



Mayo-Agosto 2022, Vol. 29, N° 2, ISSN 1316-6832
Online ISSN: 2610-8240



Revista INGENIERÍA UC

Órgano de Divulgación
Científica y Tecnológica de la Facultad de Ingeniería
de la Universidad de Carabobo

Disponible en:
Revista Ingeniería UC

<http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista>
<https://www.revistas.uc.edu.ve/index.php/revinguc>
www.redalyc.org/revista.oa?id=707

VALENCIA - VENEZUELA

ISSN 1316–6832

Depósito legal pp 92.0200

Online ISSN: 2610-8240

Revista indizada en:

REVENCYT (Venezuela); Actualidad Iberoamericana (CIT–Chile); IET/INSPEC (Unitec Kingdom UK); DRJI (The Directory of Research Journal Indexing); LATINDEX–Catálogo (México); REDALYC (México); Periódica (México) Emerging Sources Citation Index, Thomson Reuters; MIAR–Matriz de información para el análisis de revista; RedIB Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico; DOAJ–Directory of Open Access Journals.

Revista Ingeniería UC

Órgano de Divulgación Científica y Tecnológica
Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo
Valencia–Venezuela

Editor - Jefe

Prof. Ángel D. Almarza M., Dr. Dirección de Investigación y Producción Intelectual, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela. ✉

Editores Honorarios

Prof. Edilberto Guevara, PhD. Vocal of the National Tribunal of Water. National Water Authority, Perú. Instituto Hidrología Aplicada y Medio Ambiente (IHAMA), Lima, Perú. Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela. Período (1992-2003). ✉

Prof. Francisco Arteaga, PhD. Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela. Período (2003-2009). ✉

Prof^a. Lisbeth Manganiello, PhD. Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela. Período (2009-2018). ✉

Editores Asociados

Prof^a. Evelyn Yamal. Dra. Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela. ✉

Prof^a. Lissette Jiménez. Dra. Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela. ✉

Prof^a. Beatriz Herrera. Dra. Universidad Católica de Leuven, Bélgica. ✉

Corrector de redacción y estilo

Prof^a. Vanessa Hurtado. M.Sc. Escuela de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo. Venezuela. ✉

Junta Editorial

Dr. Adelmo Ortiz Conde

Universidad Simón Bolívar, Venezuela. ✉

Dra. Maura Vázquez de Ramírez

Universidad Central de Venezuela, Venezuela. ✉

Dr. Guillermo Ramírez

Universidad Central de Venezuela, Venezuela. ✉

Dr. Antonino Caralli

Universidad de Carabobo, Venezuela. ✉

Dr. Pablo Baricelli

Universidad de Carabobo, Venezuela. ✉

Dr. Johnny Bullon

Universidad de los Andes, Venezuela. ✉

Dr. Sergio Mora

Universidad de Santiago de Chile, Chile. ✉

Dr. Herbert J. Sira R.

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México. ✉

Dr. Enrique Barbieri

University of Houston, Estados Unidos. ✉

Dr. Ángel Rios Castro

Universidad de Castilla La Mancha, España. ✉

Dr. Merlín Rosales

Universidad del Zulia, Venezuela. ✉

Dr. José A. Díaz

Universidad de Carabobo, Venezuela. ✉

Dr. Carlos Martínez

Universidad de Carabobo, Venezuela. ✉

Dr. Roberto Callarotti

Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, Venezuela. ✉

Dr. Teodoro García

Universidad de Carabobo, Venezuela. ✉

ISSN 1316–6832

Depósito legal pp 92.0200

Online ISSN: 2610-8240

Revista indizada en:

REVENCYT (Venezuela); Actualidad Iberoamericana (CIT–Chile); IET/INSPEC (United Kingdom UK); DRJI (The Directory of Research Journal Indexing); LATINDEX–Catálogo (México); REDALYC (México); Periódica (México) Emerging Sources Citation Index, Thomson Reuters; MIAR–Matriz de información para el análisis de revista; RedIB Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico; DOAJ–Directory of Open Access Journals.

Revista Ingeniería UC

Órgano de Divulgación Científica y Tecnológica
Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo
Valencia–Venezuela

Comité Técnico*

Dr. Luis G. Zárate López, Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, México

Dr. Enrique Cázares Rivera, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México

Dra. Laura Sáenz, Universidad de las Fuerzas Armadas, Sede Latacunga, Ecuador

Ing. Johel Rodríguez, M.Sc., Universitat Politècnica de València, España

Ing. Pedro Vargas Ferrer, M.Sc., Universidad de Talca, Chile

Dr. Eliecer Colina, Universidad de Los Andes, Venezuela

Dr. Francisco García Sánchez, Universidad Simón Bolívar, Venezuela

Dr. Fernando Mora, Universidad Simón Bolívar, Venezuela

Dr. Carlos Hurtado, Universidad de Oriente, Venezuela

Dr. Giovanni De Mercato, Universidad Simón Bolívar, Venezuela

Dr. Gian Franco Passariello, Universidad Simón Bolívar, Venezuela

Dr. William Castro, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, Venezuela

Dr. Oscar Crescente, Universidad de Oriente, Venezuela

Dr. Luis Mata Guevara, Universidad de Oriente, Venezuela

Dra. Maj Britt Mostue, Universidad de Oriente, Venezuela

*Lista parcial

Dra. Susana Salinas de Romero, Universidad del Zulia, Venezuela

Lic. Hernando Herrera Mata, M.Sc., Universidad de Oriente, Venezuela

Ing. Carlos Lameda, M.Sc., Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre, Venezuela

Ing. Alfonso Alfonsi, Universidad de Oriente, Venezuela

Dr. William C. Henriquez Guzmán, Universidad de Oriente, Venezuela

Dr. Sergio Pérez Pacheco, Universidad Estatal de Bolívar, Ecuador

Dr. César O. Seijas Fossi, Universidad de Carabobo, Venezuela

Dr. Demetrio Rey Lago, Universidad de Carabobo, Venezuela

Dr. Alfonso Zozaya, Universidad de Carabobo, Venezuela

Dra. Damelys Zabala, Universidad de Carabobo, Venezuela

Dra. Lilly Marcano, Universidad de Carabobo, Venezuela

Dr. Antonio Bonsjak, Universidad de Carabobo, Venezuela

Dr. Guillermo Montilla, Universidad de Carabobo, Venezuela

Dr. Luis Vallés, Universidad de Carabobo, Venezuela

Dr. José A. Díaz, Universidad de Carabobo, Venezuela

Frecuencia de publicación

Revista INGENIERÍA UC se publica un volumen anual en tres números: abril, agosto y diciembre

Información de Contacto

<http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/>


<https://www.redalyc.org/revista.oa?id=707>


Correo–e: revistaing@uc.edu.ve

Correo–e: revistaing@gmail.com

Correo–e: adalmarza@uc.edu.ve (A. Almarza)

Redes sociales

 Twitter: @RevistaIngUC

 Instagram: revistainguc

Diseño, Diagramación y Montaje en L^AT_EX: **Revista Ingeniería UC**, Dirección de Investigación y Producción Intelectual, Facultad de Ingeniería, Valencia, Venezuela

Web master: Ing. Francisco Ponte, Biblioteca Central, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela

ISSN 1316-6832
Online ISSN: 2610-8240



Revista Ingeniería UC

ÓRGANO DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIVERSIDAD DE CARABOBO

Valencia – Venezuela

Contenido General, (*General content*)

Volumen 29 Número 2	104
Editorial	105
<i>Manuel Jiménez-Bahri, Ángel Almarza-Morales</i>	
1 Una herramienta para el diseño de redes MSMN de banda ancha en líneas de transmisión basada en algoritmos heurísticos de optimización comparados	
A tool for the design of broadband MSMN networks on transmission lines based on the comparison of optimization heuristic algorithms	
<i>Abraham Hidalgo, Fabián Robledo</i>	106
2 Calibración de la curva número del modelo SCS para la región de la costa norte del Perú	
Calibration of the curve number of the SCS model for the region of the north coast of Peru	
<i>Jhon Alberca, Jesús Mejía, Edilberto Guevara-Pérez</i>	124
3 Efecto del cambio climático sobre los caudales en la cuenca del río Piura usando GCM del CMIP6.	
Estimation of the effect of climate change on the flows of the medium-high basin of the Piura River using GCM from CMIP6.	
<i>Jhon Alberca, Jesús Mejía, Edilberto Guevara-Pérez</i>	136
4 Actividad microbiológica como indicador de calidad en suelos arenosos de playas del municipio Puerto Cabello, estado Carabobo	
Microbiological activity as a quality indicator in sandy soils on beaches in Puerto Cabello municipality, Carabobo state	
<i>Joselin Albuja, Arnaldo Armado</i>	145

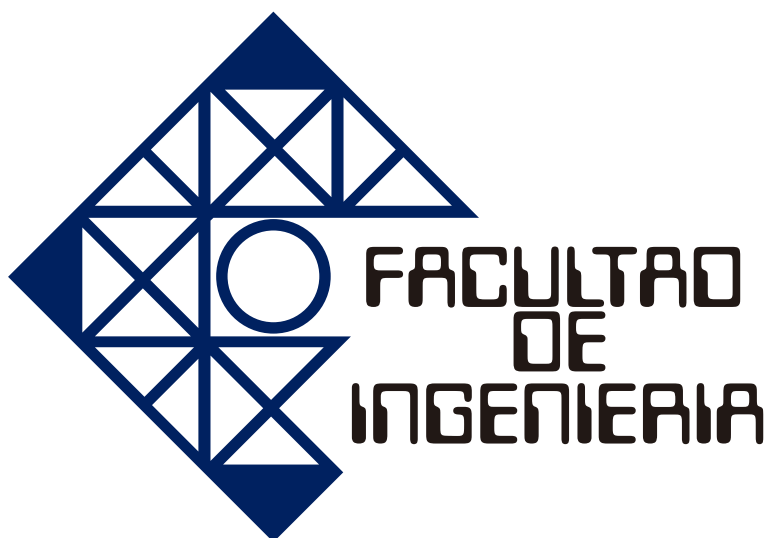
5	Establecimiento del sistema de embriogénesis somática en <i>Azadirachta indica</i> A. Juss a partir de suspensiones celulares, acoplado a la producción de azadiractina <i>in vitro</i>	
	Establishment of the system of somatic embryogenesis in <i>Azadirachta indica</i> A. Juss from cell suspensions, coupled to the production of azadiractin <i>in vitro</i>	
	<i>Rafael Fernández Da Silva y Valeria Montilla</i>	156
6	STATIS-CNS2: una técnica de análisis exploratorio para datos no simétricos cualitativos	
	STATIS-CNS2: an exploratory analysis technique for qualitative non-symmetric data	
	<i>Jennyfer Combariza, Guillermo Ramírez, Maura Vasquez</i>	168
7	Diseño e implementación de un esquema de rendimiento para una plataforma e-learning	
	Design and implementation of a performance scheme for an e-learning platform	
	<i>Yaneth Moreno, Gustavo Mejía, Francisco Hidrobo</i>	184
8	Simulación de falla por contacto rodante de un tambor rotativo en una empresa petroquímica	
	Simulation of failure by rolling contact of a rotating drum in a petrochemical company	
	<i>Fendix Peña, Jorge Romero</i>	194
	Índice de materias	211
	Subjects index	212
	Índice de autores (<i>Author index</i>)	213
	Apéndices	1
	A. Línea editorial	2
	B. Editorial line	3
	C. Políticas de ética y publicación	4
	D. Ethics and Publication Policies	8
	E. Normas para la presentación de artículos	12
	F. Authors Information	15
	G. Carta de compromiso	17

H. Compromise letter

18

I. Índices de Revista Ingeniería UC

19



Volumen 29 Número 2

Editorial

Presentamos el volumen 29 N° 2 de la Revista Ingeniería UC, manteniendo nuestro compromiso con la divulgación científica de productos de investigación de relevancia y pertinencia, consolidando además los atributos de calidad editorial que nos permiten hacernos cada vez más visibles y lograr un mayor alcance.

Agradecemos, como es costumbre a los autores que han depositado su confianza en nosotros y también a nuestro equipo editorial que de manera incansable trabaja con esmero para cumplir con la misión de difundir los trabajos científicos y tecnológicos que en todas las áreas de la ingeniería y ciencias afines se generan.

Abrimos el número con la investigación desarrollada por Hidalgo y Robledo, quienes nos muestran una herramienta para el diseño de redes MSMN de banda ancha en líneas de transmisión basada en algoritmos heurísticos de optimización comparados.

Seguidamente, Alberca y su grupo de investigación presentan dos productos de investigación que revisten importancia desde el punto de vista del comportamiento de los recursos hídricos y la incidencia de eventos como inundaciones y sequías. En el primero, abordan la calibración de la curva número del modelo SCS para la región de la costa norte del Perú, y en el segundo, estiman el efecto del cambio climático sobre los caudales en la cuenca del río Piura usando GCM del CMIP6.

Paralelamente, Albuja y Armado, desarrollaron el estudio de la actividad microbiana en los suelos arenosos del municipio Puerto Cabello del estado Carabobo como posible indicador ambiental, donde dicha actividad se estimó a través de la determinación de la respiración basal (RB) y el carbono de la biomasa (Cbiomasa) por el método de fumigación-incubación. Por otra parte, Fernández y sus colaboradores, abordan el establecimiento del sistema de embriogénesis somática en *Azadirachta indica* A. Juss a partir de suspensiones celulares, acoplado a la producción de azadiractina *in vitro*.

Combariza, Ramírez y Vásquez, presentan una técnica para el análisis exploratorio de datos no simétricos, basada en el STATIS, que permita comparar y explicar simultáneamente la influencia que tiene una variable cualitativa explicativa x como determinante de una variable categórica criterio y en H ocasiones.

Por su parte, Moreno y sus colaboradores proponen la implementación de un esquema transaccional para la optimización del acceso a recursos digitales (documentos, archivos multimedia, entre otros) dentro de una plataforma e-learning.

Para cerrar, Romero y Peña desarrollaron la simulación de falla por contacto rodante entre la llanta y rodillo de un tambor rotativo perteneciente a una planta petroquímica, con la finalidad de determinar la tasa de falla y los factores que influyen en ella.

Profesor *Manuel Jiménez-Bahri*
Decano de la Facultad de Ingeniería

Profesor *Ángel Daniel Almarza*, Dr.
Editor – Jefe

A tool for the design of broadband MSMN networks on transmission lines based on the comparison of optimization heuristic algorithms

Abraham Hidalgo ^a , Fabián Robledo ^{*,b} 

^aEscuela de Ingeniería de Telecomunicaciones, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.

^bDepartamento de Electrónica y Comunicaciones, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.



<https://doi.org/10.54139/revinguc.v29i2.171>

Abstract.- We present the development and results of a Python-programmed tool for the design of broadband multiple stub impedance matching networks (MSMN) in transmission line systems, employing a suite of heuristic optimization algorithms including: Nelder-Mead, Differential Evolution, Dual Annealing, Brute Force, Whale Optimization Algorithm (WOA), Equilibrium Optimizer (EO), Harris Hawks Optimization (HHO), Virus Colony Search (VCS) and Artificial Ecosystem-Based Optimization (AEO); offering comparable solutions that seek to satisfy a given matching specification, taking as the work function the magnitude of the voltage reflection coefficient, in a given bandwidth, just at the input plane to the network, connected to a line loaded with a modelable arbitrary impedance. The tool uses the indicated algorithms to determine the positions and lengths of the stubs of the MSMN network. The algorithms were obtained from the Mealpy and SciPy libraries. Figures of merit were designed that allowed comparing the quality of the solutions. The results were compared with those of the Keysight ADS simulator, and 3 test examples were executed using the algorithms, yielding viable adaptation results, which are discussed.

Keywords: Impedance matching; Heuristic algorithms; Transmission lines; MSMN; Optimization; Stubs.

Una herramienta para el diseño de redes MSMN de banda ancha en líneas de transmisión basada en algoritmos heurísticos de optimización comparados

Resumen.- Se presenta el desarrollo y resultados de una herramienta programada en Python para el diseño de redes de adaptación de impedancia de banda ancha y múltiples stubs (MSMN) en sistemas de líneas de transmisión, que emplea una suite de algoritmos heurísticos de optimización, incluyendo: Nelder-Mead, evolución diferencial, recocido dual, fuerza bruta, optimización de ballenas (WOA), optimizador de equilibrio (EO), optimización de halcones Harris (HHO), búsqueda de colonias de virus (VCS) y optimización basada en ecosistemas artificiales (AEO); ofreciendo soluciones comparables que procuran satisfacer una especificación dada de adaptación, tomando como función de trabajo la magnitud del coeficiente de reflexión de voltaje, en un ancho de banda determinado, justo en el plano de entrada a la red, conectada a una línea cargada con una impedancia arbitraria modelable. La herramienta emplea los algoritmos señalados para determinar las posiciones y longitudes de los stubs de la red MSMN. Los algoritmos se obtuvieron de las librerías Mealpy y SciPy. Se diseñaron figuras de mérito que permitieron comparar la calidad de las soluciones. Se contrastaron los resultados con los del simulador Keysight ADS y se ejecutaron 3 ejemplos de prueba empleando los algoritmos, proporcionando resultados viables de adaptación, los cuales se discuten.

Palabras clave: Adaptación de impedancia; Algoritmos heurísticos; Líneas de transmisión; MSMN; Optimización; Stubs.

Received: 11 de julio, 2022.

Accepted: 15 de agosto, 2022.

1. Introducción

En los sistemas de líneas de transmisión, formados por generador, línea y carga (por ejemplo, una antena), la adaptación de impedancias es una operación difícil cuando se abarca una banda ancha de frecuencias. Generalmente, la impedancia

* Autor para correspondencia:

Correo-e: frobledo@uc.edu.ve (F. Robledo)

característica de las líneas de transmisión y la impedancia de entrada de los sistemas de antena pueden incluir componentes reactivas, lo que hace que varíen en la banda de frecuencias de operación, produciendo desadaptación y dando lugar a ondas reflejadas indeseadas hacia el generador [1]. Se requiere que el sistema de transmisión esté adaptado en impedancia para maximizar la potencia hacia la carga, de modo que adaptar una línea de transmisión consiste en hacer desaparecer de ella las ondas reflejadas, al conseguir que la impedancia vista desde el plano de adaptación sea igual a la impedancia característica de la línea de transmisión [2]. Para lograr esto una alternativa es colocar, entre la línea de transmisión de impedancia característica Z_c y la carga Z_L , una red de adaptación que emplee N brazos de reactancia o *stubs*, conocida como MSMN (Multiple Stub Matching Network), de la cual un ejemplo se muestra en el sistema de la Figura 1 para stubs en paralelo cargados en cortocircuito. Idealmente, en el diseño se persigue el objetivo de que la impedancia de entrada Z_{in} vista en el plano $d = d_A$ hacia la derecha sea igual a la Z_c de la línea.

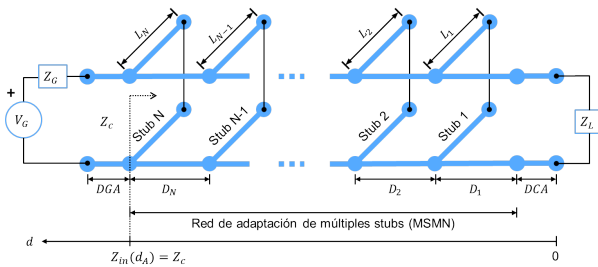


Figura 1: Red de adaptación MSMN de N stubs en paralelo (en corto circuito), ubicada entre el generador y la carga

Un stub es un segmento de línea de transmisión sin pérdidas (o con muy bajas pérdidas), cargado en corto circuito o en circuito abierto, conectado en paralelo o serie en una línea principal, que presenta cierta reactancia dominante en su puerto de entrada, dependiendo de su longitud y de la frecuencia. Diseñar la red MSMN consiste en determinar todas las longitudes $L_i (i = 1, \dots, N)$ y posiciones D_i de los N stubs que posee, para lograr

cierto grado de adaptación a partir de la entrada a la red. El problema de desadaptación ha sido tratado analíticamente en sistemas de banda estrecha y hasta 2 stubs por diversos autores [1, 2, 3, 4, 5]. Sin embargo, estos se enfocan en soluciones analíticas exactas para adaptar el sistema a una frecuencia de operación, y condiciona el funcionamiento óptimo, pues el ancho de banda puede llegar a ser insuficiente según se incrementa la tasa de transmisión en los sistemas digitales, llegando hasta 20 Gbps en redes 5G [6], así como también en sistemas de espectro disperso, o cuando se requiere la multiplexión FDM de señales de TV en plantas que reutilizan la antena para varios canales UHF, en sitios de transmisión y torres comunitarias.

