no tuvo efectividad al ser aplicada en aguas de río.

Remoción de turbidez después de la etapa de filtración

Después de la etapa de filtración las muestras de agua deben presentar un valor de turbidez óptimo (≤ 5 UNT) para consumo humano. Al finalizar el filtrado, los autores exponen porcentajes máximos de remoción de 98,34% (*O. wentiana* (cruda) [11]); 97,99% (*O. wentiana* (cruda) [12]); 99,09% (*O. ficus-indica* (cruda) [7]); 99,3% (*O. wentiana* (desecada) [9]) y 99,39% (*O. ficus-indica* (desecada) [8]). Dichos porcentajes corresponden a valores de turbidez inferiores a 3,32 UNT, por lo que son aceptables según lo establecido en las Normas Sanitarias de Calidad del Agua Potable de Venezuela [3].

Remoción de color en aguas tratadas con *O. ficus-indica* y *O. wentiana*

Las unidades de color obtenidas con el uso de *O. ficus-indica* se registraron relativamente bajas antes del proceso de filtración, entre 20 y 30 UC Pt-Co, equivalentes a porcentajes de remoción entre 75% y 91,07% al aplicar dosis de 150 a 350 ppm (*O. ficus-indica* desecada [8]), lo cual evidencia el gran potencial de este coagulante en la remoción de color. Después de filtrar los porcentajes se ubicaron entre 85% y 94,64% (10 – 20 UC Pt-Co). González et al. [7] (*O. ficus-indica* cruda) señalan valores de color comprendidos entre 5 y 20 UC Pt-Co correspondientes a porcentajes de remoción entre 95% y 98,75%, sin filtrar. Después de filtrar, obtuvieron porcentajes de remoción de color que alcanzaron hasta 100%. Es decir, *O. ficus-indica* (cruda) es más eficiente en la remoción de color.

Con respecto al empleo de *O. wentiana*, los valores de color al aplicar este coagulante se ubicaron entre 70 y 80 UC Pt-Co, antes de filtrar y entre 50 y 80 UC Pt-Co, después de filtrar para valores de color inicial mayores de 100 UC Pt-Co (*O. wentiana* cruda [11]). Estos resultados difieren con respecto a los obtenidos por García y Brito [12] (*O. wentiana* cruda), pues ellos registraron unidades de color entre 10 y 20 antes de la filtración y entre 5 y 10 UC Pt-Co, después de la misma, para valores de color inicial por encima de 100 UC Pt-Co. En su forma desecada, *O. wentiana* arrojó resultados de color en un rango de 10 a 70 UC Pt-Co (81,07% - 84,10% de remoción) antes del filtrado y de 5 a 40 UC Pt-Co (94,07% - 95,83% de remoción) después del filtrado [9].

Aunque algunos de los valores reportados por los autores no son aceptables según las normas, es importante resaltar el grado de eficiencia que poseen estas cactáceas en cuanto a la remoción de color, con relación al valor inicial en las muestras de agua analizadas.

Parámetro pH y alcalinidad en las muestras de agua tratadas con *O. ficus-indica* y *O. wentiana*

Con relación al parámetro pH, las muestras de agua tratadas con *O. wentiana*, arrojaron valores comprendidos entre 7,01 y 7,58 (*O. wentiana* cruda [11]), entre 7,18 y 7,34 (*O. wentiana* cruda [12]) y entre 5,8 y 6,53 (*O. wentiana* desecada [9]). En este último estudio los valores son ligeramente ácidos y por tanto no se ubican en el rango establecido en las normas (6,5 – 8,5).

Las unidades de pH registradas con la aplicación de *O. ficus-indica* fluctuaron entre 5,99 y 6,84 (*O. ficus-indica* desecada [8]) y entre 6,78 y 7,23 (*O. ficus-indica* cruda [7]), observándose que este último estudio si cumple con lo estipulado en la Gaceta Oficial [3].

La alcalinidad es un parámetro que todos los investigadores registraron por debajo de 40 mg CaCO₃/L, por lo cual se considera una alcalinidad baja según Doudelet [16] ya que es menor de 140 mg CaCO₃/L. La norma venezolana no contempla la alcalinidad como parámetro de calidad en las aguas.

En general, a lo largo de la descripción, análisis y comparación de los resultados obtenidos por investigadores que han empleado las cactáceas *O. ficus-indica* y *O. wentiana* en la clarificación de las aguas, se pudo notar que son altamente efectivas, tanto en forma cruda como desecada, por lo cual representan una opción viable para su implementación en las plantas de tratamiento o de forma rudimentaria en las comunidades.