Considerar la adaptación de sistemas de líneas de transmisión en banda ancha con redes MSMN ofrece oportunidades para el desarrollo de nuevas metodologías [7, 8, 9]. No obstante, determinar las posiciones y longitudes exactas de los N stubs de la red MSMN en diseños de banda ancha representa una tarea complicada para ser considerada en la práctica, haciendo que el recurso computacional sea indispensable a los fines de obtener soluciones numéricas, y donde el empleo de algoritmos adecuados en la búsqueda de soluciones al problema no lineal es pertinente, siendo ahora posible aplicar Algoritmos Heurísticos de Optimización (AHO), cuya viabilidad se plantea en este estudio.

Para ello se desarrolló una herramienta de software que, dado un sistema de línea de transmisión desadaptado, diseñe la red MSMN con stubs en paralelo requerida para lograr un grado determinado de adaptación en banda ancha, en torno a una frecuencia central. Con este fin se emplearon varios AHO en base a sus ventajas [10, 11], candidatos para tratar de determinar soluciones que indiquen las posiciones y longitudes de los N stubs de la red MSMN. Se emplearon varios AHO de naturaleza lógica distinta, debido a que la no linealidad inherente al problema que se resuelve implica que no necesariamente todos estos podrán arrojar una solución viable en tiempos de cómputo razonables, siendo deseable disponer de alternativas ante un problema que puede tener múltiples soluciones, algunas de ellas subóptimas

por tratarse de resultados de extremalización local, pero aun así pertinentes para su consideración comparada. Estos AHO buscan minimizar el módulo del coeficiente de reflexión de voltaje $|\Gamma|$, estableciendo previamente un valor máximo permitido $|\Gamma|_{\text{Máx}}$ en todo el Ancho de Banda de Adaptación o ABA alrededor de la frecuencia central f_0 y en un plano determinado $d = d_A$, ubicado típicamente a la entrada de la red MSMN de modo que, idealmente, se requiere que el comportamiento espectral de $|\Gamma| = |\Gamma|(f)$ sea allí relativamente plano, como se ilustra en la traza ejemplo de la Figura 2, permitiendo al usuario que seleccione los parámetros $|\Gamma|_{\text{Máx}}$, f_0 y el ABA.

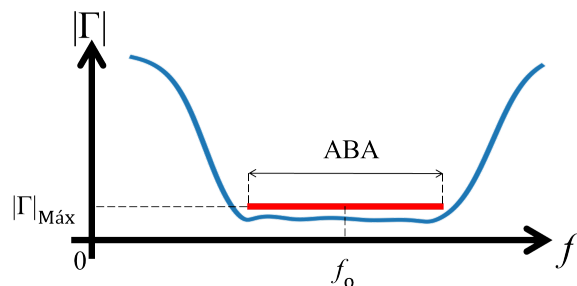


Figura 2: Espectro deseable típico de $|\Gamma|(f)$ en el ABA, a la entrada de la red MSMN en $d = d_A$

En la herramienta (programada en Python) se tomaron en consideración los parámetros de la línea y las posibles pérdidas; y se consideraron impedancias de carga con componente reactiva, con varias topologías y tipo de filtrado, incluyendo opciones resonantes. Estos dos últimos aspectos, que afectan la adaptación de impedancias y el funcionamiento del sistema, representan un avance en relación a los trabajos sobre redes MSMN publicados en [7] y [8], ya que los mismos consideraron sólo impedancias de carga no selectivas en frecuencia. La herramienta diseñada, a la que se llamó *Eureka MSMN*, cuenta con una interfaz gráfica interactiva mediante la cual el usuario puede diseñar el problema a resolver y verificar el funcionamiento de la red MSMN en toda la banda de frecuencias de interés, y a lo largo de toda la línea de transmisión y de la propia red, incluyendo antes y después de su inserción. La búsqueda de las soluciones al problema de adaptación se realiza mediante la utilización de

hasta 9 AHO distintos publicados, los cuales se describen en la Sección 2.

El problema de la adaptación se traslada entonces a otro de optimización, donde $|\Gamma|$, que es función de la frecuencia, de la carga, de los parámetros de la línea, de las longitudes de los stubs y de la ubicación de los mismos; se usa para construir la función de trabajo monoobjetivo a extremalizar, la cual se denomina $F_{obj}(D_i, L_i)$ y que representa una medida de dispersión del error cuadrático de $|\Gamma|$ con respecto a $|\Gamma|_{\text{Máx}}$ en la banda de interés, estando dada su definición precisa en la sección 2. Por ejemplo, en la Figura 3 se muestran los resultados de un diseño en banda L para una red MSMN, primero de 1 stub y luego de 9 stubs, observándose que en general el incremento de N aumenta el ancho de banda de adaptación de $|\Gamma|$, genera un rizado en la banda pasante y modifica las pendientes en las bandas de transición y de rechazo, dando opciones para ir a un diseño como el de la Figura 2.

Los objetivos específicos de esta investigación fueron los siguientes:

1. Desarrollar un módulo para el análisis de desempeño de adaptación en una red MSMN de banda ancha, con parámetros y topología de stubs dados en un sistema de línea de transmisión.
2. Desarrollar módulos computacionales basados en AHO, para la obtención de soluciones de adaptación óptima (o cercana a esta) en líneas de transmisión empleando redes MSMN de banda ancha bajo restricciones de diseño.
3. Comparar el rendimiento de los algoritmos implementados en los módulos computacionales.
4. Documentar la herramienta mediante un manual de instalación, operación, consideraciones y previsiones para la inserción de nuevos módulos computacionales para futuros trabajos.

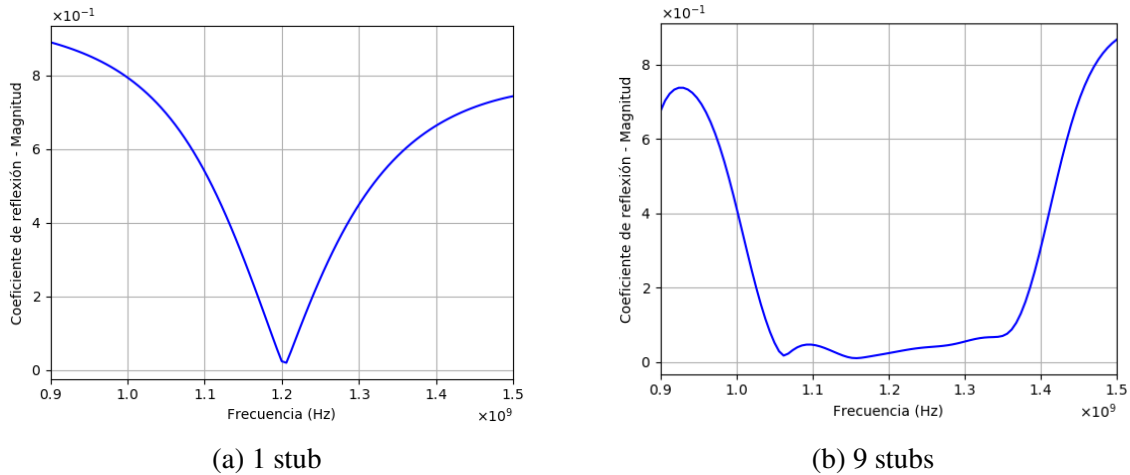


Figura 3: Adaptación en un sistema ejemplo de banda L con una red MSMN, empleando la herramienta de software *Eureka MSMN*

2. Metodología y desarrollo de la herramienta de software *Eureka MSMN*

Los AHO son algoritmos para resolver problemas que se modelan como búsquedas u optimización de funciones, difíciles de abordar en un tiempo razonable por otros algoritmos exhaustivos. La ventaja de los AHO es que son eficientes para obtener mínimos o máximos de alguna función que tenga una gran cantidad de variables independientes [10], como es el caso en estudio. La función generalmente se llama “función objetivo”, y representa una medida cuantitativa de la “bondad” de la configuración de un sistema determinado como solución de un problema. Dicha función depende de la configuración del sistema, que incluye parámetros y topología. Los AHO recorren el espacio de soluciones e intentan encontrar la combinación de variables independientes que corresponda a la mejor solución posible (configuración) para extremalizar la función objetivo [11]. Estos métodos toman como punto de partida una solución inicial dada, que intentarán mejorar aplicándole ciertos operadores, para calcular otras soluciones similares (vecinas) por las cuales se procede a continuar la búsqueda. Así se supone que, modificando una solución al problema, se podrían calcular soluciones mejores, iterando.

Estos AHO se aplican cuando el tamaño del espacio de soluciones es muy grande. Los AHO

se encargan de “podar” el espacio de soluciones, es decir, ayudan a eliminar caminos que llevan a soluciones de peor calidad que la solución actual. El inconveniente es que se pueden descartar caminos que conduzcan a soluciones “buenas”, o que se encuentren máximos o mínimos locales. Los 9 AHO empleados en *Eureka MSMN* se obtuvieron de la librería especializada de nombre *Meta-heuristics Algorithms in Python*, Mealpy [12] y de la librería estándar SciPy de Python, ambas de licencia libre; y poseen los siguientes nombres: Nelder-Mead [13], evolución diferencial [14], recocido dual [15], fuerza bruta, optimización de ballenas [16], optimizador de equilibrio [17], optimización de halcones Harris [18], búsqueda de colonias de virus [19], y optimización basada en ecosistemas artificiales [20]. En la Tabla 1 se muestra un resumen de las características de los AHO utilizados.

En este estudio, la función objetivo que se pretende minimizar tiene $2N$ grados de libertad y se denota como $F_{obj}(D_i, L_i) \equiv F_{obj}(D_1, D_2, \dots, D_N, L_1, L_2, \dots, L_N)$, definiéndose como una acumulación espectral no negativa de errores cuadráticos $E(f_n, D_i, L_i)$ en el ABA de interés, según la ecuación (1):

$$F_{obj}(D_i, L_i) = \sum_{n=n_l}^{n_f} E(f_n, D_i, L_i) \quad (1)$$

Donde D_i y L_i son las distancias de ubicación

Tabla 1: AHO empleados en la herramienta *Eureka MSMN*

Nombre	Abrev.	Diseñador	Enfoque	Aplicación	Ventajas	Desventajas
Nelder-Mead	-	J. Nelder y R. Mead.	Búsqueda de patrones.	Optimización de funciones unimodales.	Aplicable a funciones discontinuas.	Propenso a estancarse en óptimos locales.
Evolución diferencial	DE	R. Storn y K. Price.	Basado en población.	Diseño de filtros digitales.	Requiere pocas variables de control.	Dificultad con conjuntos no linealmente separables.
Recocido dual	-	Xiang Y, Sun DY, Fan W y Gong XG.	Estocástico.	Problemas similares al “agente viajero”.	Mayor chance de obtener el óptimo global.	Menor precisión.
Fuerza bruta	-	-	Exhaustivo.	Funciones de pocas variables.	Logra el valor óptimo global.	Alto consumo de tiempo.
Optimización de ballenas	WOA	S. Mirjalili y A. Lewis.	Inteligencia de enjambre.	Reconocimiento de patrones.	Rapidez.	Variables de control requeridas.
Optimizador de equilibrio	EO	A. Faramarzi, M. Heidarinejad, B. Stephens y S. Mirjalili.	Flujo de masa.	Problema de despacho económico de carga.	Eficiente al hallar el óptimo global.	La versión original no es multiobjetivo.
Optimización de halcones Harris	HHO	A. Heidari, S. Mirjalili, H. Faris, I. Aljarah, M. Mafarja y H. Chen.	Basado en cooperar.	Problemas de optimización con restricciones matemáticas.	Evita valores óptimos locales.	La versión original no es multiobjetivo
Búsqueda de colonias de virus	VCS	Mu Dong Li, Hui Zhao, Xing Wei Weng y Tong Han.	Difusión e infección.	Asignación de recursos de computación en la nube.	Mayor eficiencia al explorar.	Alto consumo de tiempo.
Optimización basada en ecosistemas artificiales	AEO	W. Zhao, L. Wang y Z. Zhang.	Flujo de energía.	Identificación de parámetros hidrogeológicos.	Mayor eficiencia de cómputo.	La versión original no es multiobjetivo.

de cada uno los N stubs con respecto a la carga, y las longitudes de estos, respectivamente; f_n es la frecuencia discreta dentro del ABA en consideración, que se barre desde una frecuencia inicial $f(n_I)$ hasta una frecuencia final $f(n_F)$, siendo n_I y n_F números enteros que indexan los límites de la discretización del rango de frecuencias del $ABA = f(n_F) - f(n_I)$, con suficiente resolución.

Los términos de error $E(f_n, D_i, L_i)$ que se suman en (1) para cada frecuencia f_n están dados por el error cuadrático entre el valor de $|\Gamma|$ a la frecuencia f_n y $|\Gamma|_{Máx}$, en el plano de adaptación $d = d_A$ donde se ubica la red MSNM (Figura 1), siendo $|\Gamma|_{Máx}$ el máximo valor permitido para $|\Gamma|$ a la entrada de la red. Esto se define condicionalmente en la ecuación (2):

$$E(f_n, D_i, L_i) = \begin{cases} 0 & , |\Gamma(f_n, D_i, L_i)| \leq |\Gamma|_{Máx} \\ [|\Gamma(f_n, D_i, L_i)| - |\Gamma|_{Máx}]^2 & , |\Gamma(f_n, D_i, L_i)| > |\Gamma|_{Máx} \end{cases} \quad (2)$$

Para una configuración dada de stubs, la situación ideal $F_{obj}(D_i, L_i) = 0$ se obtendría en el caso de que en todo el ABA la solución satisface $|\Gamma(f_n, D_i, L_i)| \leq |\Gamma|_{Máx}$. Si esto no se logra en todo el ABA, entonces el error cuadrático de (2) se toma en cuenta para esa configuración, acumulándose según (1), para dar la función objetivo $F_{obj}(D_i, L_i)$

asociada a esa configuración particular, la cual se compara con la obtenida por otras configuraciones por parte del AHO, para tratar de encontrar una configuración que se aproxime a una solución óptima, al menos localmente.

El lenguaje de programación fue Python v3.7, debido a su carácter OO, a ser de código abierto

y a disponerse de librerías para su reutilización al implementar los AHO. La librería para desarrollo de interfaz gráfica de usuario (IGU) fue *PyQt*, con su herramienta *Qt Designer*. En relación a las funciones matemáticas se utilizaron las librerías estándar *math* y *cmath* de *Python*. También se usaron las librerías *Numpy* y *SciPy* para el manejo de arreglos y la interpolación. Para graficar se empleó *Matplotlib* de *Python*, así como también el módulo *plotting.smith* de la librería *Scikit-rl* con el objetivo de generar cartas de *Smith*.

Los AHO se incorporaron utilizando la librería *Mealpy* y el módulo *optimize* de la librería *SciPy*. El módulo *optimize* aportó funciones para extremalizar funciones matemáticas sujetas a restricciones, incluyendo solucionadores para problemas no lineales, soportando algoritmos de optimización local y global. De este módulo *optimize* se emplearon 4 AHO, siendo estos: *Nelder-Mead*, *evolución diferencial*, *recocido dual* y *fuerza bruta*. Por otra parte, de la librería *Mealpy*, que contiene 176 AHO adaptados por *Van Thieu* [12] se emplearon 5 AHO, siendo estos: Algoritmo de optimización de ballenas, optimizador de equilibrio, optimización de halcones *Harris*, búsqueda de colonia de virus y optimización basada en ecosistemas artificiales. Los 9 algoritmos mencionados fueron el resultado de las pruebas preliminares, que justificaron su selección como candidatos para el problema de adaptación con la red *MSMN*. También se usó el módulo *threading* multihilo de *Python*.

Se diseñó la herramienta de modo que se pudiera elegir entre dos modos de operación, llamados “Análisis de *MSMN*” y “Diseño de *MSMN*”. En el Modo Análisis el usuario selecciona los datos de cada elemento del sistema: Generador, línea de transmisión, configuración particular de la red *MSMN* (Número, posiciones y longitudes de los stubs) e impedancia de carga (resistencia, reactancia y modelo circuital). El software calcula

y entrega las gráficas de diversas magnitudes y las figuras de mérito sobre el desempeño del sistema (Figura 4a). Por ser un modo de análisis no se emplea ningún AHO.

En el Modo Diseño el usuario desea obtener los datos de posiciones y longitudes de los stubs que definen a la *MSMN* (los D_i y L_i), obtenidos por los AHO seleccionados de los 9 ofrecidos (Figura 4b). El usuario debe proporcionar los requerimientos de diseño de la red: f_0 , ABA y $|\Gamma|_{Máx}$, pudiendo agregar un límite para N , y los mínimos admisibles para la longitud y la distancia de los stubs, viables mecánicamente. Esta información se procesa generando arreglos de datos con los cuales se obtienen las magnitudes relevantes, como son la impedancia “vista” en un plano arbitrario a la distancia d , llamada $Z_v(d)$, y $|\Gamma(f)|$. A partir de una lista F de frecuencias discretas se calculan, en todo el rango de frecuencia, la impedancia de carga, la impedancia característica y la constante compleja de propagación de la línea. Esto se obtuvo evaluando las ecuaciones algebraicas de sistemas distribuidos (caso armónico en estado estacionario), en cada punto frecuencial de la lista F . También se creó otra lista denominada D , con los valores discretos de distancia del eje espacial d desde la carga (Figura 1). La separación entre valores de la lista D fue de 1 mm. Los parámetros por unidad de longitud son los usuales r, l, c y g , y el parámetro de propagación γ está dado por la ecuación (3):

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(r + j\omega l)(g + j\omega c)} \quad (3)$$

Donde α es la constante de atenuación y β es la constante de fase, ambas dependientes de la frecuencia. La impedancia “vista” a la distancia d_i (hacia la derecha), denotada como $Z_v(d_i)$, estará dada por la ecuación (4), que emplea el algebra de los sistemas de parámetros distribuidos en líneas con pérdidas:

$$Z_v(d_i) = Z_c \left\{ \frac{Z_v(d_{i-1}) + Z_c \tanh[(\alpha + j\beta)(d_i - d_{i-1})]}{(Z_c + Z_v(d_{i-1}) \tanh[(\alpha + j\beta)(d_i - d_{i-1})])} \right\} \quad (4)$$

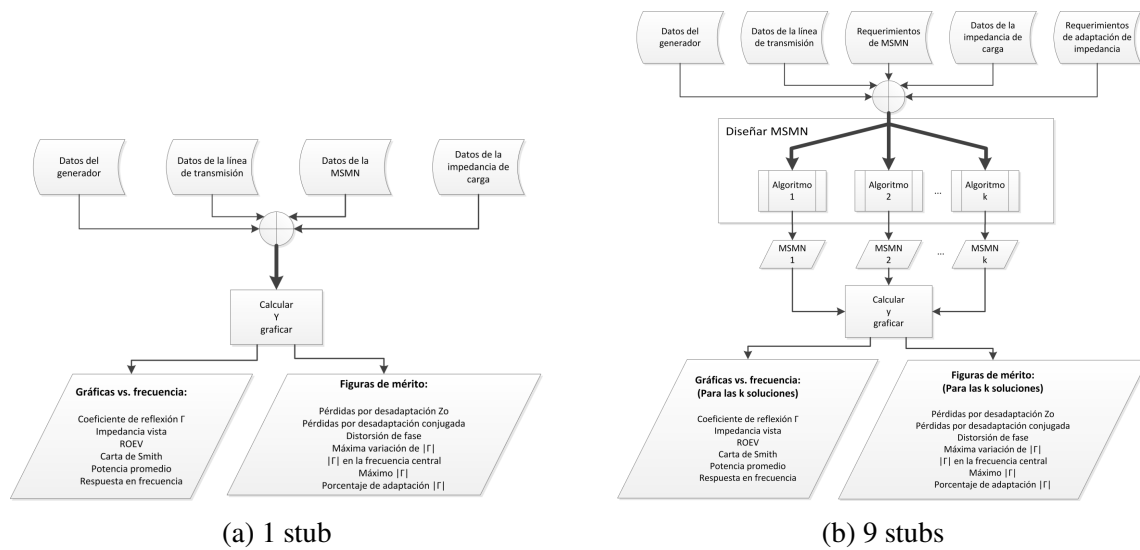


Figura 4: Modos de la herramienta de software *Eureka MSMN*

Y el coeficiente de reflexión $\Gamma(d_i)$ está dado por la ecuación (5):

$$\Gamma(d_i) = \frac{Z_v(d_i) - Z_c}{Z_v(d_i) + Z_c} \quad (5)$$

Aclarando que en la ecuación (4) se sigue la inclusión progresiva de las inserciones paralelo de cada uno de los stubs al desplazarse de derecha a izquierda, desde la carga al generador. Este proceso se realiza para cada punto de frecuencia de la lista F , y a su vez en cada entrada de la lista de puntos espaciales D . De esta manera, la impedancia de entrada vista $Z_v(d_i)$ en un plano interno arbitrario de la red MSMN resulta ser un arreglo bidimensional (2D), en el cual para acceder a un valor de impedancia se deben especificar los índices de distancia y de frecuencia. El procedimiento indicado discreto permite obtener los valores de $Z_v(d_i)$ en los puntos a lo largo de la línea principal, y dentro del ABA. La impedancia de entrada a la red MSMN, en el plano $d = d_A$ estará dada por $Z_{in} = Z_v(d_A)$.

Para ese arreglo 2D se calculan las magnitudes de interés en cada punto espacial y de frecuencia, como Γ y la relación de onda estacionaria de voltaje ROEV. Se implementó la opción de graficar las magnitudes usando la carta de Smith en cada punto a lo largo de la línea, y para el rango del ABA. Se obtuvo también la potencia activa promedio empleando $Z_v(d_i)$ y el voltaje

correspondiente obtenido bajo las condiciones de borde preestablecidas. También se determinó la respuesta en frecuencia $H(\omega)$ desde el plano del generador al plano de la carga, al considerar al filtro como una secuencia de k celdas en cascada, cada una con respuesta en frecuencia $H_k(\omega)$.

En relación a la IGU (Interfaz gráfica de usuario), se diseñó de forma intuitiva y gráfica, con control de tipo, de errores y ayuda; para la introducción por el usuario de los parámetros, ofreciendo gráficos y figuras de mérito sobre su desempeño. En la pantalla principal de la IGU se permite al usuario seleccionar el modelo de la carga, del generador y de la línea, y los parámetros de esta. Para recibir la información del usuario se usaron elementos de la librería *PyQt* incluyendo *QLineEdit* y el uso de botones, que permiten guardar y cargar las configuraciones y el proyecto completo en sus modos Diseño y Análisis. La IGU muestra al usuario el proceso de búsqueda de los AHO, informando cada vez que un AHO inicia o finaliza, indicando además el tiempo transcurrido, suministrando el desempeño del sistema mediante gráficas bidimensionales, a partir de los resultados de los módulos de cómputo versus la frecuencia, y con la posibilidad de variar el punto espacial de vista a lo largo de la línea principal (eje d). En cuanto al módulo graficador, una vez ingresados los datos, se valida su formato y se procede a iniciar los módulos de cómputo, que arrojan los arreglos

de datos de los resultados, para ser graficados. Las librerías Matplotlib y mplcursors de Python facilitan la visualización de tales gráficas.

Una validación de los resultados de los módulos de cómputo se llevó a cabo contra un simulador analizador de líneas de transmisión, el Advanced Design System (ADS) del producto PathWave Design de Keysight. Se compararon los resultados arrojados por los cálculos del simulador ADS con los obtenidos por *Eureka MSMN* en el Modo Análisis (sección 3.4).

En referencia a la implementación del Módulo Diseño, el problema se basó en emplear los AHO para buscar la adaptación de impedancias. Se le proporcionaron los datos de entrada a estos módulos de cómputo, en el formato adecuado para cada uno de los AHO señalados en la Tabla 1, y estos se emplearon en la tarea de minimizar la función objetivo F_{obj} , dada en la ecuación (1). Cada uno de los AHO entrega como respuesta una lista con los valores de las posiciones D_i y longitudes L_i de los stubs de la red MSMN que corresponden a un valor mínimo de F_{obj} y se llevan estos resultados a la entrada de datos del módulo graficador de la herramienta (Figura 4b).

En este punto se tiene el sistema de línea de transmisión definido mediante sus parámetros, junto con la información de las cantidades relevantes dadas por los módulos de cómputo (para todo punto sobre el eje d y para el rango del *ABA*). Se realizan entonces los cálculos del desempeño de la redes MSMN obtenidas (una por cada AHO). Para ello se emplean las usuales figuras de mérito, como son las pérdidas por desadaptación conjugada, y pérdidas por desadaptación Z_0 [2], y adicionalmente se diseñaron dos figuras de mérito específicas para el estudio, denominadas PA y DF .

En cuanto a la figura de mérito PA (Porcentaje de Adaptación), esta se define por medio de la ecuación (6), que indica en un solo número el grado de adaptación de impedancia obtenido con la red MSMN diseñada, considerando todo el rango de frecuencia del *ABA*, y no solamente la adaptación a una frecuencia particular, tomando en cuenta los M valores absolutos de la lista discretizada $|\Gamma(f)|$ sumados en el *ABA*, en forma discreta, de 0 a $M-1$,

que en su versión discreta se refieren como $|\Gamma_n|$:

$$PA = 100 \left(1 - \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} |\Gamma_n| \right) (\%) \quad (6)$$

Así, un valor $PA = 100\%$ sería el caso ideal de adaptación donde $\Gamma(f) = 0$ para todas las frecuencias en la versión discreta del *ABA*. El valor de PA indica el grado de adaptación global logrado por una MSMN. Esto permite comparar la calidad de los resultados para el diseño de la red MSMN debidos a los distintos AHO, pues cada uno podría tener un PA diferente, siendo de interés el mayor.

En cuanto a la figura de mérito DF (Distorsión de fase), esta requiere el cálculo previo del retardo de grupo $\tau(\omega)$, obtenido a partir de la versión discretizada del espectro de fase $\theta(\omega)$ de la respuesta en frecuencia $H(\omega)$ ya mencionada, donde $\omega = 2\pi f$, es definido según la ecuación (7):

$$\tau(\omega) = -\frac{d\theta}{d\omega} \quad (7)$$

Si no existe distorsión de fase, $\tau(\omega)$ sería una lista de M valores iguales. En general, $\tau(\omega)$ es una lista con M valores posiblemente distintos. Se realiza entonces un ajuste de curva de grado cero a $\tau(\omega)$ mediante la función polyfit de Numpy, hallando un valor constante T que representa al conjunto de valores $\tau(\omega)$ como un número que minimiza el error cuadrático, y que coincidiría con el valor del retardo de grupo para cualquier frecuencia si $\theta(\omega)$ fuese lineal. La DF cuantifica la desviación con respecto a la fase lineal, y se define como un error relativo porcentual promedio calculado a partir del retardo de grupo $\tau(\omega)$ de la ecuación (7) en su versión discreta τ_n , según la ecuación (8).

$$DF = \frac{100}{M} \sum_{n=0}^{M-1} \left| \frac{\tau_n - T}{T} \right| (\%) \quad (8)$$

Una vez obtenidos los resultados se realiza a efectos de validación externa de la herramienta el cálculo de una figura de mérito adicional, llamada $PCRA$ (Porcentaje de Cumplimiento del Requerimiento de Adaptación), que cuantifica la proporción lineal del *ABA* para la cual se cumple

el requerimiento de adaptación, y que se define mediante la ecuación (9):

$$PCRA = \frac{100}{M} \sum_{n=0}^{M-1} 1 - u[|\Gamma_n| - |\Gamma|_{M\acute{a}x}] \text{ (\%)} \quad (9)$$

Donde u representa la función escalón unitario discreta y M es el tamaño de la lista de frecuencia F . Es decir, $PCRA$ corresponde a la suma de los segmentos horizontales dentro ABA donde se verifica $|\Gamma| < |\Gamma|_{M\acute{a}x}$. Un valor $PCRA = 100\%$ indica que para una red MSMN dada, el valor de $|\Gamma|$ resultante es siempre menor a $|\Gamma|_{M\acute{a}x}$ en todo el ABA (Figura 2), y un valor de $PCRA = 0\%$ indica que $|\Gamma| \geq |\Gamma|_{M\acute{a}x}$ en todo el ABA . El $PCRA$ permite entonces evaluar si un AHO es capaz de hallar soluciones que cumplan con el requerimiento de adaptación y cuantificar en qué proporción lo hace en el ABA . Esto facilita comparar el desempeño y eficacia de los AHO.

Para la síntesis en un ejecutable, se compiló un archivo de extensión .exe, mediante la librería auto-py-to-exe. *Eureka MSMN* es un programa para su ejecución bajo el SO Microsoft Windows 7 o superior, de 32/64 bits. Requiere una RAM mínima de 2 GB (recomendado 4 GB) y un procesador igual o superior al Intel Celeron de 1,10 GHz.

3. Análisis y discusión de resultados

3.1. Inicialización

Al ejecutar el archivo *Eureka MSMN.exe* aparece el logo de la herramienta, como se observa en la Figura 5, el cual inicia la carga de las librerías mencionadas en la sección 2.



Figura 5: Pantalla de inicialización de la herramienta *Eureka MSMN*

3.2. Interfaz gráfica de usuario, IGU

3.2.1. Ventana principal

La ventana principal tiene dos partes (Figura 6), en la parte superior se encuentra un diagrama del sistema de línea de transmisión a configurar, para esto debe hacer clic en los botones Configurar generador, Configurar línea de transmisión, Configurar MSMN y Configurar impedancia de carga. Clicando cada uno de estos botones se abre una ventana de configuración. En la parte inferior se encuentra un recuadro llamado Requerimientos de adaptación de impedancia, donde se especifica el ABA , la f_0 , el $|\Gamma|_{M\acute{a}x}$ y se eligen los AHO. En la esquina superior izquierda hay un botón Proyecto, para guardar el proyecto actual o cargar uno existente. Finalmente, en la esquina inferior izquierda se encuentran dos botones, estos son: Iniciar búsqueda y Graficar, los cuales corresponden a los modos de operación “Análisis de MSMN” y “Diseño de MSMN” y respectivamente.

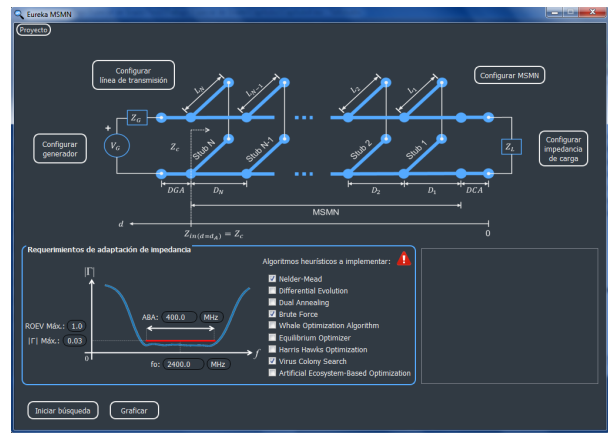


Figura 6: Ventana principal de *Eureka MSMN*

3.2.2. Ventana de configuración del generador

Clicando el botón Configurar generador de la ventana principal, se abre la ventana que se muestra en la Figura 7. Configurar el generador implica configurar la fuente y la impedancia del generador. La fuente se configura ingresando el voltaje o la potencia versus la frecuencia.

Clicando el spin box del recuadro de la fuente se puede elegir el número de valores de voltaje o potencia que se desea introducir. La impedancia

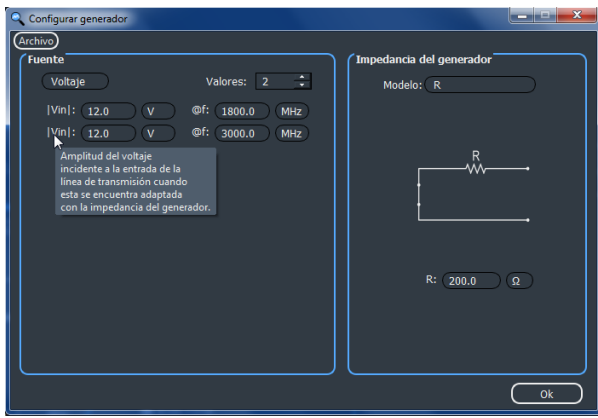


Figura 7: Ventana de configuración del generador

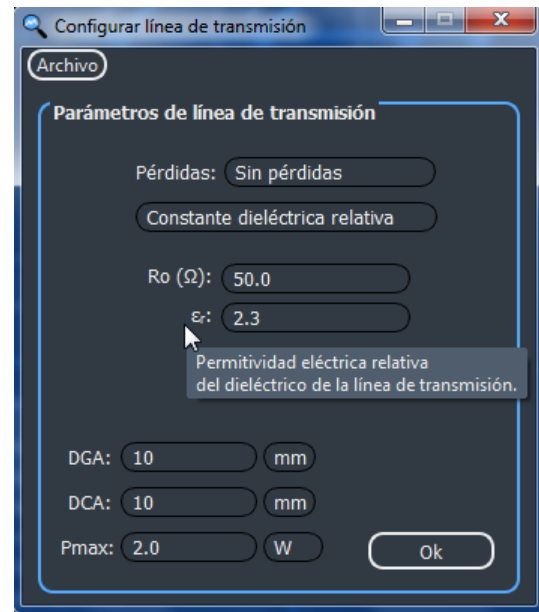
del generador se configura eligiendo el modelo circuital en un combo box que se encuentra en la parte superior del recuadro de impedancia del generador. Otra forma de ingresar la impedancia del generador es importando un archivo de extensión .imp. En la parte superior izquierda de la ventana se encuentra un botón llamado Archivo, con el cual se pueden cargar y guardar archivos de configuración de la fuente.

3.2.3. Ventana de configuración de la línea de transmisión

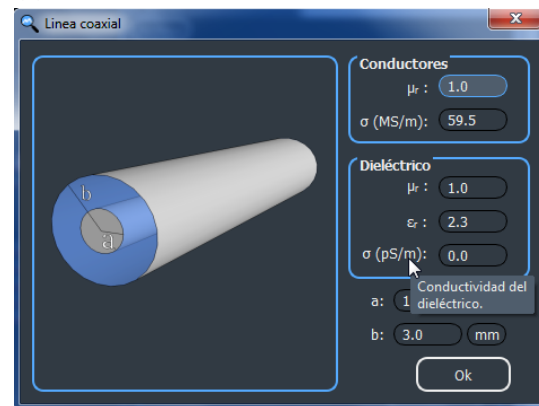
Clicando el botón Configurar línea de transmisión de la ventana principal, se abre la ventana mostrada en la Figura 8a. En ella se puede elegir el tipo de pérdidas de la línea (sin pérdidas o pérdidas generales). Si se elige el tipo pérdidas generales y luego el tipo de línea de transmisión, se ofrecen tres opciones de líneas: Coaxial, bifilar y plana. En la parte inferior de la ventana de configuración de la línea de transmisión (Figura 8a) se ingresa la distancia desde el generador hasta la red MSMN (*DGA* en la Figura 1), la distancia desde la carga hasta la red MSMN (*DCA* en la Figura 1) y la potencia máxima de la línea. En la parte superior izquierda de esta hay un botón Archivo, con el que se cargan y guardan archivos de configuración de la línea. Como ejemplo, la Figura 8b muestra la línea coaxial.

3.2.4. Ventana de configuración de la red MSMN

Al seleccionar Configurar MSMN en la Ventana principal, se abre la ventana de la Figura 9. En



(a) Ventana asociada a la línea de transmisión



(b) Ejemplo para el caso de una línea coaxial

Figura 8: Ventanas de configuración de la línea de transmisión

ella se puede especificar ya sea un número fijo N de stubs para los diseños de MSMN mediante los AHO, o bien un número máximo de stubs $N_{Máx}$. Además, se indican la longitud mínima y distancia mínima de un stub, y su carga (corto circuito o circuito abierto). En la parte superior izquierda de esta ventana se encuentra un botón Archivo, con el que se cargan y guardan archivos de configuración de la red.

3.2.5. Ventana de configuración de la impedancia de carga

Clicando el botón Configurar impedancia de carga de la Ventana principal, se abre la ventana

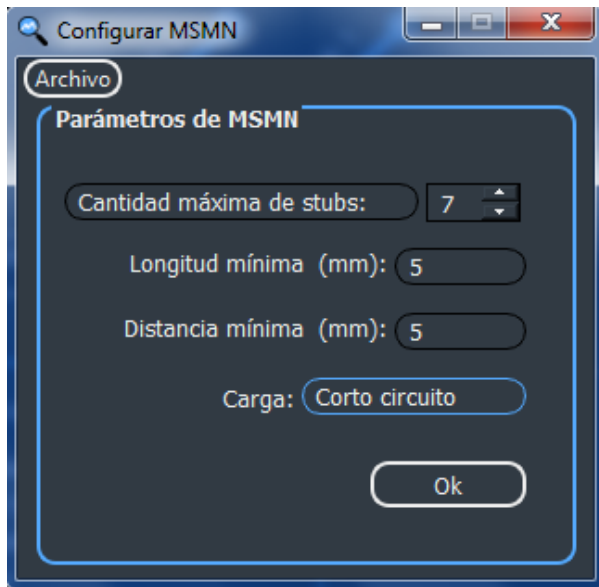


Figura 9: Ventana de configuración de la red MSMN

de la Figura 10, en ella se especifica el modelo circuital de la carga Z_L , así como sus valores de resistencia, inductancia y capacitancia, de acuerdo al modelo seleccionado. Otra forma de ingresar la impedancia de carga es importando un archivo de extensión .imp. En la parte superior izquierda se encuentra un botón Archivo, para cargar y guardar archivos de configuración.

3.3. Operación en el Modo Análisis de Eureka MSMN y Ejemplo 1 de aplicación

En esta sección se presenta mediante un ejemplo la operación en el Modo Análisis para una MSMN dada, denominando Ejemplo 1. En la Ventana principal se configura el sistema, y luego se hace clic en el botón Graficar. En la Figura 11 se ilustra la configuración del Ejemplo 1. En la Ventana principal, una vez que se ha configurado el generador, la línea de transmisión y la carga, clicando en Graficar se abre una ventana llamada Gráfica; en ella se configura la MSMN ingresando las longitudes y distancias de los stubs. En el Ejemplo 1, se utilizó un solo stub cargado en corto circuito (Figura 12).

En la ventana gráfica se especifica el rango de frecuencia para visualizar el espectro, que fue 800–1600 MHz en el Ejemplo 1. En la Figura 12 se aprecia la impedancia a la entrada

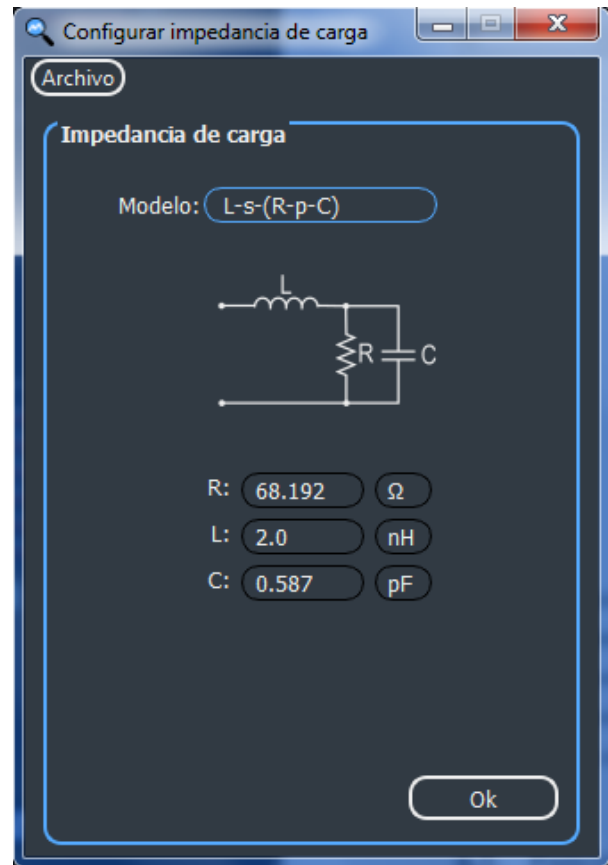


Figura 10: Ventana de configuración de la impedancia de carga: Modelo y parámetros

de la MSMN. En la parte superior izquierda de esta ventana, el usuario puede elegir el rango de frecuencia, el tipo de gráfica (coeficiente de reflexión, impedancia vista, ROEV, carta de Smith, potencia activa promedio y respuesta en frecuencia) y la presentación de esta (magnitud y fase, o parte real y parte imaginaria). En la parte inferior izquierda de la Figura 12 se aprecia la barra horizontal que permite variar el punto de vista sobre el eje d , y en la parte superior derecha se pueden cambiar los puntos de frecuencia de la gráfica y el número de celdas por cada longitud de onda. En el lado central derecho se encuentra un recuadro donde se puede configurar “manualmente” la red MSMN, también se pueden cargar/guardar configuraciones de redes. En la parte inferior derecha, el botón Ver figuras de mérito abre una ventana con las figuras de mérito resultantes para la configuración actual del sistema.