Conclusiones

La efectividad de *O. ficus-indica* se evidenció en los porcentajes de remoción de turbidez después de la sedimentación, ubicados entre 93,78% y 96,02% utilizada en crudo, y entre 82,98% y 93,66% utilizada en su forma desecada. Los valores de remoción arrojados por *O. wentiana* oscilan entre 79,30% y 94,84% y entre 84,1 y 96,9%, en su forma cruda y desecada, respectivamente. Dichos resultados indican que *O. ficus-indica* (cruda) es más eficiente en la remoción de turbidez.

En la remoción de color, se mostraron porcentajes máximos de 84,1% (*O. wentiana*) y de 100% con el uso de *O. ficus-indica*. Razón por la cual se considera que *O. ficus-indica* (cruda) es la más efectiva en la remoción de color del agua.

Los valores de pH arrojados con el uso de *O. ficus-indica* y *O. wentiana*, en su mayoría se encuentran dentro de lo establecido en las Normas Sanitarias de Calidad del Agua Potable de Venezuela. Mientras que la alcalinidad se registró por debajo de 40 mg CaCO₃/L, lo cual también se considera aceptable.

Se determinó que *O. ficus-indica* (cruda) es más eficiente en la clarificación del agua y representa una alternativa viable para su aplicación a gran escala.

Referencias bibliográficas

1. Martínez N. El proceso de ocupación en la cuenca del embalse la mariposa y sus efectos de deterioro en el embalse y sus aguas. *Terra Nueva Etapa*. 16(25), (2000), 27-55.
2. Dautant R. y Guevara E. Recursos hídricos – Venezuela 2011. Centro del Agua para América Latina y el Caribe 1(1), (2011), 1-67.
3. Gaceta Oficial de la República de Venezuela N° 36.395 SG-018-98. Normas Sanitarias de Calidad del Agua Potable. (1998).
4. Suay L. y Ballester F. Revisión de los estudios sobre exposición al aluminio y enfermedad de Alzheimer. *Revista Española de Salud Pública*. 76(6), (2002), 645-658.
5. Fuentes L., Mendoza I., López A., Castro M. y Urdaneta C. Efectividad de un coagulante extraído de *Stenocereus griseus* (Haw.) Buxb. en la potabilización del agua. *Rev. Téc. Ing. Universidad del Zulia*. 34(1), (2011), 48-56.

6. Díaz P., Fernández Y. y Zambrano A. Efectividad de la tuna *Opuntia cochinellifera* como coagulante en la potabilización de las aguas. Trabajo de grado para optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad del Zulia. Núcleo Costa Oriental del Lago. Cabimas, Venezuela. (2007).
7. González Y., Marcano N., Mendoza I. y Fuentes L. Efectividad de una suspensión de *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. (Cactaceae) en la clarificación de aguas sintéticas con alta turbidez. *Impacto Científico*. 4(2), (2009), 361-374.
8. Aldana M., Labarca C. Y Milán D. Efectividad del mucílago desecado obtenido de *Opuntia ficus-indica* en la potabilización de aguas con alta turbidez. Trabajo Especial de Grado para optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad del Zulia. Núcleo Costa Oriental del Lago. Cabimas, Venezuela. (2012), 62 p.
9. Riera M., Mosquera J. y Velásquez B. Eficiencia del mucílago desecado de *Opuntia wentiana* (Britton & Rose) en la clarificación de aguas sintéticas de alta turbidez. Trabajo Especial de Grado para optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad del Zulia. Núcleo Costa Oriental del Lago. Cabimas, Venezuela. (2012).
10. APHA - AWWA - WEF. Standard methods for the examination of water and wastewater. 18th Ed. Washington. (1998), DC, USA.
11. Parra Y., Cedeño M., García M., Mendoza I., González Y. y Fuentes L. Clarificación de aguas de alta turbidez empleando el mucílago de *Opuntia wentiana* (Britton & Rose) / (Cactaceae). *REDIELUZ*. 1(1), (2011), 27-33.
12. García H. y Brito C. Remoción de turbidez en el tratamiento del agua potable con el uso de la *Opuntia wentiana* Britton & Rose. Trabajo de grado para optar al título de Ing. Civil. Universidad del Zulia, Núcleo Costa Oriental del Lago. (2008), 71 p.
13. Almendárez N. Comprobación de la efectividad del coagulante (Cochifloc) en aguas del Lago de Managua. Piedras Azules. *Revista Iberoamericana de Polímeros*. 5(1), (2004), 46-53.
14. Fuentes L., Mendoza I., Díaz P., Fernández Y., Zambrano A. y Villegas Z. Potencial coagulante de la tuna *Opuntia cochinellifera* (L.) Mill. (Cactaceae) en aguas para consumo humano. *Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas* 46(2), (2012), 173-187.
15. Jiménez J., Vargas M. y Quiróz N. Evaluación de la tuna (*Opuntia cochinellifera*) para la remoción del color en agua potable. *Tecnología en Marcha*. 25(4), (2012), 55-62.
16. Doudelet A. Estudio de las aguas minerales. *Geothermia*, 4, (1981), 5-28.

Índice acumulado

N° 1 Julio - Diciembre 2011

Algunas series e integrales con funciones trigonométricas

Some series and integrals with trigonometric functions

Alfredo Villalobos y Glenny García

Control mediante interconexión y asignación de amortiguamiento del sistema mecánico subactuado TORA

Interconnection and damping assignment control of the subactuated TORA mechanical system

Atilio Morillo, Maribel Pérez Pirela, Miguel Ríos y Vivian Acosta

Algunos resultados que envuelven la función hipergeométrica de Wright y el cálculo fraccional

Some results involving fractional calculus and Wright's generalized hypergeometric function

Susana Salinas de Romero y Carlos Segundo Muñoz Valencia

Eficiencia del quitosano como coagulante durante el tratamiento de aguas de baja turbidez asociadas a la producción de petróleo

Efficiency of chitosan as coagulant during treatment of low turbidity water associated crude oil production

Yaxcelys Caldera, Yim Rodríguez, Hernando Oñate, Jhosana Prato y Edixon Gutiérrez

Quitina y Quitosano polímeros amigables. Una revisión de sus aplicaciones

Chitin and Chitosan friendly polymer. A review of their applications

Zulay Mármol, Gisela Páez, Marisela Rincón, Karelen Araujo, Cateryna Aiello, Cintia Chandler y Edixon Gutiérrez

Algunos resultados sobre la función de Bessel de dos índices y un parámetro

Some results on Bessel function of two indexes and one-parameter

Leda Galué y Greilyn Castillo

Generalización fraccional de la ecuación de Schrödinger relacionada a la Mecánica Cuántica

Fractional generalization of Schrödinger equation related to Quantum Mechanics

Shyam Kalla, Ram Kishore Saxena y Ravi Saxena

Nº 2 Enero - Junio 2012

Diseño de un equipo de desinfección por luz ultravioleta para el tratamiento de aguas residuales con fines de reutilización

Design of disinfection equipment for ultraviolet light to wastewater treatment with goals of reutilization

Mayra Sánchez, Nellimar Villalobos, Edixon Gutiérrez y Yaxcelys Caldera

Cinética de intercambio iónico bajo control mixto en medio lácteo

Ion exchange kinetics under mixed control in milk

Jorge Alaña, Karina Martínez, José González, Juan Hernández y César García

Contenido de fracciones orgánicas en aguas de producción de petróleo

Organic fractions in water from crude oil production

Edixon Gutiérrez, Yaxcelys Caldera, Leopoldo Ruesga, Cristina Villegas, Roscio Gutiérrez, Ninoska Paz, Edith Blanco y Zulay Mármol

Solitones topológicos: Cúmulos de energía

Topological solitons: Lumps of energy

Ramón J. Cova

Ingeniería Química: Historia y Evolución

Chemical Engineering: History and Evolution

Cateryna Aiello Mazzarri, Zulay Mármol y Araceli Sánchez de Puertas

Comparación de las propiedades que influyen en la combustión entre el fly ash, carbón y diferentes derivados del petróleo

Comparison of the properties that influence in the combustion among the fly ash, coal and different derived of the petroleum

Análí Machado, Cezar García, Yolanda Rincón, Neyma García, José González y Juan Hernández

Nitrobacterias en reactores biológicos rotativos de contacto (RBC) de tres cámaras bajo diferentes cargas orgánicas

Nitrobacteria in three stages rotating biological contactor (RBC) reactors under different organic loads

Julio César Marín, Evelín Castro, Elisabeth Behling, Gilberto Colina, Laugeny Díaz y Nancy Rincón

Generalización de los polinomios de Bernoulli de índice arbitrario complejo

Generalization of Bernoulli polynomials of arbitrary complex index

Ana Isolina Prieto, Josefina Matera, Susana Salinas de Romero y Marleny Fuenmayor