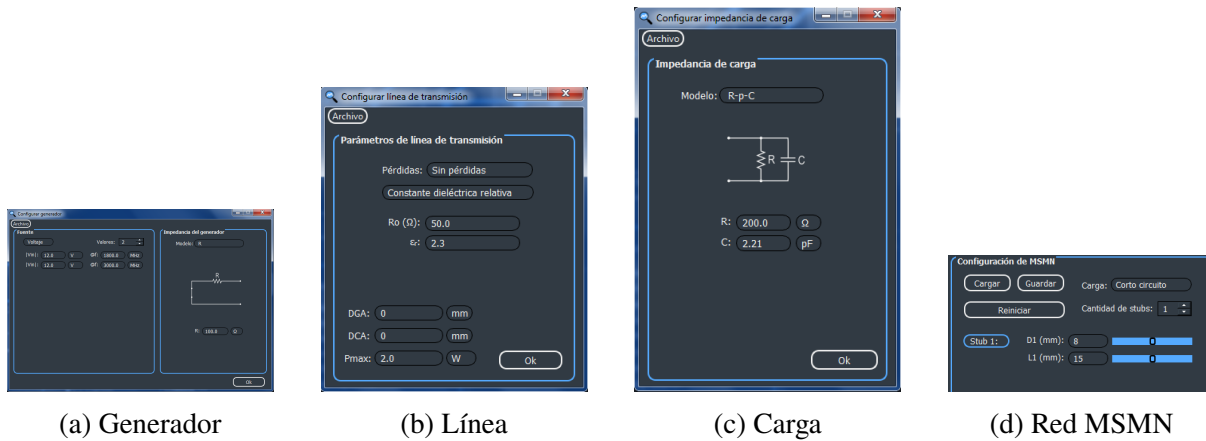


Figura 11: Configuración del Ejemplo 1 del Modo Análisis

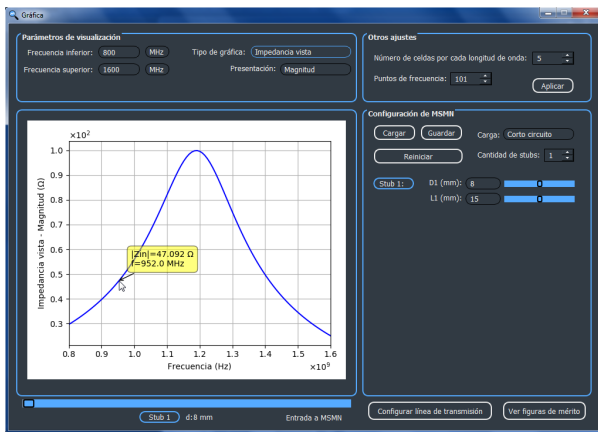


Figura 12: Ventana Gráfica. Impedancia (magnitud) vista a la entrada de la red MSMN del Ejemplo 1 en Modo Análisis

3.4. Comparación del Ejemplo 1 con el simulador Keysight ADS, en el Modo Análisis

Para validar los resultados de *Eureka MSMN* del Ejemplo 1 en el Modo Análisis dado en la sección 3.3, se realizaron pruebas comparando estos con los obtenidos mediante el simulador Advanced Design System (ADS) del software PathWave Design de Keysight. En la Figura 13 se muestra el diagrama esquemático con la misma configuración del Ejemplo 1, pero esta vez programado en el mencionado simulador comercial ADS.

La Figura 14 da los resultados de *Eureka MSMN* y ADS para el Ejemplo 1, resultando un error relativo del 0,006 % (amplitud) y de un 0,016 % (fase). Los mismos fueron calculados tomando muestras en 5 frecuencias, que incluyeron a f_0 y

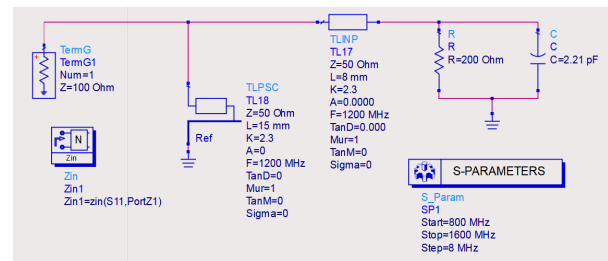


Figura 13: Programación del Ejemplo 1 de la sección 3.3 en ADS, para la comparación de resultados con *Eureka MSMN*

a los límites del ABA; errores que destacan por su reducido valor.

3.5. Operación en el Modo Diseño de Eureka MSMN y Ejemplo 2 de aplicación

En esta sección se presenta el resultado de operar en el Modo Diseño de la herramienta, por medio de un ejemplo multistub, que se denominará Ejemplo 2, configurándose el generador, la línea, la carga, y la red MSNM, con un número de stubs máximo $N_{m\acute{a}x}$ de 7 (Figura 15), y en la pantalla Requerimientos de adaptación de impedancia se definen para este Ejemplo 2 los parámetros $f_0 = 2400$ MHz, $ABA = 400$ MHz y $|\Gamma|_{M\acute{a}x} = 0,03$, seleccionándose 3 de los AHO, siendo estos: Nelder Mead, Fuerza Bruta y Búsqueda por Colonia de Virus (Figura 16a).

Seguidamente, clicando el botón Iniciar búsqueda, (Figura 16a), un mensaje en la ventana principal le indica al usuario cuando cada AHO

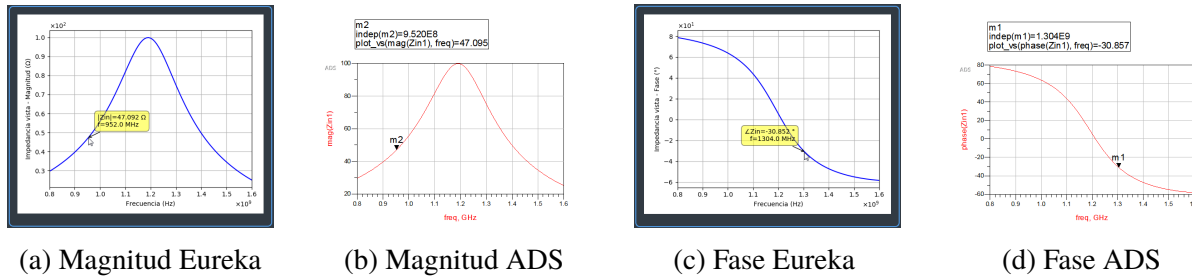


Figura 14: Validación de magnitud y fase de la impedancia vista a la entrada de la red MSMN del Ejemplo 1

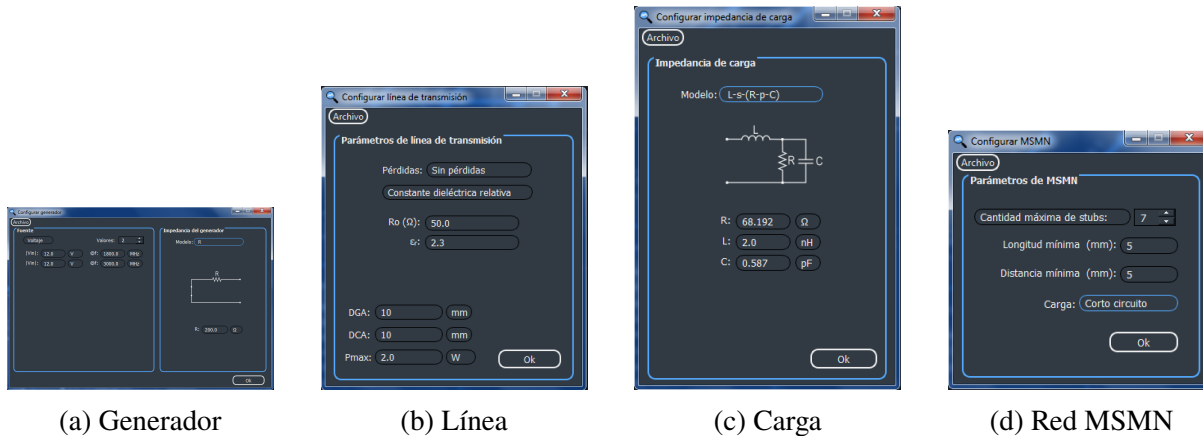


Figura 15: Configuración del Ejemplo 2 multistub del Modo Diseño

termina su ejecución, mostrando avances parciales (Figura 16b).

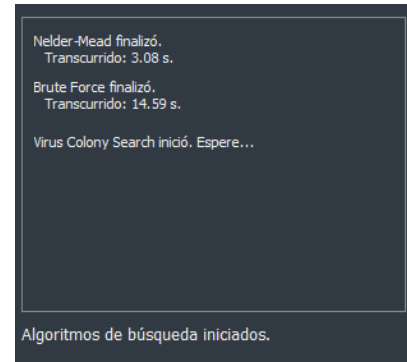
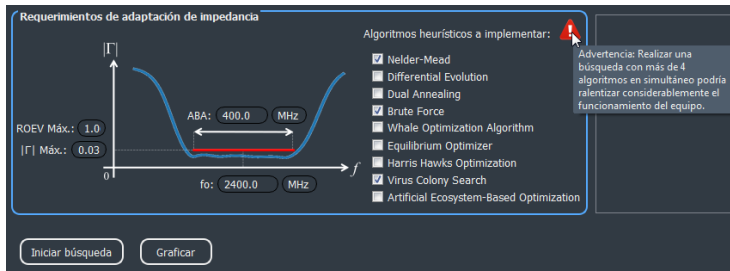
Una vez que todos los AHO hayan finalizado su ejecución, un mensaje en la ventana principal anuncia que el proceso terminó, y se muestra el tiempo consumido por cada AHO (Figura 17a). También aparecen dos nuevos botones: Ver gráficas y Ver rendimiento computacional. Clicando este último se abre una ventana con la información del consumo de recursos por parte de cada AHO, con la opción de ordenarlos de acuerdo a porcentaje de uso del procesador, memoria RAM ocupada o el tiempo transcurrido en la búsqueda (Figura 17b). De este modo, se logra comparar objetivamente el rendimiento computacional de los AHO utilizados.

Clicando el botón Ver gráficas (Figura 17a), se abre una nueva ventana titulada Gráficas. Allí se muestra para el Ejemplo 2 el desempeño de cada red MSMN diseñada mediante los AHO (Figura 18), siendo de interés conocer las figuras de mérito referidas en la sección 2, especialmente

las diseñadas para este estudio: PA y DF. En la ventana “Gráficas”, clicando en Ver figuras de mérito, se abre una nueva ventana (Figura 19), que ilustra la calidad del desempeño de las soluciones encontradas, y establece un orden de mérito. Allí el PA está indicado como “Adaptación $|\Gamma|$ (%)”.

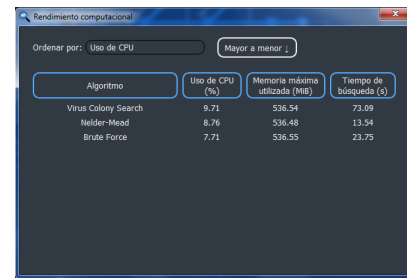
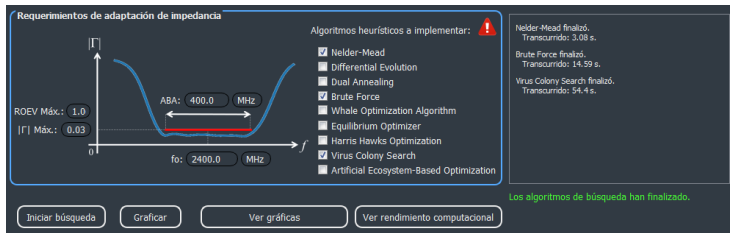
Se observó que usando el AHO Búsqueda por Colonia de Virus se cumple la condición requerida $|\Gamma| < |\Gamma|_{\text{Máx}}$ dentro del ABA, con un PCRA = 90,6 % de ese rango espectral, según la traza de la Figura 20a, mostrándose además un zoom en la Figura 20b.

En la Figura 21 se muestra la relación de onda estacionaria de voltaje ROEV de la red del Ejemplo 2 usando el AHO Búsqueda por Colonia de Virus, pero visualizando un rango de frecuencia mayor, de 1500 a 3300 MHz para apreciar el comportamiento en un ancho de banda mayor al de diseño. Considerando que una adaptación ideal se representa como una recta horizontal $ROEV = 1$, la solución encontrada se aproxima



(a) Requerimientos de adaptación para el Ejemplo 2 multistub del Modo Diseño y selección de los tres AHO (b) Mensaje de iniciación de los AHO

Figura 16: Configuración y ejecución del Modo Diseño de Eureka MSMN en el Ejemplo 2 de aplicación



(a) Mensaje de finalización de los AHO en el Modo Diseño (Ejemplo 2) (b) Rendimiento computacional

Figura 17: Finalización y aspectos de rendimiento computacional del Modo Diseño de Eureka MSMN en el Ejemplo 2 de aplicación

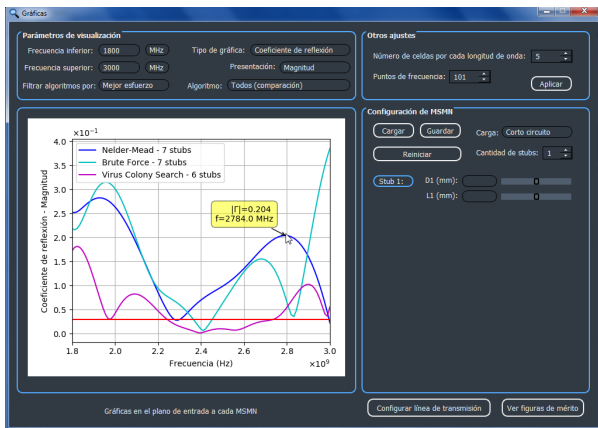


Figura 18: Ventana Gráficas, mostrando el desempeño de la red MSMN diseñada, por cada AHO, en el Ejemplo 2

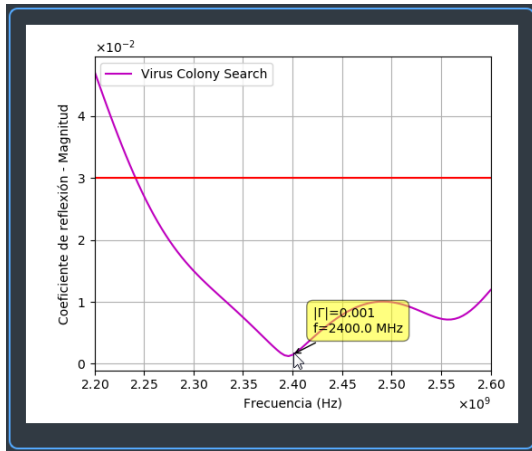
la planitud de la respuesta en el ABA, lo cual es conveniente, y la posibilidad de ajustar con deslizadores las posiciones y longitudes de los stubs en la herramienta, para una sintonía fina manual de la red diseñada, y evaluar sus efectos.

Figura 18: Ventana Gráficas, mostrando el desempeño de la red MSMN diseñada, por cada AHO, en el Ejemplo 2

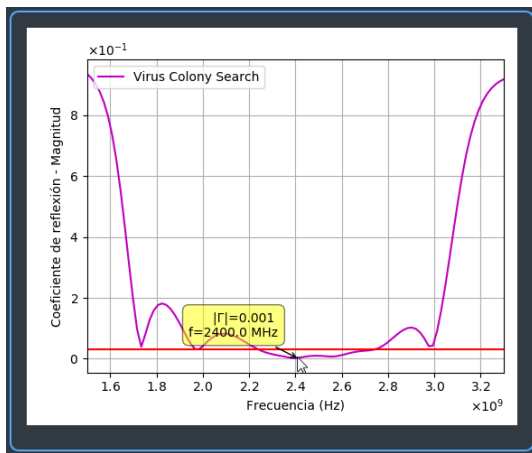
al objetivo de adaptación en banda ancha con un grado de calidad dado por un $PA = 98,69\%$ como figura de mérito global. Nótese en la Figura 21

3.6. Ejemplo 3 multistub del Modo Diseño y comparación de rendimientos de los AHO

Se ejecutó un tercer ejemplo empleando esta vez los 9 AHO, llamado Ejemplo 3, configurando



(a) Datos mostrados en la banda 2200–2600 MHz (ABA)



(b) Detalle en 1500–3300 MHz (Zoom del ABA)

Figura 20: Desempeño de la red MSMN diseñada por el AHO Búsqueda por Colonia de Virus en el Ejemplo 2

el sistema (generador, línea, y carga) con valores idénticos a los del Ejemplo 2 de la sección 3.5, así como también los mismos requerimientos de adaptación a satisfacer con la red MSMN que incluyen un $|\Gamma|_{(Máx.)} = 0,03$ en el ABA. Se realizó el proceso de búsqueda en cada AHO. Los resultados del PA, obtenidos mediante la ecuación (6) para cada algoritmo se suministran en la Tabla 2, en donde se observa que los algoritmos Recocido dual, Búsqueda de colonias de virus y Optimización basada en ecosistemas artificiales, fueron capaces de ofrecer diseños de MSMN con un elevado grado de adaptación de impedancias en un sentido absoluto, dado que ofrecen porcentajes de adaptación tan altos como $PA > 98\%$ en

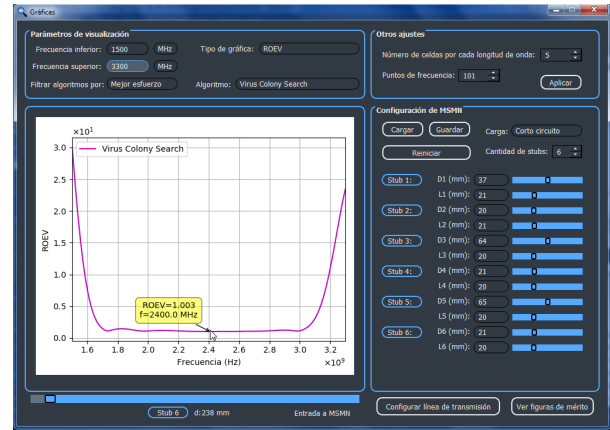


Figura 21: Ejemplo de desempeño de una red MSMN diseñada mediante el AHO Búsqueda por Colonia de Virus y uso de deslizadores paramétricos de longitud y posición de stubs para sintonía fina de la solución

el amplio ABA de 400 MHz, aproximados al cumplimiento ideal de un $PA = 100\%$. El resto de los AHO ofreció $PA > 92\%$, que si bien es inferior, pudiera ser todavía considerable para su utilización en caso de problemas de implementación de las soluciones obtenidas en primera instancia.

Como validación externa se calculó el $PCRA(\%)$ mediante la ecuación (9), y la Figura 22 muestra el $PCRA$ y la gráfica de $|\Gamma(f)|$ del Ejemplo 3 en el ABA (2200–2600 MHz), para los 9 AHO, notando que el algoritmo Recocido dual obtuvo un conveniente $PCRA = 100\%$. Por el contrario, los algoritmos Optimización de ballenas y Optimización de halcones Harris ofrecen un inadecuado $PCRA = 0\%$. Los 6 algoritmos restantes se aproximan al requerimiento de adaptación en diversos grados, con valores de $PCRA$ comprendidos entre $7,3\%$ y $88,7\%$. Esto aumenta la confianza en los resultados de *Eureka MSMN* cuando se emplean múltiples AHO, para disponer de un conjunto de opciones.