Nº 3 Julio - Diciembre 2012

Criterios para la gestión de los sistemas de inventarios

Criteria for management inventories systems

Alfredo Leal y Karim Oliva

Contenidos curriculares y rendimiento académico de los estudiantes en la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia

Contents curriculares and academic performance of the students in the Faculty of Agronomy of the University of Zulia

Mary Isabel Urdaneta Portillo, Gladys Sarmiento, José Hernández y Jairo Fernández

Mínimos cuadrados parciales con el método de descenso de mayor pendiente

Partial least square with method of maximum gradient descent

Eddy Jackeline Rodríguez

Usabilidad de entornos virtuales 3D colaborativos en el proceso de enseñanza–aprendizaje

Usability of collaborative 3D virtual environments in the teaching-learning processes

Carlos Arrieta

Desinfección de aguas residuales de una industria avícola para su reutilización

Disinfection of poultry industry wastewater for reuse

Edixon Gutiérrez, Anna Travaglini, Giselle Uzcátegui y Yaxcelys Caldera

Estudio comparativo entre el método de Lemke y el método de los conjuntos activos para programación cuadrática

Comparative study between Lemke's method and the active set method for quadratic programming

Marihebert Leal, Kilkenis Fuenmayor, Javier Bastidas y Susana Salinas

N° 4 Enero - Junio 2013

Comunidades de práctica en la investigación universitaria

Communities of practice in the university research

Sergio de Pool

Representación integral de la función de Bessel de dos índices y un parámetro

Integral representation of the Bessel function of two indexes and a parameter

Leda Galué y Greilyn Castillo

Algunas propiedades de las N – Normas

Some properties of N – Norms

José Sarabia

Biodegradación de queroseno por cultivos de bacterias aisladas de una fosa petrolera en Venezuela

Kerosene biodegradation by bacterial cultures isolated from oil pit in Venezuela

Laugeny Díaz, Beltrán Briceño, Mónica García, Néstor Rosales, Julio Marín, Cateryna Aiello y Ever Morales.

Factibilidad de inserción del Transmilenium como solución a la situación actual del sistema de transporte público de la ciudad de Maracaibo

Feasibility study of the Transmilenium like a solution to the actual public transport situation in the Maracaibo city

Angi Rojas y Marco Hinder

Modelado del secado en capa fina y del presecado al sol a diferentes alturas de la capa de la Lemna obscura del Lago de Maracaibo

Modeling of the thin layer drying and solar predrying at the different layer thicknesses of the Lemna obscura from Maracaibo Lake

Leobaldo Suárez, Alexis Faneite y Alexis Ferrer

Algunos resultados de la subordinación diferencial de Briot – Bouquet de funciones analíticas

Some results on Briot – Bouquet differential subordination of analytic functions

Alka Rao y Shyam Kalla

Nº5 Julio - Diciembre 2013

Biblioteca de diferenciación automática para la máquina virtual de Java

Automatic differentiation library for the Java virtual machine

María E. Portillo Montiel, Nelson Arapé, Gerardo Pirela Morillo

Eficiencia de las semillas Moringa oleifera como coagulante orgánico en la remoción de metales en aguas de baja turbiedad

Efficiency of the moringa oleifera seeds as organic coagulant for metal removal in low turbidity wastewaters

Marielba Mas y Rubí, Sedolfo Carrasquero, Daimarys Martínez, Donaldo Gabriel Mejías, Luis Vargas

Evaluación de la recuperación de vanadio y níquel por lixiviación ácida de las cenizas volantes del aceite combustible

Evaluation of the recovery of vanadium and nickel by acid leaching from oil fly ash

César García, Roselis Rosales, Bianca Feijoo, Juan Hernández, José González, Gabriela Carruyo

Influencia de la relación de aspecto de la geometría vertical en el comportamiento estructural de edificaciones aporticadas de concreto armado

Influence of the aspect ratio of vertical geometry on the structural behavior of framed reinforced concrete...

Oswaldo J. Russián A., Víctor R. Salazar V., Gerardo J. Gutiérrez D.