En el Ejemplo 3, no todos los algoritmos arrojaron como resultado la misma cantidad de stubs en la búsqueda óptima del diseño de la red MSMN, observándose que el algoritmo Recocido dual ofrece, con apenas 2 stubs, la mayor calidad de adaptación en forma de un $PA = 98,9\%$ y un $PCRA = 100\%$. En contraste, el algoritmo Búsqueda de colonias de virus requirió una

cantidad mucho mayor, de 7 stubs, para dar una calidad menor pero aún destacable, en forma de $PA = 98,5 \%$ y un $PCRA = 88,7 \%$. En ese sentido, la MSMN del algoritmo Recocido dual resultaría la más conveniente en el Ejemplo 3, ya que el emplear solo dos stubs implica una menor complejidad de la red para una implementación.

En cuanto al tiempo de ejecución de cada AHO en el Ejemplo 3, se observa de la Tabla 2 que los algoritmos con el mayor PA también implicaron los mayores tiempos de búsqueda.

Tabla 2: Desempeño de adaptación de los AHO del Ejemplo 3 para sus respectivas redes MSMN

Algoritmo	Cantidad de stubs, N	PCRA, %	PA, %	Tiempo de búsqueda, s
Nelder- Mead	7	7,3	92,5	2,75
Evolución diferencial	7	39,8	96,6	16,58
Recocido dual	2	100	98,9	26,61
Fuerza bruta	7	22,3	94,0	7,68
Optimización de ballenas	7	0	92,6	14,85
Optimizador de equilibrio	1	61,2	97,4	1,81
Optimización de halcones Harris	7	0	90,7	16,75
Búsqueda de colonias de virus	7	88,7	98,5	44,3
Optimización basada en ecosistemas artificiales	2	78,7	98,0	10,48

4. Conclusiones

En base a los resultados de la sección 3, se observa que el empleo de redes de adaptación MSMN basadas en múltiples stubs permite aproximarse a una adaptación de impedancia en un rango de frecuencia mucho mayor al que se obtiene mediante las técnicas tradicionales analíticas de uno o dos stubs, observándose que los AHO empleados son eficaces con diversos grados de éxito en la exigente tarea de hallar máximos o mínimos relativos de una función compleja de múltiples variables en el problema de adaptación de impedancias, en sistemas de líneas de transmisión para banda ancha, notándose que ciertos algoritmos

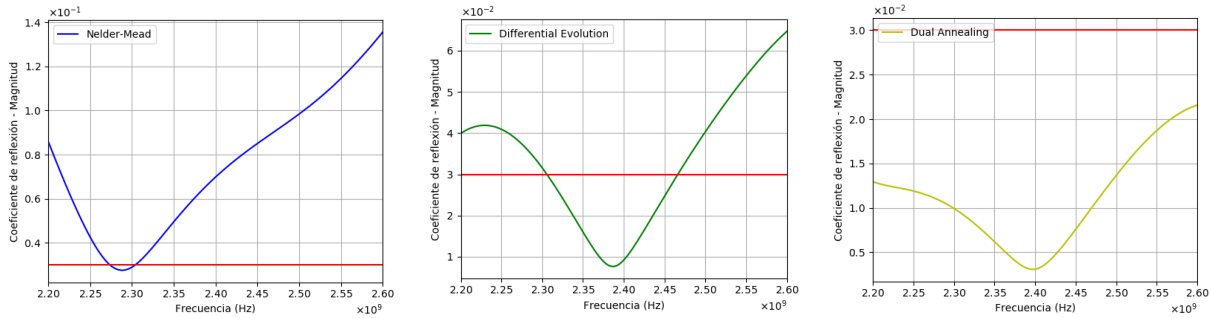
son más asertivos y eficientes que otros, en cuanto a su capacidad para adaptar con una cantidad reducida de stubs.

No todos los AHO convergen a soluciones que satisfagan exactamente los requerimientos de adaptación establecidos por el usuario en la forma de un porcentaje de adaptación $PA = 100 \%$ sin embargo, el PA en todos los AHO fue superior a un 92% , en el Ejemplo 3 de diseño, donde los algoritmos Recocido dual y Búsqueda por colonias de virus destacaron por arrojar las soluciones más aproximadas a la función ideal preestablecida. Los resultados obtenidos estimulan el estudio adicional de este tipo de técnicas para aumentar el rendimiento.

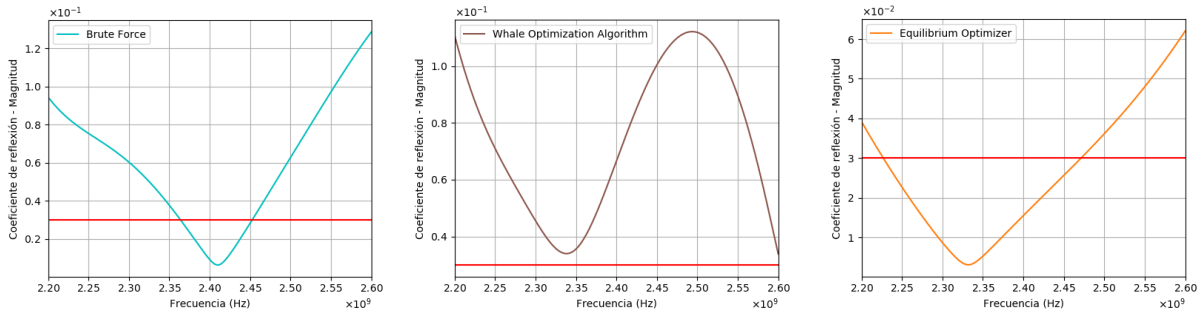
La herramienta de software *Eureka MSMN* resulta un prototipo útil como plataforma de comparación de AHOs, permitiendo clasificar la calidad de las soluciones arrojadas por los mismos, así como la eficiencia de sus procesos de búsqueda. En este sentido, *Eureka MSMN* es conveniente para la enseñanza de la adaptación de impedancias mediante redes MSMN en banda ancha, específicamente en la asignatura Sistemas de Ondas Guiadas de la Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, sirviendo como flexible complemento al sistema instruccional SEDISOG [21], diseñado, implementado y empleado regularmente en esa entidad académica, en el proceso enseñanza-aprendizaje.

Eureka MSMN puede aportar soluciones iniciales para su uso en simuladores complejos de múltiples dominios físicos, orientados específicamente a la implementación efectiva, por ejemplo en sistemas de líneas de microcinta o en los tradicionales sistemas coaxiales o de guía de onda. Es importante destacar que el elevado componente estocástico de los AHO, empleados aquí como cajas negras de Python, implica que en ocasiones y usando un AHO específico, el mismo problema programado resulte en soluciones de configuraciones distintas (si bien aproximadas) para los stubs.

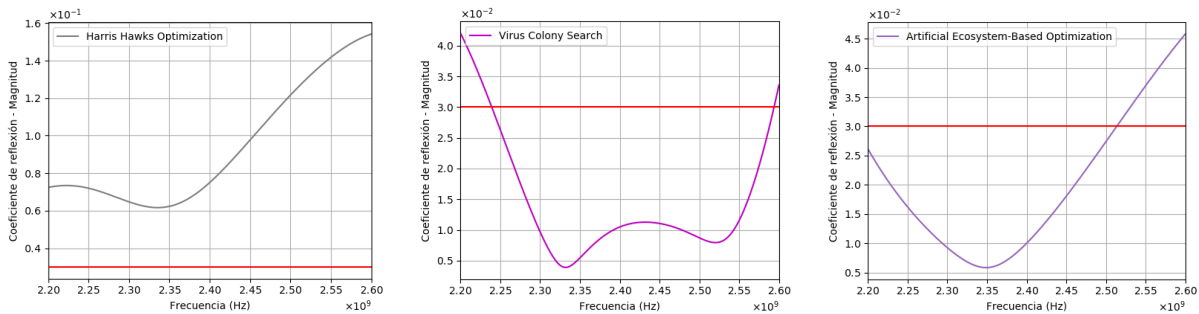
Para estimular el uso, prueba y validación de resultados de *Eureka MSMN*, la



(a) Nelder-Mead. $PCRA = 7,3 \%$ (b) Evolución diferencial. $PCRA = 39,8 \%$ (c) Recocido dual. $PCRA = 100 \%$



(d) Fuerza bruta. $PCRA = 22,3 \%$ (e) Optimización de ballenas. $PCRA = 0 \%$ (f) Optimizador de equilibrio. $PCRA = 61,2 \%$



(g) Optimización de halcones Harris. $PCRA = 0 \%$ (h) Búsqueda de colonias de virus. $PCRA = 88,7 \%$ (i) Optimización basada en ecosistemas artificiales. $PCRA = 78,7 \%$

Figura 22: Espectros de $|\Gamma(f)|$ y $PCRA(\%)$ para cada uno de los 9 AHO del Ejemplo 3 de diseño de redes MSMN. Las líneas horizontales rojas representan el $|\Gamma|_{Máx.} = 0,03$ especificado

herramienta está disponible en el repositorio <https://github.com/hidalgoabraham/eureka-msmn>, en donde se incluyen código fuente, archivo ejecutable y manuales de instalación y de usuario.

5. Reconocimientos

La presente investigación fue reconocida con Mención Honorífica por la Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería

de la Universidad de Carabobo, Venezuela, según el Acta de Examen No. 10231.

6. Referencias

- [1] C. A. Balanis, *Antenna Theory*, 3 ed. John Wiley & Sons, 2005.
- [2] A. Bianchi, *Sistemas de Ondas Guiadas*. Marcombo, 1980.
- [3] R. Collin, *Foundations for Microwave Engineering*, 2 ed. John Wiley & Sons, 2001.

- [4] D. Pozar, *Microwave Engineering*, 4 ed. John Wiley & Sons, 2011.
- [5] P. H. Smith, "Electronic Applications of the Smith Chart," in *Waveguide, Circuit and Component Analysis*, 1st ed. McGraw-Hill Book Company, 1969, ch. 9.
- [6] M. Alsharif, A. Kelechi, M. Albreem, S. Chaudhry, M. Zia, and S. Kim, "Sixth Generation (6G) Wireless Networks: Vision, Research Activities, Challenges and Potential Solutions," *Symmetry*, vol. 12, no. 4, p. 676, 2020. <https://doi.org/10.3390/sym12040676>
- [7] C. Regoli, "Impedance matching by using a multi-stub system," in *Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on Simulation, Modeling and Optimization (2007)*, ser. SMO'07. Stevens Point, Wisconsin, USA: World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS), 2007, p. 341–345.
- [8] N. I. Dib, A. H. Sharaqa, and R. A. Formato, "Variable z_0 applied to biogeography based optimized multi-stub matching network," in *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation USNC/URSI National Radio Science Meeting (2013)*, 2013, pp. 2129–2130. 10.1109/APS.2013.6711723
- [9] M. E. Aydemir, M. Ilarslan, K. Buyukatak, and E. Duymaz, "Swarm intelligence in solution of impedance matching problem in satellite transmitters," in *Proceedings of 5th International Conference on Recent Advances in Space Technologies - RAST2011*, 2011, pp. 436–440. 10.1109/RAST.2011.5966873
- [10] K. R. Chowdhary, *Fundamentals of Artificial Intelligence*, 1st ed. New Delhi: Springer, ch. 9, p. 239. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-3972-7>
- [11] P. M. Rabanal, "Algoritmos heurísticos y aplicaciones a métodos formales," Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España, 2010.
- [12] N. V. Thieu and S. Mirjalili, "MEALPY: a Framework of The State-of-The-Art Meta-Heuristic Algorithms in Python," Oct. 2022. 10.5281/zenodo.7255425. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7255425>
- [13] J. A. Nelder and R. Mead, "A Simplex Method for Function Minimization," *The Computer Journal*, vol. 7, no. 4, pp. 308–313, 1965. <http://dx.doi.org/10.1093/comjnl/7.4.308>
- [14] R. Storn and K. Price, "Differential Evolution - A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces," *Journal of Global Optimization*, vol. 11, pp. 341–359, 1997. <https://doi.org/10.1023/A:1008202821328>
- [15] Y. Xiang, D. Y. Sun, W. Fan, and X. G. Gong, "Generalized simulated annealing algorithm and its application to the Thomson model," *Physics Letters A*, vol. 233, no. 3, pp. 216–220, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0375-9601\(97\)00474-X](https://doi.org/10.1016/S0375-9601(97)00474-X)
- [16] S. Mirjalili and A. Lewis, "The whale optimization algorithm," *Advances in Engineering Software*, vol. 95, pp. 51–67, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2016.01.008>
- [17] B. S. Afshin Faramarzi Mohammad Heidarinejad and S. Mirjalili, "Equilibrium optimizer: A novel optimization algorithm," *Knowledge-Based Systems*, vol. 191, p. 105190, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.knsys.2019.105190>
- [18] A. Heidari, S. Mirjalili, H. Faris, I. Aljarah, M. Mafarja, and H. Chen, "Harris hawks optimization: Algorithm and applications," *Future Generation Computer Systems*, vol. 97, pp. 849–872, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.02.028>
- [19] M. D. Li, H. Zhao, X. W. Weng, and T. Han, "A novel nature-inspired algorithm for optimization: Virus colony search," *Advances in Engineering Software*, vol. 92, pp. 65–88, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2015.11.004>
- [20] L. Zhao, W. Wang and Z. Zhang, "Artificial Ecosystem-Based Optimization: A Novel Nature-Inspired Meta-Heuristic Algorithm," *Neural Computing and Applications*, vol. 32, pp. 9383–9425, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00521-019-04452-x>
- [21] E. Alvarado and Á. Vargas, "Desarrollo de un software educativo didáctico interactivo para sistemas de ondas guiadas versión 3," Trabajo especial de grado, Escuela de Telecomunicaciones, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Carabobo, Venezuela, 2016.

Calibration of the curve number of the SCS model for the region of the north coast of Peru

Jhon Alberca , Jesús Mejía , Edilberto Guevara-Pérez 

Programa de Doctorado en Recursos Hídricos, Escuela de Post Grado, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú



<https://doi.org/10.54139/revinguc.v29i2.287>

Abstract.- In recent decades, the spatial variation of water resources and other climatic changes have been the main reasons for extreme events such as droughts and floods. The objective of this article was to calculate the value of CN for the north coast of Peru, where floods of great magnitude have been evidenced, since this parameter is essential to estimate flows. The SWAT hydrological model was used to calculate the CN value of the medium-high sub-basin of the Piura river, taking the Sánchez Cerro bridge as a gauging point. Subsequently, the monthly flow rates were calculated at the gauging point, which were compared with the existing hydrometric information for the period from January 1981 to December 2016. The results indicated a reliability of 0,93 (for Nash Sutcliffe coefficient) and a value of 0,97 (for r Pearson correlation coefficient), results as excellent. The CN value fairly accurately reflects the soil characteristics of the Peruvian north coast, with a greater approximation even than if the table of CN values of the Soil Conservation Service (SCS) is used or the values of the raster map prepared by the Autoridad Nacional del Agua (ANA).

Keywords: CN; calibration; SWAT mathematical model; Script R; PISCO.

Calibración de la curva número del modelo SCS para la región de la costa norte del Perú

Resumen.- En las últimas décadas, la variación espacial de los recursos hídricos y otros cambios climáticos vienen siendo las principales razones de eventos extremos como sequías e inundaciones. El objetivo del presente artículo fue calcular el valor de CN para la costa norte del Perú, donde se han evidenciado inundaciones de gran magnitud, ya que este parámetro es fundamental para estimar caudales. Se utilizó el modelo hidrológico SWAT para calcular el valor de CN de la subcuenca medio-alta del río Piura, tomando como punto de aforo el puente Sánchez Cerro. Posteriormente, se calcularon los caudales a paso mensual en el punto de aforo, los mismos que se compararon con la información hidrométrica existente para el periodo comprendido entre enero de 1981 a diciembre del 2016. Los resultados indicaron una confiabilidad de 0,93 (para coeficiente de Nash Sutcliffe) y un valor 0,97 (para coeficiente de correlación de Pearson r), considerados como excelentes. El valor CN reflejó con bastante exactitud las características del suelo de la costa norte peruana, con mayor aproximación incluso que si se utiliza la tabla de valores de CN del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) o los valores del mapa ráster elaborado por la Autoridad Nacional del Agua (ANA).

Palabras clave: CN; calibración; modelo matemático SWAT; Script R; PISCO.

Recibido: 05 de abril, 2022.

Aceptado: 16 de mayo, 2022.

1. Introducción

La estimación de caudales de una cuenca es fundamental para la planificación del uso de los recursos hídricos, para la planificación agrícola y urbana así como para el dimensionamiento de

las obras de infraestructura física, principalmente hidráulicas [1]. Referente a este último punto, el ingeniero muchas veces para estimar la magnitud de los caudales de diseño de las obras hidráulicas de protección y de aprovechamiento está obligado a utilizar métodos indirectos de lluvia-escorrentía [2], sobre todo cuando se carece de información hidrometeorológica que permita calcular volúmenes de agua con mediciones directas. Por tanto, haciendo uso de estaciones pluviométricas, que son más comunes que las

* Autor para correspondencia:

Correo-e:albercariosjhon@gmail.com (J. Alberca)

hidrométricas, se pueden aplicar los métodos basados en la relación “Lluvia-Escorrentía”, y si se dispusiera de alguna estación hidrométrica con suficientes datos históricos, se podrían utilizar los registros de caudales para la calibración de los modelos Lluvia-Escorrentía. En esta última situación está la región norte del Perú, así como la mayor parte del territorio nacional.

En la bibliografía se encuentra una serie de modelos de lluvia-escorrentía; la mayoría derivados de los tradicionales modelos hidrológicos del cuerpo de ingenieros del ejército de los EE.UU., los denominados HEC [3, 4]. Uno de los modelos más utilizados a nivel global es el del US-SCS (actualmente denominado NRCS), en el que se utiliza para el cálculo de las abstracciones de la lluvia total, es decir para determinar la lluvia efectiva de diseño, la denominada Curva Número, CN, estimada para diferentes tipos de suelo y condiciones de humedad antecedente [5]. Si bien, el modelo SCS posee una base física adecuada, el parámetro CN se ha estimado para condiciones del país de origen, por lo que su aplicación en otras latitudes requiere de un proceso de calibración [6].

En el Perú se ha generalizado el uso de otro modelo de lluvia-escorrentía, SWAT, más complejo que el del SCS, pero que utiliza también el parámetro CN para la estimación de las abstracciones. En el modelo SWAT se incorporan, además, el modelo de elevación digital (usando tecnologías SIG), el mapa de uso del suelo, el mapa del suelo y los parámetros meteorológicos para generar escorrentía a escala de una cuenca [7]. En este sentido, si se llevara a cabo un proceso de calibración de CN sobre la base de información de la región norte de Perú, se puede establecer un modelo más robusto que permita estimar con mayor precisión los parámetros de diseño de las obras de almacenamiento, protección y conservación de las aguas en dicha región.

El objetivo de esta investigación es justamente la calibración del parámetro CN para las condiciones de la región norte de Perú utilizando las herramientas mencionadas, de modo que se pueda obtener una precisión más elevada en la estimación de la escorrentía al utilizar el modelo SWAT. El modelo así establecido serviría de referencia para

el estudio de los caudales en el resto del país.

2. Materiales y Métodos

2.1. Área de estudio y punto de aforo

El área de estudio seleccionada abarca la parte alta y media de la cuenca del río Piura, en el departamento de Piura, en la costa norte del Perú, y que pertenece a la red hidrográfica de la vertiente del pacífico. El cauce principal de la cuenca es el río Piura, que nace a 3600 ms.n.m. en la provincia de Huancabamba bajo en nombre de río Canchaque, y que al unirse con el río Bigote adopta la denominación de río Piura, recorriendo un total de 280 kilómetros hasta su desembocadura en el océano Pacífico [8]. En la Figura 1 se puede observar el área de la cuenca en estudio y el punto de aforo de dicha cuenca.

El punto de aforo que se consideró para la delimitación del área de estudio fue la estación hidrométrica ubicada en el Puente Sánchez Cerro, entre los distritos de Piura y Castilla, ya que dicha estación cuenta con información de los caudales máximos y medios observados en el río Piura, desde enero del año 1984, hasta el mes de enero de 2016 y además es un punto importante de análisis, ya que se encuentra en plena zona céntrica y urbana de los distritos de Piura y Castilla, donde en el Fenómeno El Niño Costero del 2017, se desbordó el río Piura e inundó las zonas adyacentes. Como resultado de la delimitación, se obtuvieron 25 sub cuencas para el área de estudio, las mismas que se aprecian en la Figura 2.

2.2. Modelo hidrológico SWAT

Existen varios modelos hidrológicos que permiten calcular la escorrentía, utilizando datos de entrada, por ejemplo, el Modelo HEC-HMS y el modelo SWAT.

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) es un modelo conceptual de tiempo continuo que se desarrolló a principios de la década de 1990 para ayudar a los administradores de recursos hídricos a evaluar el impacto de la gestión y el clima en los suministros de agua y la contaminación de fuentes difusas en cuencas hidrográficas y grandes cuencas fluviales [9].

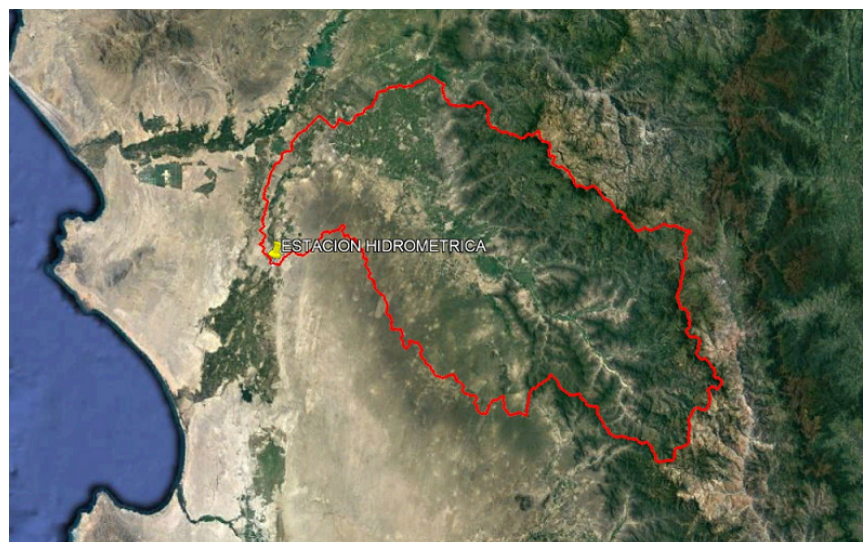


Figura 1: Área de estudio y punto de aforo.

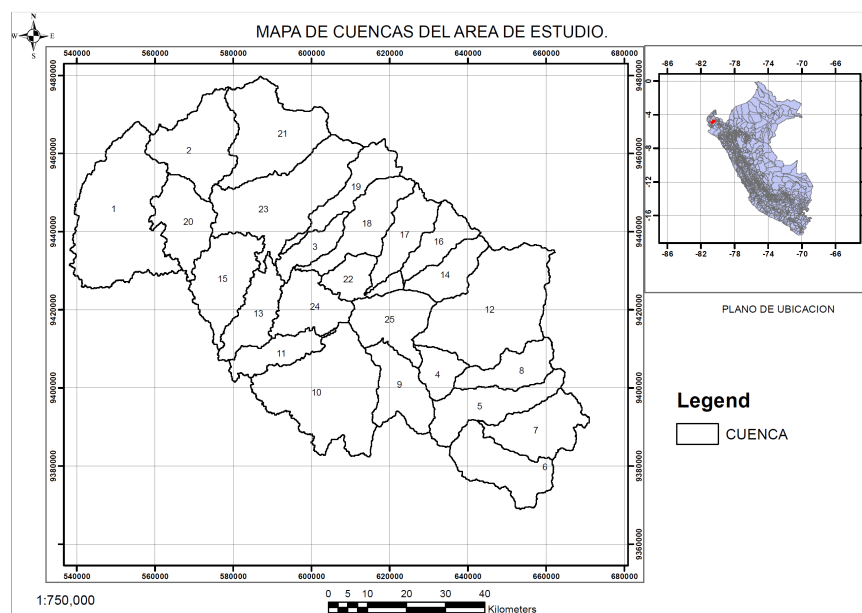


Figura 2: Delimitación de la cuenca en estudio.

Este modelo tiene una base física, es computacionalmente eficiente y capaz de simular un alto nivel de detalle al permitir la división de las cuencas hidrográficas en subcuencas más pequeñas [10], las mismas que a la vez se subdividen en unidades de respuesta hidrológica (HRU) que consisten en características únicas de uso de la tierra, manejo, topografía y suelo. La simulación de la hidrología de la cuenca se realiza en la fase terrestre, que controla la cantidad de agua, sedimentos, nutrientes y cargas de plaguicidas al canal principal en cada

subcuenca, y en la fase de enrutamiento, que es el movimiento de agua, sedimentos, etc., a través de los arroyos de las subcuencas hasta sus salidas [11].

Según León *et al.* [12], para estimar la escorrentía superficial hay dos métodos: El número de curva (CN) y el método de infiltración Green-Ampt. Para este último, se requieren datos de entrada con una resolución de tiempo más fina que la diaria, mientras que el método CN se agrupa a lo largo del tiempo y normalmente se puede aplicar utilizando valores de precipitación diaria [13].

Para la presente investigación se utilizó el modelo hidrológico SWAT 2005. Dado que en este modelo además de la variable climática tal como la precipitación diaria, se pueden ingresar temperaturas máximas y mínimas, información de radiación solar, humedad relativa, velocidad del viento, estas variables controlan el equilibrio del agua y determinan la importancia relativa de los diferentes componentes del ciclo hidrológico. El modelo permite valores para estas variables climáticas para ser ingresados por registros de datos observados o generados durante la simulación. Cuanta mayor cantidad de información, existe mayor probabilidad que los caudales de salida en el punto de aforo del área de estudio se asemejen a los caudales observados.

Asimismo, el modelo permite ingresar los mapas de cobertura de suelo (uso de suelo); geología local (tipo de suelo), Modelo de elevación digital (DEM), estos mapas pueden generarse con información real de la zona de estudio y ser procesados en el SIG, para luego ingresarlos al modelo. Dado que el número de curva (CN) depende mucho de estas condiciones al ingresar toda esta información más real al modelo, existe una mayor probabilidad que los caudales calculados en el punto de aforo del área de estudio se asemejen más a los caudales observados.

2.2.1. *Parámetros para el cálculo de CN y fuentes de información*

El curva número es un valor sensible que permite caracterizar el potencial de escorrentía en una cuenca y que se determina a partir de características físicas del territorio como el tipo, la densidad y el tratamiento de la cobertura de suelo, así como por el grupo hidrológico de suelo (GHS), haciendo este último referencia a un conjunto de suelos que tiene similar comportamiento frente a la generación de escorrentía [14]. Existen los siguientes GHS [15]:

- Grupo A: suelos predominantemente arenosos, con bajo potencial de escorrentía cuando están completamente húmedos.
- Grupo B: suelos con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas que tienen un

potencial de escorrentía moderadamente bajo cuando están completamente húmedos.

- Grupo C: suelos de textura moderadamente fina a fina, con potencial de escorrentía moderadamente alto cuando están húmedos.
- Grupo D: suelos con alto potencial de escorrentía y tasas de infiltración muy bajas, de textura arcillosa.

Es preciso indicar que existen tres clases de condiciones de humedad para una cuenca, según el SCS, considerando la cantidad de lluvia caída en el periodo de cinco días anteriores [16]. Estas tres clases se representan como CN I, CN II y CN III. La condición de humedad II hace referencia a una condición de humedad media. Si en el momento en que se produce la precipitación el suelo se encuentra saturado debido a las lluvias precedentes, la escorrentía que debe suscitarse será mayor, lo que se clasificaría como condición de humedad III; todo lo contrario ocurre si el suelo está especialmente seco, en cuyo caso la escorrentía que se presentará será menor denominándose condición de humedad I.

Por tanto, para obtener el curva número para las condiciones I y III, se parte de los valores de humedad de la condición II, y en base a ello se realiza una conversión que permite modificar los valores de CN para condiciones I y III. Para la presente investigación, se trabajó con la condición de humedad II.

Cabe recalcar, que en cuencas donde los tipos de uso de suelo varían dentro del área de la misma se puede calcular un CN compuesto considerando el porcentaje de incidencia en la cuenca de acuerdo al uso de tierra.

Un parámetro importante que no considera el modelo estándar NRCS para el cálculo del CN, es la pendiente de la cuenca, a pesar de ser un factor importante para determinar el movimiento del agua dentro de una cuenca [17]. De hecho, los valores de CN obtenidos del Manual NRCS generalmente se asume que responden a una pendiente del 5 % [18], lo cual evidentemente es una aproximación, que será cercana o lejana dependiendo de la pendiente original de la cuenca. En este respecto, el utilizar

modelos digitales de elevación (DEM) procesados por herramientas SIG y modelos hidrológicos computarizados como el SWAT permiten obtener un valor de CN más real, ya que se utiliza una aproximación cercana del relieve real de la cuenca.

Para el cálculo del curva número (CN) y posterior obtención de los caudales mensuales en el punto de aforo se utilizó el modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool), el mismo que fue procesado en el programa QGIS.

2.2.2. Datos hidrometeorológicos

Es cada vez es más importante disponer de datos meteorológicos fiables para comprender las tendencias de las variables climáticas y los extremos climáticos, así como su impacto en los recursos hídricos y la agricultura. En este respecto, la información sobre precipitaciones temporales y de distribución espacial es clave para realizar una simulación y predicción eficaz de los procesos hidrológicos [19], sobre todo en los lugares o áreas donde no se dispone de mediciones. En este respecto, para obtener los parámetros de precipitación y temperatura para el modelo hidrológico, se utilizó la data grillada PISCO (Peruvian Interpolation data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations), que tiene información espacial de precipitación y temperatura del Perú desde el 1 de enero de 1981 hasta el 31 de diciembre del 2016 [20] con una resolución de 10 km, la misma que se procesó en el software R para el área de estudio (25 sub cuencas).

Asimismo, fue necesario contar con información hidrométrica que indique los caudales de salida (caudales observados) en el punto de aforo con la finalidad de poder comparar y validar los caudales calculados mediante el modelo hidrológico SWAT. Para tal efecto, se obtuvo la información de registros de caudales medios mensuales (en m^3/s) en la estación Puente Sánchez Cerro (ubicada en el río Piura, ciudad de Piura) del Proyecto Especial Chira – Piura (PECHP), desde el enero de 1981 hasta diciembre del 2016. La Tabla 1 muestra las principales características de esta estación.

Tabla 1: Características de la Estación Hidrométrica

Datos de la Estación Hidrométrica	
Estación	Puente Sanchez Cerro
Tipo	Hidrométrica
Río	Piura
Ubicación	Límite entre distritos Piura y Castilla – Prov. Piura – Dpto. Piura
Coordenadas	Latitud: 05°11'55" Longitud: 80°37'20"
Altitud	23.32 ms.nm.

2.2.3. Descargas de información geográfica (mapas)

Del satélite ALOS PALSAR se obtuvo un modelo digital de elevación (DEM) de 12,5 m de resolución espacial, mientras que el mapa de cobertura vegetal Landuse se obtuvo del portal web globallandcover.com con una resolución de 30 m y el mapa mundial de suelos (tipo de suelo) de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) con resolución de 8 km. Con la utilización de los mapas antes mencionados, se procedió a calcular los valores de CN haciendo uso del modelo matemático SWAT y procesado en el software QGIS. En la Figura 3, Figura 4 y Figura 5 se muestra lo antes mencionado.

2.3. Estimación de los valores de CN

Se utilizó el modelo hidrológico SWAT y los datos de ingreso antes citados (registros y mapas) para el cálculo de CN.

El modelo SWAT 2005, tiene una interfaz gráfica ArcGIS, QGIS, la cual hace más sencillo su manejo y utilización, en la presente investigación se trabajó con el interfaz QSWAT, en el cual se ingresaron los mapas de cobertura vegetal, de suelos, y de elevación digital. Primero se ingresa el DEM 12.5 m del área de estudio en el interfaz QSWAT, se procede a realizar la delimitación en sub-vertientes o sub-cuencas tomando como punto de aforo o inicio de la delimitación el puente Sanchez CERRO, generándose 25 sub cuencas; posteriormente se crean archivos de entrada directamente desde las tablas y los mapas ráster mencionados anteriormente, dichas tablas de

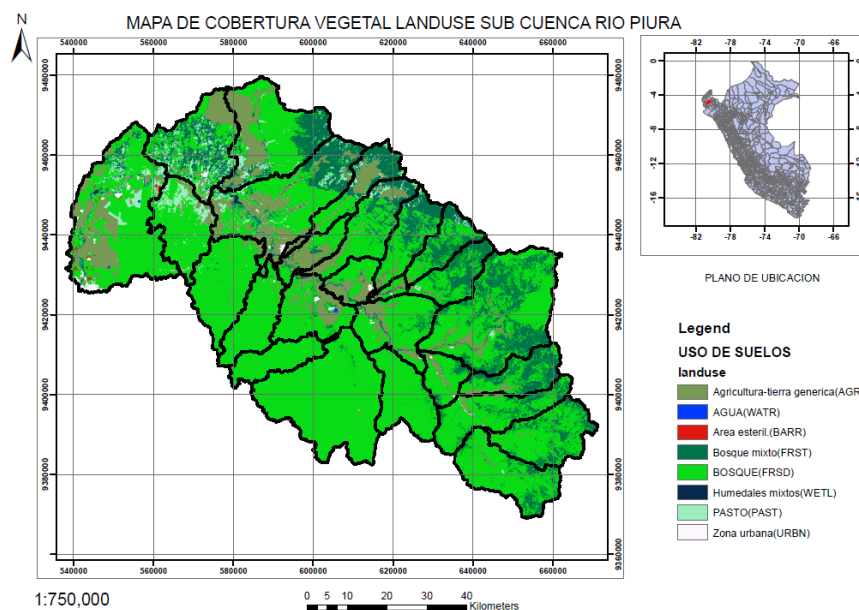


Figura 3: Mapa de cobertura vegetal de la zona en estudio.

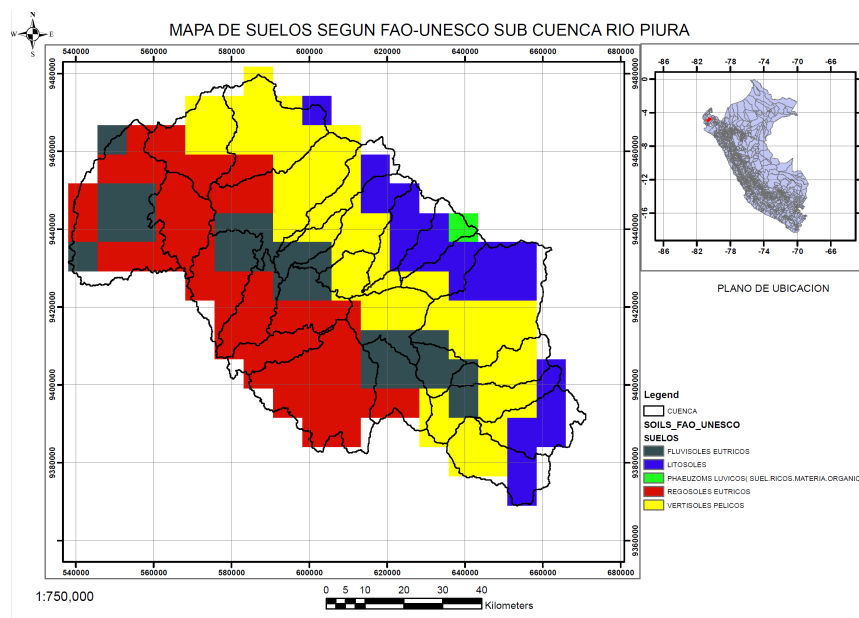


Figura 4: Mapa de suelos “Soil” de la zona en estudio.

atributo de uso de la tierra son utilizadas para especificar el código del tipo de uso/planta o tipo de uso urbano para ser modelado para cada categoría en el mapa ráster de uso de la tierra, el archivo de atributos de suelos especifica el tipo de suelo a ser modelado para cada categoría en el mapa raster de suelos, para propósitos de simulación la cuenca hidrográfica de la presente investigación será dividida en un numero de sub-

vertientes o sub-cuencas, en la simulación es muy útil, particularmente, cuando hay diversas áreas de la misma cuenca, que se ven afectadas por el uso de suelos o suelos bastante desiguales de tal forma que impactan grandemente la hidrología del sector [21].

Posteriormente se ingresan los datos de precipitación y temperatura en formato .dbf obtenidos anteriormente con ayuda del Script en R, para cada

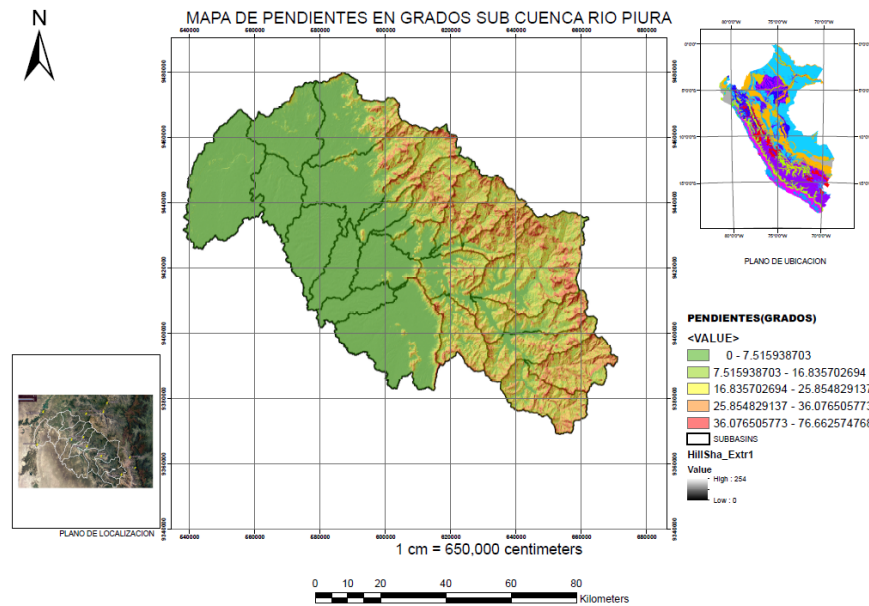


Figura 5: Mapa de pendientes procesado en QSWAT.

una de las 25 sub- cuencas, luego que se generan los HRUs, se procede a realizar la simulación a paso mensual, con un periodo de calentamiento de 3 años, desde enero del año 1981 hasta enero del año 2016, se ingresan los caudales observados en el punto de aforo puente Sánchez Cerro, y se verificó la eficiencia del Coeficiente Nash-Sutcliffe, luego se procede a descargar los valores de CN que se generaron en el modelo para cada una de las 25 subcuencas, en Read SWAT Output opción Open input.std, y que se pueden observar en la Tabla 2

Asimismo, para verificar la precisión de los resultados de valores de CN frente a otros métodos y/o datos existentes y así poder calibrarlos, se calcularon los valores promedio de CN utilizando las tablas de valores de CN del Servicio de Conservación de Suelos (ahora NRCS), el mapa de suelos del Ministerio del Ambiente – MINAM (basado en el mapa mundial de suelos de la FAO) y las imágenes satelitales del programa Google Earth Pro, obteniendo un valor de CN promedio para cada una de las 25 sub cuencas del área de estudio. En la Tabla3 se detallan los valores de CN para cada sub cuenca.

También se extrajeron los valores de CN del mapa temático ráster de la Autoridad Nacional del Agua (ANA) como una tercera opción de calibración, que permita tener un rango de valores

Tabla 2: Valores de CN (II) extraídos del modelo hidrológico SWAT

Sub cuenca	CN
1	82.50
2	78.00
3	82.33
4	79.80
5	76.60
6	75.29
7	75.67
8	76.60
9	79.00
10	77.00
11	77.00
12	75.00
13	77.00
14	75.00
15	80.00
16	75.40
17	75.00
18	79.33
19	79.33
20	78.00
21	77.00
22	82.33
23	80.43
24	82.50
25	82.50

de CN para el área de estudio y poder compararlos con los obtenidos en la presente investigación mediante el modelo hidrológico SWAT. Para ello, se reclasificó el mapa ráster CN en condiciones normales de humedad (CN II) emitido por el ANA y se transformó a formato shapefile (shp) para

Tabla 3: Valores de CN (II) calculados a partir de las tablas de CN del SCS.