Análisis numérico computacional de la distribución de temperaturas en una barra

Computational numerical analysis for the temperatures distribution in a bar

Alfredo Villalobos, Antonio Quintero

Validación de un método cromatográfico para la determinación de vitamina A en muestras de leche /

Validation of a chromatographic method for the determination of vitamin A in milk samples

Karelen Araujo, Gisela Páez, Zulay Mármol, Elsy Arenas, Ana Cáceres, Cateryna Aiello Mazzarri

Nº 6 Enero - Junio 2014

Sobre una generalización de la función hipergeométrica de Gauss

On one generalization of the Gauss' hypergeometric function

Nina Virchenko

Representación integral de las $E_{\alpha, \beta}(x)$ - funciones de onda

Iryna Alexsandrovich, Nina Virchenko

Algunos resultados sobre la función de Bessel de tres variables

Some results on Bessel function of three variables

Ana Isolina Prieto, Josefina Matera, Leda Galué, Susana Salinas

Integrales y ecuación diferencial que involucran la función de Wright

Integrals and differential equations involving Wright functions

Susana Salinas de Romero, Daniel Meza, Marleny Fuenmayor

Desigualdades integrales fraccionales y sus q -análogos

On fractional integral inequalities and their q -analogues

Sunil Dutt Purohit, Faruk Uçar, R.K. Yadav

Una nueva clase de polinomios q -Apostol-Bernoulli de orden α

A new class of q -Apostol-Bernoulli polynomials of order α

Mridula Garg, Subhash Alha

Algunos resultados que involucran operadores q -integrales fraccionales generalizados de Erdélyi-Kober

Some results involving generalized Erdélyi-Kober fractional q -integral operators

Leda Galué

Revisión de la teoría de Boehmians

Boehmians revisited

P. K. Banerji, Deshna Loonker

Algunas propiedades de las N -normas (II)

Some properties of N -norms (II)

José A. Sarabia R.

Nº 7 Julio - Diciembre 2014

Fermentación en estado sólido: Una alternativa biotecnológica para el aprovechamiento de desechos agroindustriales

Solid state fermentation: A biotechnological alternative for exploitation of agroindustrial wastes

José R. Ferrer G, José L. Machado, Jhanna Brieva

Propuesta de un sistema de seguridad residencial inalámbrico basado en instrumentación virtual

Proposal for a wireless home security system based on virtual instrumentation

Gereli de los Ángeles Gutiérrez Finol

Sistema de facturación vehicular en peajes basado en tecnología de identificación por radio frecuencia (RFID)

Vehicular toll collection system based on radio frequency identification technology (RFID)

Angel D. Larreal M., Georma P. Marachli M.

Determinación del grado de conversión global del jugo de piña en etanol por medio de la fermentación alcohólica

Determination of the conversion degree of pineapple juice through alcoholic fermentation

Briceida C. Fernández A., Maite V. Gómez S., José R. Ferrer G, Marisela Rincón

Modelo matemático para la evaluación de parámetros hidráulicos de un reactor anaerobio de flujo ascendente a escala piloto (RAFAep)

Mathematical model for evaluating parameters of a hydraulic upflow anaerobic reactor pilot scale (RAFAep)

Gabriel Arguello, Gerardo Aldana, Jhonny Perez

Dispersión gelatinosa de huesos bovinos para la clarificación de aguas con baja turbidez

Bovine bone gelatinous dispersion for clarification of water with turbidity low

Lorena Fuentes, Yolimar Aguilar, Yaxcelys Caldera, Iván Mendoza

Nanocompuestos basados en arcilla y mezclas heterogéneas de termoplásticos. Una revisión

Nanocomposites based on clay and heterogenous blends of thermoplastics. A review

Helen Inciarte, Haydée Oliva

N° 8 Enero Junio 2015

Análisis, diseño y simulación del sistema subactuado Pendubot

Analysis, design and simulation of Pendubot subactuated mechanical systems

Atilio Morillo y Maribel Pérez Pirela

Remoción de arsénico presente en oil fly ash por lixiviación ácida

Arsenic removal from oil fly ash by acid leaching

José González, Julissa Arguelles, Milagros Ojeda, Juan Hernández, Gabriela Carruyo y Cezar García

Sistema de control en modo deslizante para regular la posición y la velocidad de un motor de corriente directa

Sliding mode control to regulate the speed and position of a motor of direct current

Ernesto Cornieles y Jacobo Ramírez

Evaluación fisicoquímica y fitoquímica de Granada (*Punica granatum* L.)

Evaluation of physical and phytochemical properties of the granada (*Punica granatum* L.)