Sub cuenca	CN (II)
01	70.65
02	70.36
03	79.16
04	77.80
05	78.33
06	78.33
07	77.50
08	77.08
09	76.36
10	64.80
11	48.60
12	78.05
13	62.07
14	77.55
15	69.99
16	76.75
17	76.75
18	77.58
19	77.55
20	70.20
21	53.75
22	79.55
23	79.83
24	48.08
25	80.05

Tabla 4: Valores de CN (II) obtenidos a partir del mapa ráster de CN del ANA

Sub cuenca	CN(II) Promedio
01	64.34
02	64.34
03	60.72
04	73.67
05	72.07
06	73.67
07	75.64
08	77.77
09	56.91
10	48.08
11	40.15
12	77.77
13	63.65
14	77.77
15	63.65
16	77.77
17	74.65
18	72.87
19	79.24
20	63.65
21	62.02
22	58.58
23	63.76
24	54.26
25	60.72

su procesamiento en el programa ArcMap, uno de los componentes del ArcGIS. Esto permitió realizar el corte del mapa CN del Perú tomando como referencia el área de la sub cuenca del río Piura con la que se estaba trabajando. Luego se extrajeron los valores de CN usando el comando zonal “statistics as table” del menú ArcToolbox del programa ArcMap, y se aplicó el comando “joins and relates” a la cuenca ráster reclasificada con la tabla anterior, obteniéndose un ráster de CN con sus valores promedios en la cuenca de estudio.

A continuación, en el ArcMap se procedió a interceptar las 25 subcuencas con el ráster de CN, obteniendo varios valores de CN por sub cuenca, por lo que mediante un promedio aritmético se obtuvo un solo valor de CN para cada sub cuenca. La Tabla4 presenta los valores de CN obtenidos mediante el procedimiento antes mencionado.

2.4. Resultados y Discusión

Mediante la simulación realizada con los datos ingresados tales como el Modelo Digital de Elevación (DEM) ALOS PALSAR de 12,5 m de resolución espacial, el mapa de cobertura de suelo con resolución landuse de 30 m del global

landcover y el mapa de geología local de 30 m de resolución extraído del Mapa Mundial de Suelos “Soil” de la FAO, se procedió a extraer los valores de CN, calculados en el programa QGIS usando el modelo hidrológico SWAT en la simulación realizada con datos a paso mensual y para un periodo de calentamiento de 3 años. Se obtuvieron los valores de CN en condiciones normales para cada una de las 25 sub cuencas que conforman la sub cuenca en estudio de la cuenca del río Piura. Para tal efecto, cabe indicar que el modelo hidrológico SWAT simula los caudales a paso mensual y diario en base a los valores de CN calculados por el mismo modelo. En este caso, como se cuenta con datos observados a paso mensual, se compararon los caudales resultantes de la simulación con los caudales observados (en m³/s) en la estación del puente Sánchez Cerro, a cargo del Proyecto Especial Chira – Piura (PECHP). Se lograron alcanzar valores de coeficiente Nash Sutcliffe = 0.93 y coeficiente de correlación de Pearson (r) = 0.97. Dichos valores son considerados como excelentes en cuanto a aproximación con los caudales observados. En

la Figura 6 se puede apreciar el comportamiento aleatorio de los caudales simulados en relación a los observados, ya que entre los años 1987 a 1992, entre 1998 a 2004, en el año 2008 y 2009 los caudales se subestiman, mientras que, en el resto de casos, dentro del rango en análisis, se sobrestiman los caudales observados. Asimismo, se puede apreciar un buen grado de aproximación de los caudales calculados con los observados.

Para el caso de los valores de CN extraídos del mapa ráster del ANA, se utilizó la calibración manual a paso mensual con un periodo de calentamiento de 3 años en el modelo SWAT, procesado en el interfaz QSWAT, para lo cual se ingresaron los valores de CN para condiciones normales de humedad.

Se verificaron los caudales simulados con los observados en la estación del puente Sánchez Cerro; la simulación se realizó desde el año 1981 hasta el año 2016 (periodo de 36 años), y se generaron 25 sub cuencas y 106 HRU, con precipitaciones mensuales. Al hacer la comparación, se obtuvieron resultados de valores de coeficiente Nash Sutcliffe = 0.88 y coeficiente de correlación de Pearson $r = 0,95$, siendo estos considerados como muy buenos.

En lo referente al cálculo de valores de CN para el área de estudio utilizando las tablas del SCS, se obtuvieron los valores de CN por cada grupo hidrológico de suelo, es decir, para cada conjunto de suelos que tienen similar comportamiento frente a la generación de escorrentía [14]. Asimismo, para cada sub cuenca se identificó más de un grupo hidrológico, por lo que se tuvo que ponderar los valores para obtener el número de curva correspondiente a la cuenca en conjunto.

Dichos valores de CN se ingresaron manualmente al modelo SWAT, procesado en el interfaz QSWAT con el objetivo de realizar una simulación y obtener caudales a paso mensual para compararlos con los datos observados y ver su aproximación, obteniéndose valores de coeficiente *Nash Sutcliffe* = 0,90 y coeficiente de correlación de Pearson $r = 0,96$. Dichos resultados, teniendo en cuenta el coeficiente de Nash Sutcliffe, se consideran como excelentes, y respecto al coeficiente de correlación de Pearson, al

estar próximo a 1, se puede afirmar que el resultado obtenido es muy bueno.

En la Tabla 5 se hace un comparativo de dichos resultados:

Tabla 5: Valores de CN usando tablas del SCS para condiciones normales de humedad

Coeficiente	CN calculado	CN SCS	CN del ANA
Nash Sutcliffe	0.93	0.90	0.85
Correlación de Pearson	0.97	0.96	0.95

Por tanto, se pudo corroborar que los resultados de CN obtenidos de la presente investigación se ajustan mucho más a la realidad de la zona en estudio. Asimismo, se pudo notar que los resultados de los caudales simulados, utilizando los valores de CN obtenidos por los tres procedimientos detallados anteriormente, muestran una tendencia tanto a sobreestimar como a subestimar los caudales observados, asemejándose mucho más el comportamiento de los caudales obtenidos a partir de los valores de CN del SCS y los del ANA (se subestima en la primera parte del periodo en análisis y se sobrestima en la parte final de dicho periodo), mientras que los caudales obtenidos a partir de los valores de CN calculados por el investigador muestran un comportamiento más aleatorio, con zonas donde se sobreestiman los caudales y viceversa.

Se procedió a extraer los valores de CN propuestos y en base a estos se elaboraron los mapas de CN en formato shp para la cuenca en estudio, ubicada en la costa norte del Perú. En la Figura 7, se muestra el mapa de isolíneas de Curva Número en condiciones de humedad media (CN II) propuesto para la zona de estudio, es decir, la subcuenca del río Piura con punto de aforo en el Puente Sánchez Cerro.

Asimismo, puesto que el modelo SWAT también permite conseguir los valores de CN I y CN III, mediante el programa Excel se realizó una recta de regresión entre cada uno de dichos valores y los valores de CN II, obteniendo que existe una correlación lineal buena entre los valores, generando las ecuaciones (1) (2), que permitan

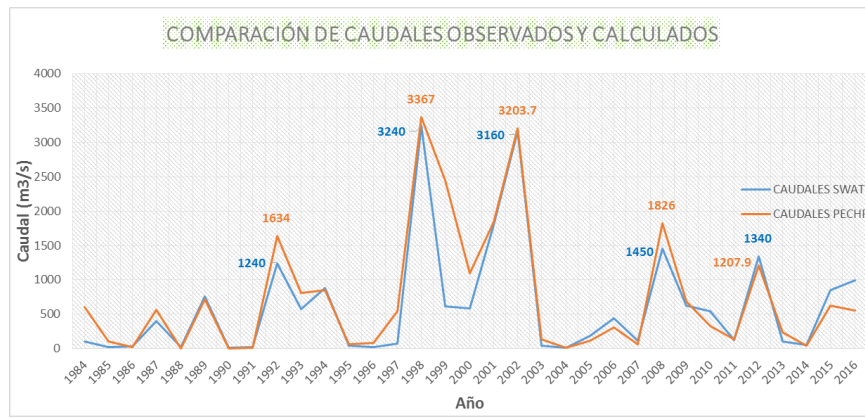


Figura 6: Comparación de los caudales observados por la estación del PECHP y los calculados por el investigador mediante el modelo hidrológico SWAT.

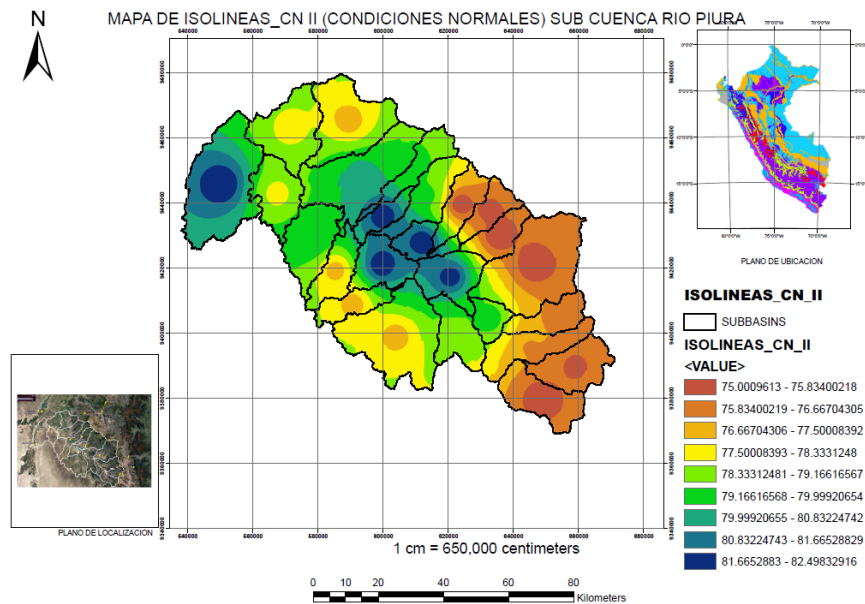


Figura 7: Mapa de isolíneas de CN II (condiciones normales) para el área de estudio.

calcular los valores de CN I y CN III de manera más sencilla que si se extrajeran del modelo SWAT:

$$CNI = 1,3 * (CNII) - 40,689 \quad (1)$$

con un valor de r^2 igual a 0,9995 (aproximación muy buena).

$$CNIII = 0,5404 * (CNII) + 48,207 \quad (2)$$

con un valor de r^2 igual a 0,9992 (aproximación muy buena).

3. Conclusiones

Mediante el modelo hidrológico SWAT se obtuvieron mejores resultados de CN que los obtenidos usando los valores de las tablas del SCS y que los extraídos del mapa ráster del ANA, todo ello debido a que, en el caso del SCS, se consideran valores experimentales realizados para las condiciones de suelo en parcelas agrícolas de los Estados Unidos que no necesariamente son iguales a las de la costa norte del Perú, además que las tablas de valores de CN consideran una pendiente referencial del 5 % para todas las cuencas y no consideran la humedad antecedente que juega

un papel crucial en la generación de escorrentía; y en el caso del ANA, este organismo ha obtenido un mapa ráster de CN (número de curva) para todo el Perú en base a un DEM de 90 m de resolución, mientras que en la presente investigación se utilizó un DEM Alos Palsar de 12,5 m de resolución espacial, lo que permitió tener valores de Nash Sutcliffe y coeficiente r mucho más aceptables que al ingresar los valores de CN del ANA.

Al calcular el CN (número de curva) usando los valores de la tabla del SCS, se puede verificar que el método es mucho más tedioso y no muy preciso. Además, se debe tener en cuenta que mientras el tipo de cobertura de suelo del área que se requiera estudiar se diferencie más del tipo de suelo utilizado como patrón por el SCS (parcelas agrícolas en EE.UU.) los resultados serán menos precisos, tal y como lo han refrendado otros autores [22]. Para el presente caso, al contar la costa norte del Perú, y específicamente el área de estudio, con buena cantidad de terrenos agrícolas, se pudieron obtener resultados de CN bastante aceptables al usar las tablas de SCS.

La presente investigación puede considerarse como base para el desarrollo de modelos hidrológicos más grandes que permitan involucrar a cuencas de la costa norte del Perú, de acuerdo a disponibilidad de datos observados en la zona.

4. Referencias

- [1] A. Huerta, C. Aybar, and W. Lavado-Casimiro, "PISCO temperatura v.1.1." SENAMHI - DHI-2018," SENAMHI, Lima-Perú, Reporte técnico, 2018.
- [2] S. Mishra, V. Singh, S. Singh, P. Mishra, V. Singh, and P. Singh, "Revisiting the Soil Conservation Service Curve Number Method," *Hydrologic Modeling. Water Science and Technology Library*, vol. 81, pp. 667–693, 2018. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5801-1_46
- [3] A. Vega-Manganiello, F. Quines, C. Verónica, and E. Guevara, "Validación de modelos del proceso lluvia-escorrentía," *Revista Ingeniería UC*, vol. 22, no. 3, pp. 1–15, 2015.
- [4] F. Valencia and E. Guevara, "Validación del modelo HEC HMS en la cuenca del río Cabriales para el análisis hidrológico," *Revista Ingeniería UC*, vol. 21, no. 1, pp. 36–49, 2014.
- [5] S. Mishra, V. Singh, S. Singh, P. Mishra, V. Singh, and P. Singh, "Revisiting the Soil Conservation Service Curve Number Method," *Hydrologic Modeling. Water Science and Technology Library*, vol. 81, pp. 667–693, 2018. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5801-1_46
- [6] S. Swain, M. Verma, and M. Verma, "Streamflow Estimation Using SWAT Model Over Seonath River Basin, Chhattisgarh, India," *Hydrologic Modeling. Water Science and Technology Library*, vol. 81, pp. 659–665, 2018. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5801-1_45
- [7] B. Cruz, F. Gavi, M. Martinez, and J. Juárez, "Uso de suelo y su efecto en el escurrimiento modelado con SWAT," *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. 12, no. 2, pp. 157–206, 2021. <http://revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/2179/2297>
- [8] G. R. de Piura-ANA-GTZ/PDRS, "Proceso de elaboración del plan de gestión de la cuenca del río Piura – Aspectos metodológicos," Gobierno Regional de Piura, Informe Técnico 02, 2009.
- [9] J. Arnold and N. Fohrer, "SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling," *Hydrological Processes Journal*, vol. 19, no. 3, pp. 563–572, 2005. <https://doi.org/10.1002/hyp.5611>
- [10] B. Venkatesh, T. Chandramohan, B. Purandara, M. Jose, and P. Nayak, "Modeling of a River Basin Using SWAT Model," *Hydrologic Modeling. Water Science and Technology Library*, vol. 81, pp. 707–714, 2018. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5801-1_48
- [11] K. Abbaspour, E. Rouholahnejad, S. Vaghefi, R. Srinivasan, H. Yang, and B. Kløve, "A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model," *Journal of Hydrology*, vol. 524, pp. 733–752, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>
- [12] R. León, D. Portuquez, and E. Chávarri, "Modelación de la disponibilidad hídrica del río Piura - Perú, considerando la incidencia del cambio climático," *Revista de Investigaciones Altoandinas*, vol. 21, no. 3, pp. 182–193, 2019. <https://doi.org/10.18271/ria.2019.476>
- [13] A. Stehr, P. Debels, F. Romero, and H. Alcayaga, "Hydrological modelling with SWAT under conditions of limited data availability: evaluation of results from a Chilean case study," *Hydrological Sciences Journal*, vol. 53, no. 3, pp. 588–601, 2008. <https://doi.org/10.1623/hysj.53.3.588>
- [14] A. Díaz and T. Mercado, "Determinación del número de curva en la subcuenca de Betancé (Córdova, Colombia) mediante teledetección y SIG," *Revista Ingeniería y Desarrollo, Universidad del Norte*, vol. 35, no. 2, pp. 452–470, 2017.
- [15] N. R. C. Service, "Hydrologic soil groups," in *Hydrology National Engineering Handbook*. USA: United States Department of Agriculture, 2009.
- [16] S. D. Aguila, *Modelamiento de procesos hidrológicos en cuencas de la sierra central del Perú*. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina, 2021.

- [17] M. Huang, J. Gallichand, Z. Wang, and M. Goulet, "A modification to the soil conservation service curve number method for steep slopes in the Loess Plateau of China," *Hydrological Processes*, vol. 20, no. 3, pp. 579–589, 2005. <https://doi.org/10.1002/hyp.5925>
- [18] S. Mishra, S. Rawat, S. Chakraborty, R. Pandey, M. Jain, and U. Chaube, "Relation between runoff curve number and PET," *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 9, no. 2, pp. 355–365, 2014. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000780](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000780)
- [19] J. Pang, H. Zhang, Q. Xu, Y. Wang, Y. Wang, O. Zhang, and J. Hao, "Hydrological evaluation of open-access precipitation data using SWAT at multiple temporal and spatial scales," *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 21, no. 7, p. 3603–3626, 2020. <https://doi.org/10.5194/hess-24-3603-2020>
- [20] C. Aybar, W. Lavado, A. Huerta, C. Fernández, F. Vega, E. Sabino, and O. Felipe, "Uso del Producto Grillado "PISCO" de precipitación en Estudios, Investigaciones y Sistemas Operacionales de Monitoreo y Pronóstico Hidrometeorológico," SENAMHI-DHI, Nota técnica 01, 2017.
- [21] N. Uribe, "SWAT. Conceptos básicos y guía rápida para el usuario," Centro Internacional de Agricultura Tropical, Reporte técnico, 2010.
- [22] M. Bartlett, A. Parolari, J. McDonell, and A. Porporato, "Beyond the SCS-CN method: A theoretical framework for spatially lumped rainfall-runoff response," *Water Resources Research*, vol. 52, no. 6, pp. 4608–4627, 2016. <https://doi.org/10.1002/2015WR018439>

Estimation of the effect of climate change on the flows of the medium-high basin of the Piura River using GCM from CMIP6.

Jhon Alberca , Jesús Mejía , Edilberto Guevara-Pérez 

^aPrograma de Doctorado en Recursos Hídricos, Escuela de Post Grado, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú



<https://doi.org/10.54139/revinguc.v29i2.290>

Abstract.- The objective of the present investigation was to analyze the Global Climate Models (GCM) of the CMIP6 to determine the model that allows obtaining values of precipitation and temperature very similar to those registered in the PISCO grid data for the medium-high basin of the Piura River, and based on said model, estimate the hydrological impacts of climate change on the flows of the intermediate future (2015–2100) that allow identifying the existence of areas vulnerable to flooding in the sector adjacent to the Puente Sánchez Cerro gauging point. Of the 58 GCM, 14 were analyzed for the SSP5-8.5 scenario of the CMIP6 that have information for the study area, obtaining records of precipitation, maximum and minimum temperature, which were corrected by the Statistical Downscaling methodology with the Quantile-mapping procedure. Said information was contrasted with the PISCO data (1981–2016), and the SWAT hydrological model was used to obtain the flows at the Puente Sánchez Cerro Gauging Point, and compare them with the PECHP data (1981–2016).

Keywords: Climate change; Piura River; GCM; CMIP6.

Efecto del cambio climático sobre los caudales en la cuenca del río Piura usando GCM del CMIP6.

Resumen.- El objetivo de la presente investigación fue analizar Modelos Climáticos Globales (GCM) del CMIP6 para determinar el modelo que permita obtener valores de precipitación y temperatura muy semejantes a los registrados en la data grillada PISCO para la cuenca medio-alta del río Piura, y en base a dicho modelo, estimar los impactos hidrológicos del cambio climático en los caudales del futuro intermedio (2015–2100) que permitan identificar la existencia de zonas vulnerables a inundaciones en el sector adyacente al punto de aforo Puente Sánchez Cerro. De los 58 GCM, se analizaron 14 para el escenario SSP5-8.5 del CMIP6 que cuentan con información para el área de estudio, obteniéndose registros de precipitación, temperatura máxima y mínima, los mismos que fueron corregidos por la metodología de Downscaling estadístico con el procedimiento Quantile-mapping. Dicha información fue contrastada con la data PISCO (1981–2016), y se utilizó el modelo hidrológico SWAT para obtener los caudales en el Punto de Aforo Puente Sánchez Cerro, y compararlos con la data del PECHP (1981–2016).