Johana Raga, Zulay Marmol, Evelyn Pérez, Gisela Páez y Karelen Araujo

Cuantificación y caracterización de los residuos de alimentos del Comedor Central Estudiantil de la Universidad del Zulia

Quantification and characterization of food residues from the Student Central Dinning of the University of Zulia

Karina Martínez, John Sánchez, Yuleidi Raga, Zulay Marmol, Elsy Arenas y Cateryna Aiello

Modelado de problema de regresión lineal con método Cuasi-Newton

Modeling linear regression problem with Quasi-Newton method

Eddy Rodríguez

Efecto de las condiciones de hidrofobización de una arcilla natural sobre su distribución y dispersión en mezclas de poliestireno/polibutadieno/estireno

Effect of the hydrophobization conditions of natural clay on its distribution and dispersión in polystyrene/polybutadiene/styrene blends

Ida González, Haydee Oliva, Ysabel Cedeño, Helen Inciarte, Diana Soto y Eliezer Velásquez

Estudio del comportamiento de las redes sónicas de alta velocidad

Study of performance of the sonic high speed networks

Luis Rojas

Normas para la presentación de artículos

1. La Revista Tecnocientífica URU es una revista digital arbitrada de la Universidad Rafael Urdaneta cuyo propósito es dar a conocer trabajos científicos originales e inéditos en las áreas de Ingeniería (Química, Civil, Eléctrica, Computación, Telecomunicaciones, Industrial y Producción Animal, entre otras).
2. **Tipos de trabajos**
Se aceptaran para la publicación artículos científicos inéditos, esto es, que no hayan sido enviados o publicados en otro órgano de divulgación científica con anterioridad, con un máximo de quince (15) páginas y escrito en MICROSOFT OFFICE WORD. Se deben consignar tres copias y un CD-ROM del artículo.
 - 2.1 Artículos de actualización científica que resuman el “Estado del Arte” de las áreas de la revista, con un máximo de quince (15) páginas.
 - 2.2 Artículos de reflexión sobre un tema específico de las áreas de la revista, desde una perspectiva analítica, interpretativa o crítica del autor, recurriendo a fuentes originales.
 - 2.3 Artículos de revisión: documentos donde se analizan, sistematizan e integran los resultados de investigaciones, publicadas o no, sobre una temática especializada de las áreas de la revista.
 - 2.4 Artículos de discusión: documentos que presentan el debate de afirmaciones realizadas en artículos anteriores.
 - 2.5 Artículos de invitados especiales con un máximo de quince (15) páginas.
 - 2.6 Notas técnicas: sobre mejoras de procesos en ingeniería, resultados de investigaciones derivadas del ejercicio profesional en ingeniería y ciencias afines, con un máximo de ocho (8) páginas.
3. **La portada debe contener**
 - 3.1 Título del trabajo en español e inglés en letras mayúsculas y minúsculas.
 - 3.2 Nombre(s) del autor(s), 6 autores como máximo y su dirección institucional(es) completa(as) (dirección postal, correo electrónico).
 - 3.3 Resumen del trabajo en español e inglés (abstrac) con un máximo de doscientas (200) palabras.
 - 3.4 Palabras clave en español e inglés (key words) con un máximo de cinco (05) palabras.
4. **Normas de estilo**
 - 4.1 El orden a seguir para el artículo es: portada, resumen (en español e inglés), introducción, fundamentos teóricos, parte experimental, resultados, discusión de resultados, conclusiones, agradecimiento y referencias bibliográficas.
 - 4.2 El artículo debe escribirse en estilo Times New Roman tamaño 12, el título tamaño 16 y las figuras, tablas y texto subordinados tamaño 10.
 - 4.3 El interlineado debe ser doble espacio a excepción del resumen, agradecimiento y referencias bibliográficas que van a un espacio.
 - 4.4 El nombre de cada sección se escribirá en negritas. Estos deberán estar centrados.
 - 4.5 El nombre de las subsecciones se escribirá en negritas a la izquierda del texto y en mayúsculas y minúsculas.

- 4.6 Las figuras, fotografías, diagramas y gráficos deben denominarse como figuras y estas deben ir numeradas con números arábigos, así como las tablas. Además, deben incluirse dentro del texto correspondiente y con su respectiva leyenda.
- 4.7 La redacción de los trabajos puede ser en español o inglés.
- 4.8 Las fotografías, imágenes, mapas y figuras incluidas en el documento se anexaran también por separado en el CD-ROM con excelente calidad.
- 4.9 Las fotografías deben estar en blanco y negro, bien contrastadas y brillantes de un ancho máximo de 9,5cm.
- 4.10 Todos los símbolos matemáticos deben ser escritos en forma clara y legible, con los subíndices y superíndices ubicados correctamente.
- 4.11 Deben ser numeradas todas las ecuaciones matemáticas en forma consecutiva con números arábigos entre paréntesis y ubicados en el margen derecho.
- 4.12 Las citas dentro del documento se escriben con el nombre de sus autores seguido con un número entre corchetes que corresponde a la referencia.
Ejemplo: García [1], L. Moreno [3, Pág. 19-24] o ubicando el número de la referencia sin colocar autor [4], si son 3 o más autores se escribe K. Nishimoto et al. [2].
Las referencias bibliográficas de artículos de revistas deben contener autor(es) si tiene varios autores separarlos con comas, título de la revista, volumen y número, año de publicación (entre paréntesis) y páginas. Solo deben incluirse referencias bibliográficas con autores totalmente identificados y se escribirán por orden de aparición de las citas.
Ejemplo: García C., Marín J., Alaña J., Martínez K. y Faria J., Modelo de Nernst-Planck aplicado a la cinética de intercambio iónico del sistema PO₄(-3)- Cl(-1) en leche, Rev. Tec. Ing. Univ. Zulia, Vol. 30, N°. 3, (2007), 236-243.
Los libros se escriben: apellido e inicial del autor(es) con mayúsculas y minúsculas.
Ejemplo: Nishimoto K. (Editor), Fractional Calculus and its Applications, Nihon University, Tokyo (1990).
- 4.13 En los artículos deben emplearse unidades del Sistema Internacional: metro (m), kilogramos (Kg), Segundo (s), entre otras.

5. Arbitraje

- 5.1 El trabajo, recibido por el Editor(a), será enviado al Comité Editorial para su revisión y consideración de tres árbitros.
- 5.2 El método de arbitraje que sigue la revista es de tipo “doble ciego”, que consiste en que tanto los árbitros como los autores desconocen sus respectivas identidades.
- 5.3 Los trabajos serán evaluados de acuerdo a los siguientes criterios: claridad, originalidad del contenido, aportes al campo de conocimiento, coherencia del discurso, adecuada organización interna, calidad de las referencias bibliográficas, adecuada elaboración del resumen y pertinencia del título.
- 5.4 En caso de recibir observaciones por parte de los árbitros, estas serán enviadas al(los) autor(es) para su corrección. Después de realizar las correcciones, los autores devolverán la versión corregida en un CD-ROM, así como un original impreso y tres copias.
- 5.5 Las pruebas de imprenta serán enviadas a los autores para la revisión final del artículo.
- 5.6 Cuando el trabajo sea aceptado los autores serán informados del tiempo aproximado de publicación. Si el trabajo es rechazado los autores podrán remitir al Editor(a) Jefe una comunicación exponiendo argumentos a favor de su artículo. El Comité Editorial considerará las acciones a tomar.
- 5.7 Cada autor principal de los artículos publicados recibirá gratuitamente una (1) revista y cinco (5) separatas.

6. Consideraciones finales

- 6.1 Los conceptos u opiniones emitidos en los artículos, serán de exclusiva responsabilidad de los autores.
- 6.2 El Comité Editorial se reserva el derecho de los arreglos de estilo que considere conveniente.
- 6.3 Bajo ninguna circunstancia, la revista devolverá los originales (Impreso y CD-ROM) de los artículos enviados par su consideración.
- 6.4 Lo no previsto en las presentes normas será resuelto por el Comité Editorial.

Nota: Última revisión aprobada en reunión N° 70 del Comité Editorial de fecha 11 de Octubre del 2013.

Guidelines for Submitting Articles

1. URU techno-scientific journal is an arbitrated digital journal of the Rafael Urdaneta University, whose purpose is to publish scientific papers in the areas of engineering (Chemical, Civil, Electrical, Computer, Telecommunications, Industrial, Animal Production, etc.).

2. Types of articles

Articles will be accepted for publication which have not been submitted or published in other scientific journals, and should have a maximum of fifteen (15) pages, and written in MICROSOFT OFFICE WORD. Three copies should be submitted along with a CD-ROM containing the article.

- 2.1 Scientific articles that summarize the "state of the art " in areas of interest for the journal with a maximum of fifteen (15) pages.
- 2.2 Reflection articles on specific issues covered by the magazine, from an analytical, interpretative or critical viewpoint of the author, and based on original sources.
- 2.3 Review articles which analyze, systematize and integrate results, published or unpublished, on specific issues covered by the magazine.
- 2.4 Discussion articles: A document that presents the debate of assertions published in previous articles.
- 2.5 Articles by special guests with a maximum of fifteen (15) pages long.
- 2.6 Technical notes on process improvements in engineering, results of research obtained from professional practice in engineering and related fields, with a maximum of eight (8) pages.

3. The front page must contain

- 3.1 Title of paper in English and Spanish, in uppercase and lowercase letters.
- 3.2 Author's name , maximum of 6 authors and full institutional address or addresses (postal address, e-mail).
- 3.3 Abstract in Spanish and English with a maximum of two hundred (200) words.
- 3.4 Key words in Spanish and English with a maximum of five (5) words.

4. Text guidelines

- 4.1 The sequence for the article should be as follows: title, abstract (in English and Spanish), introduction, theoretical foundations, experimental part, and discussion of results, conclusions, acknowledgements and references.
- 4.2 Article should be written in 12 point Times New Roman, and 16 point for the title, and figures, tables and subordinate text should use 10 point. Interlining should be double space; abstract, acknowledgments and references should be single space.
- 4.3 The heading of each section should be centered and written in boldface letters.
- 4.4 Subsections headings should be written in boldface letters on the left of text and in upper and lower case letters.
- 4.5 Figures, photographs, diagrams and charts should be labeled as figures, and numbered with Arabic numerals, as well as tables. They should be included within the corresponding text along any explanation.
- 4.6 The article draft should be in Spanish or English.
- 4.7 Photographs, images and figures included in the document should be annexed separately on a CD-ROM of excellent quality.

- 4.8 Photographs must be in black and white, with good contrast and brightness, with a maximum width of 9.5 centimeters.
- 4.9 Mathematical symbols should be written clearly and legibly, with subscripts and superscripts correctly located.
- 4.10 Mathematical equations should be numbered sequentially with Arabic numerals within parentheses and placed on the right margin.
- 4.11 Quotations within the document should be written with the author's name followed with a number inside brackets that corresponds to the reference. Examples: García [1], L. Moreno [3, pages 19-24] or, if there are three or more authors, the reference number without the author's name [4], and written as K.Nishimoto et al. [2].
- 4.12 Bibliographic references to journal articles should include author (s) name (s); if it has multiple authors, their names should be separated by commas, title of journal, volume and number, year of publication (in parentheses) and page numbers. Bibliographical references should be included only when authors are fully identified and they will be written in order of appearance of the quote. Example: Garcia C., Marin J., Alaña J., Martinez K y Faria J., Model of Nernst-Planck applied to the ion exchange kinetics of the PO4 (-3)-Cl(1) system in milk, Rev. Tec. Ing. Univ. Zulia, vol. 30, N° 3, (2007), 236-243.
Books references should be written: surname and initial of the author (s) name (s) in uppercase and lowercase letters.
Example: Nishimoto K. (editor), Fractional calculus and its applications, Nihon University, Tokyo (1990).
- 4.13 Articles should use the International System Units: meter (m), kilogram (kg), second (s).

Evaluation

- 5.1 Articles received by the Editor (s) will be submitted to the Editorial Committee for review and consideration of three arbitrators.
- 5.2 The evaluation method followed by the Journal is of the "double blindness" type; neither the arbitrators nor the authors know their respective identities.
- 5.3 The works submitted will be evaluated according to the following criteria: clarity of language, originality of contents, contributions to the field of knowledge, coherence, adequate internal organization and quality of bibliographic references, appropriate elaboration of the abstract and relevance of title.
- 5.4 In case of observations from the referees, these will be forwarded to the author (s) for corrections. After making corrections, the authors should return the corrected version on a CD-ROM, as well as an original of the reviewed work and three copies.
- 5.5 Press proof will be sent to authors for final review of the article.
- 5.6 When the work is accepted, authors will be informed of the approximate date of publication. If the work is rejected, the author may submit a communication to the Editor in Chief presenting his arguments in favor of the article. The Editorial Committee will consider the actions to take.
- 5.7 Each author will receive one (1) free copy of the journal volume and 5 reprints.

Final considerations

- 6.1 Concepts or opinions expressed in articles shall be the sole responsibility of the authors.
- 6.2 The Editorial Committee reserves the right for any format changes that considers convenient.
- 6.3 Under no circumstances, the magazine will return the original of the articles (print and CD-ROM) submitted for consideration.
- 6.4 Questions not answered by these guidelines shall be resolved by the Editorial Committee.

***Revista Tecnocientífica URU* N° 5**
Maracaibo, Venezuela
Diseño: Impresos Grafifor, C.A.