Palabras clave: Cambio climático; río Piura; GCM; CMIP6.

Recibido: 27 de abril, 2022.

Aceptado: 30 de junio, 2022.

1. Introducción

La costa norte del Perú es una de las más lluviosas del país y está expuesta a la ocurrencia de eventos extremos, como los originados por el fenómeno El Niño y la Oscilación del Sur (ENSO). Últimamente, dichos eventos ocurren con más frecuencia, probablemente debido al efecto del

cambio climático, aunque hay que reconocer que se trata de una alteración climática esencialmente costeña con mayor frecuencia de ocurrencia en la costa norte. Sin embargo, el impacto del fenómeno se extiende a una extensa zona del territorio nacional, especialmente cuando, por su gran magnitud adquiere las características del denominado Mega Niño.

Existen referencias que indican la ocurrencia de unas 10 veces del Mega Niño en los últimos cinco siglos en la costa norte de Perú [1], lo que implica un periodo de retorno de orden de cincuenta años. Es por eso que se hace necesario llevar a cabo

* Autor para correspondencia:

Correo-e:albercariosjhon@gmail.com (J. Alberca)

investigaciones para determinar la vulnerabilidad de esa región y establecer si el cambio climático está ejerciendo un efecto adicional al fenómeno marítimo periódico ENSO, específicamente sobre los caudales en la cuenca del río Piura, de modo que se puedan adoptar medidas de prevención y adaptación.

Las medidas preventivas y de adaptación requieren del conocimiento de las características de los eventos, cuya estimación estadística requiere de información hidro-meteorológica, la cual es muy escasa en la región.

El acceso a mediciones meteorológicas terrestres en algunas zonas suele ser difícil, encontrando pocos datos disponibles e impidiendo a la vez utilizar datos meteorológicos para alimentar a modelos hidrológicos que proporcionen información útil para la toma de decisiones [2].

Como una alternativa de solución, surgen las estimaciones de precipitación basadas en satélites, ya que son una fuente alternativa potencial de datos de forzamiento para el modelado hidrológico, ya que cubren un área grande con una alta resolución temporal y espacial [3].

De otro lado, en la estimación caudales es importante la cuantificación del efecto del cambio climático en los componentes hidrológicos dentro de la cuenca. La actividad humana ha impactado sustancialmente el equilibrio ambiental en la Tierra debido al uso excesivo de hidrocarburos, que han liberado millones de toneladas de monóxido de carbono y otros elementos que son dañinos para la atmósfera y han afectado el comportamiento del clima a nivel global [4, 5, 6]. En este sentido, especialmente en el contexto de la política ambiental, el término Cambio Climático ha llegado a ser sinónimo de Calentamiento Global Antropogénico [7]. Por eso, estos temas están recibiendo considerable interés científico y político debido al desconocimiento en la dinámica de los ríos que es todavía más incierta bajo un escenario de Cambio Climático y cambios acelerados de los usos del suelo [8].

Una forma de solventar la falta de información y evaluar apropiadamente el impacto potencial del Cambio Climático en la hidrología de la cuenca, es a través de la formulación de escenarios a escala de

cuenca creados a partir de las predicciones de un Modelo Global del Clima (Global Climate Models - GCM) [9].

En el Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, se utilizaron modelos de circulación general (GCM) para dar una visión general de la situación actual y proporcionar proyecciones de posibles cambios en el clima [10].

Los GCM son capaces de reproducir matemáticamente de una forma adecuada, los principales procesos que ocurren en los cinco componentes del sistema climático: atmósfera, océano, criósfera, geósfera y biósfera. Consisten en programas informáticos que se ejecutan en superordenadores con los que se resuelve numéricamente un conjunto de ecuaciones que expresan las leyes y principios de la física que gobiernan el sistema climático terrestre [11].

Un problema de los GCM es que los modelos climáticos difieren especialmente para la precipitación [12]. Sin embargo, el uso de una variedad de modelos también puede ser una ventaja, por ejemplo, para muestrear la incertidumbre potencial en las condiciones iniciales y también en las proyecciones futuras [13]. Por tanto, aunque los GCM no son perfectos, no dejan de representar una valiosa herramienta para evaluar el cambio climático.

El objetivo de la presente investigación es determinar la influencia del cambio climático en la determinación de los caudales del río Piura hasta la zona adyacente al punto de aforo de la estación Puente Sánchez Cerro, entre los distritos de Piura y Castilla, que constituyen áreas urbanas de gran vulnerabilidad frente a las inundaciones, utilizando la base de datos PISCO de SENAMHI, modelos de lluvia escurrentía como SWAT y los modelos climáticos globales.

2. Metodología

El esquema metodológico empleado en esta investigación se muestra a detalle en la Figura 1.

2.1. Área de estudio y punto de aforo

El área de estudio abarca la parte alta y media de la cuenca del río Piura, en el departamento de

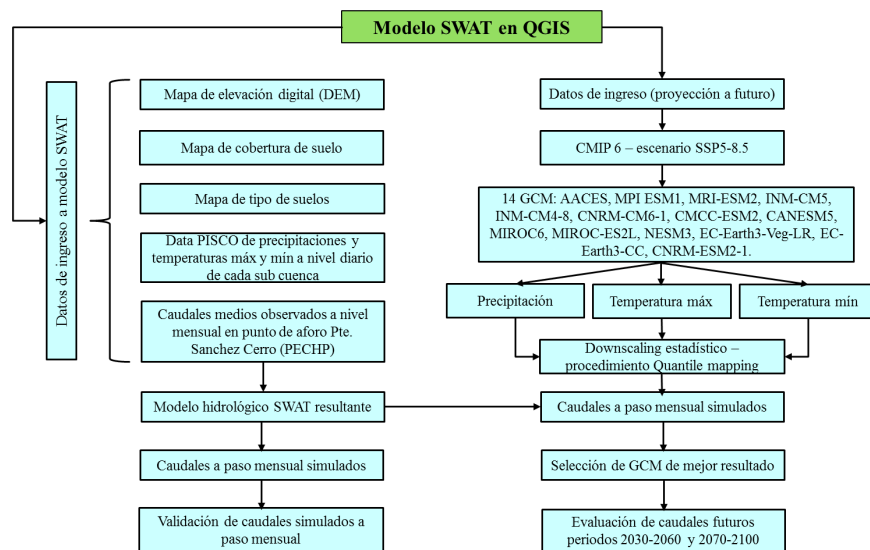


Figura 1: Esquema metodológico

Piura, en el norte del Perú, y que pertenece a la red hidrográfica de la vertiente del pacífico. El cauce principal de la cuenca es el río Piura, que nace a 3600 msnm en la provincia de Huancabamba bajo en nombre de río Canchaque, y que al unirse con el río Bigote adopta la denominación de río Piura, recorriendo un total de 280 kilómetros hasta su desembocadura en el océano Pacífico [14].

El punto de aforo que se consideró para la delimitación del área de estudio fue la estación hidrométrica ubicada en el Puente Sánchez Cerro, entre los distritos de Piura y Castilla, ya que dicha estación cuenta con información de los caudales máximos y medios observados en el río Piura. Como resultado de la delimitación, se obtuvieron 16 sub cuencas para el área de estudio, las mimas que se aprecian en la Figura 2.

2.2. Datos

Es necesario tener en cuenta que la información sobre precipitaciones temporales y de distribución espacial son clave para realizar una simulación y predicción eficaz de los procesos hidrológicos. Por ello, los datos de precipitación y temperatura máxima y mínima se obtuvieron de un producto grillado a nivel nacional denominado “Peruvian Interpolated data of SENAMHI’s Climatological and Hydrological Observations” [15], el cual contiene información espacial de precipitación y temperatura del Perú desde el 1 de enero de 1981

hasta el 31 de diciembre del 2016 y que cuenta con una resolución espacial de 10 km × 10 km. Se generaron 16 estaciones en los centroides de cada sub cuenca. Dicha data se procesó en el software R como se puede observar en la Figura 3.

Asimismo, del satélite ALOS PALSAR se obtuvo el mapa del modelo digital de elevación (DEM por sus siglas en inglés) de 12,5 m de resolución espacial.

Respecto al mapa de cobertura de suelo se obtuvo de la web globallandcover.com con una resolución de 30 m y el mapa de tipo de suelo se obtuvo del mapa mundial de suelos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) con una resolución de 8 km.

2.3. Modelo hidrológico SWAT

Para el procesamiento de la información, se hizo uso de un modelo hidrológico el cual se define como la caracterización simplificada del funcionamiento hidrológico de un sistema real [16]. Los modelos hidrológicos son altamente usados en las investigaciones actuales relacionadas a recursos hídricos, climáticos, etc. En este caso, se utilizó el modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool), el mismo que fue procesado y validado en el programa QGIS.

SWAT es un modelo conceptual de tiempo continuo que se desarrolló a principios de la década de 1990 para ayudar a los administradores

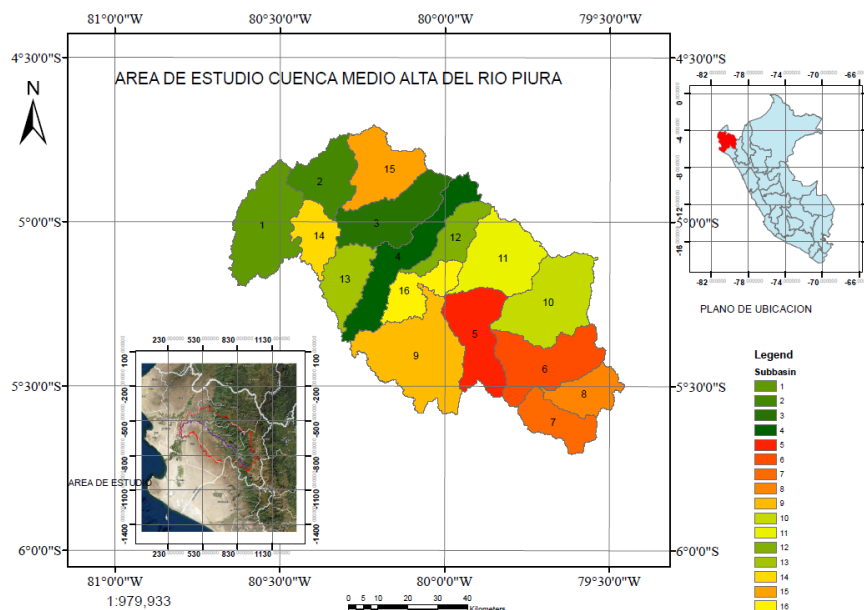


Figura 2: Delimitación del área de estudio (cuenca medio-alta del río Piura)

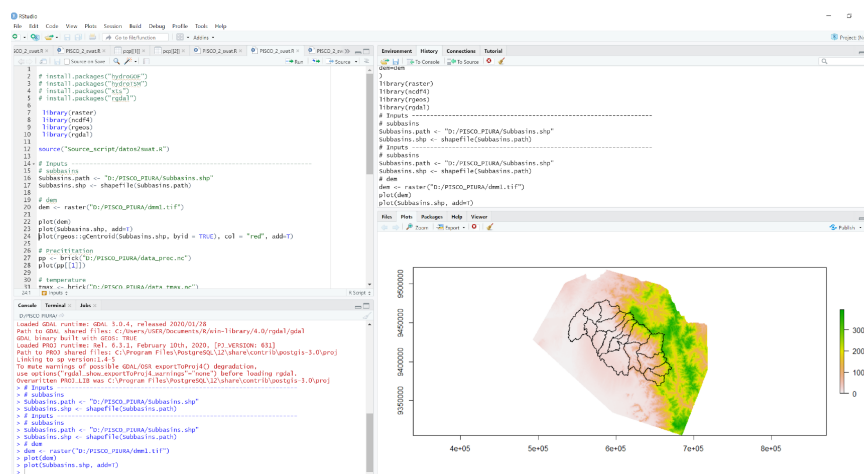


Figura 3: Subcuencas del área de estudio cargadas en el programa R

de recursos hídricos a evaluar el impacto de la gestión y el clima en los suministros de agua y la contaminación de fuentes difusas en cuencas hidrográficas y grandes cuencas fluviales [17].

En SWAT, una cuenca se divide en múltiples subcuencas, que luego se subdividen en unidades de respuesta hidrológica (HRU) que consisten en características únicas de uso de la tierra, manejo, topografía y suelo. La simulación de la hidrología de la cuenca se realiza en la fase terrestre, que controla la cantidad de agua, sedimentos, nutrientes y cargas de plaguicidas al canal principal en cada subcuenca, y en la fase de enrutamiento, que es el

movimiento de agua, sedimentos, etc., a través de los arroyos de las subcuencas hasta sus salidas [18].

Los datos de entrada del área de estudio que necesita el modelo hidrológico SWAT, cargado en el programa QGIS, son la información de precipitación y temperatura, el modelo digital de elevación, tipo de suelo y la cobertura de suelo, descritos anteriormente.

2.4. Datos hidrológicos registrados para validación de resultados

Fue necesario contar con información hidrométrica que indique los caudales de salida (caudales

observados) en el punto de aforo con la finalidad de poder comparar los caudales calculados mediante el modelo hidrológico SWAT, y así validar el modelo. Para tal efecto, se obtuvo la información de registros de caudales máximos mensuales (en m^3/s) en la estación Puente Sánchez Cerro (ubicada en el río Piura, ciudad de Piura) del Proyecto Especial Chira – Piura (PECHP), desde el enero de 1981 hasta diciembre del 2020.

2.5. Proyección de datos climáticos

A pesar de la estación hidrométrica existente en el punto de aforo de la cuenca medio-alta del río Piura, para poder proyectar los caudales futuros teniendo en cuenta los efectos del cambio climático se utilizaron catorce Modelos Climáticos Globales (GCM) en el escenario SSPP-8.5, que forman parte de la sexta fase del proyecto de intercomparación de modelos acoplados (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 - CMIP6).

Para descargar la data de los catorce GCM se utilizó el portal web: <https://cds.climate.copernicus.eu/#!/home> de Copernicus. Este portal almacena y distribuye un conjunto de datos que provienen de simulaciones de los 58 GCM acoplados. Para la presente investigación, se seleccionaron los 14 GCM que se describen a continuación: AACES (AUSTRALIA), MPI ESM1 GERMANIA, MRI_ESM2 (JAPON), INM-CM5 (RUSIA), INM-CM4-8 (RUSIA), CNRM-CM6-1 (FRANCIA), CMCC-ESM2 (ITALIA), CANESM5 (CANADA), MIROC6 (JAPON), MIROC-ES2L (JAPON), NESM3 (CHINA), EC-Earth3-Veg-LR (EUROPA), EC-Earth3-CC (EUROPA) y CNRM-ESM2-1 (FRANCIA). Las variables descargadas de los 14 GCM mencionados fueron precipitación y temperatura máxima y mínima, en formato Excel, para el centroide de cada subcuenca, desde el 1 de enero de 1981 hasta el 31 de diciembre de 2014 (para analizar el escenario presente) y desde el 1 de enero de 2015 hasta el 31 de diciembre de 2100 (para analizar el escenario futuro).

El primer escenario (presente) permitirá evaluar cuál de los catorce GCM analizados permite obtener valores con mejor grado de aproximación en comparación con los obtenidos de la data

grillada PISCO, mientras que el segundo escenario (futuro) permitirá obtener los caudales proyectados a futuro utilizando el GCM mediante el cual se obtuvieron valores con mejor aproximación. Para tal efecto, se utiliza el coeficiente estadístico Nash Sutcliffe para medir el grado de aproximación de los resultados.

3. Resultados

3.1. Validación de modelo hidrológico SWAT con la data grillada PISCO

La simulación de caudales con la data de precipitación y temperatura grillada PISCO del año 1981 hasta el año 2016 en el modelo hidrológico PISCO, con un periodo de calentamiento de 3 años, en comparación con la data observada caudales medios mensuales en el punto de aforo con información cargada desde el 1 de enero de 1984 hasta el 31 de diciembre de 2016, se observa que existe un coeficiente Nash Sutcliffe = 0,94; y un coeficiente de correlación de Pearson $r = 0,97$, como se observa en la Figura 4. Por tanto, se queda validada la data ingresada al modelo SWAT.

3.2. Coeficientes estadísticos para cada GCM

Con la data de precipitación y temperatura máxima y mínima descargada por cada GCM del CMIP6 (del 1 de enero de 1981 al 31 de diciembre del 2014 y desde el 1 de enero del 2015 hasta el 31 de diciembre del 2100) y para la región demarcada en el área de la cuenca, se procesó en el programa R y se descargó en formato CSV. Asimismo, mediante un script en R se le aplicó una corrección estadística Downscaling – procedimiento Quantile mapping, el mismo que permite regionalizar los datos descargados de los GCM. Con la data ya corregida e ingresada en formato .txt en el modelo hidrológico SWAT validado, se obtuvieron los resultados del Coef. de Correlación de Pearson y Coef. Nash Sutcliffe que se detallan en la Tabla 1:

Por tanto, se verifica que el modelo con mejor comportamiento estadístico durante los años 1984–2016 es MPI ESM1 GERMANIA que tiene un mejor Coeficiente Nash Sutcliffe, parámetro que nos permite verificar el ajuste de los caudales. Además, aunque tiene un menor Coef. R^2 en

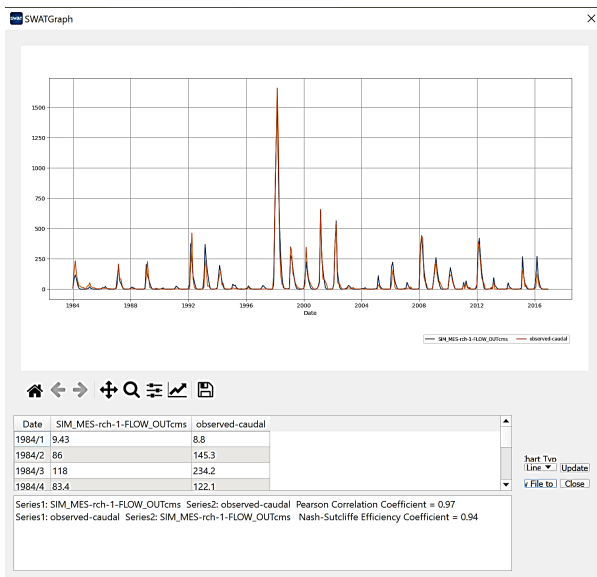


Figura 4: Comparación de caudales simulados en SWAT y los caudales registrados por el PECHP

Tabla 1: Valores de Coeficiente de Correlación de Pearson y Coeficiente Nash Sutcliffe obtenidos con los datos de los 14 GCM

Modelos	Coef. Correlación Pearson	Coef. Nash Sutcliffe
AACES (AUSTRALIA)	0,27	0,03
MPI ESM1 GERMANIA	0,33	0,07
MRI_ESM2 (JAPON)	0,21	-0,12
INM-CM5 (RUSIA)	0,42	-0,29
INM-CM4-8 (RUSIA)	0,12	-0,79
CNRM-CM6-1 (FRANCIA)	0,29	0,01
CMCC-ESM2 (ITALIA)	0,05	-0,44
CANESM5 (CANADA)	0,29	-0,01
MIROC6 (JAPON)	0,12	-0,15
MIROC-ES2L (JAPON)	0,13	-0,16
NESM3 (CHINA)	0,19	-0,01
EC-Earth3-Veg-LR (EUROPA)	0,22	0
EC-Earth3-CC (EUROPA)	0,31	0,06
CNRM-ESM2-1 (FRANCIA)	0,13	-0,16

comparación con el modelo INM-CM5, este parámetro tiene menor grado de influencia dado

que se usa sobre todo para datos meteorológicos o completar datos. Por tanto, el modelo GCM MPI ESM1 GERMANIA se tomará en cuenta para verificar los caudales del futuro inmediato (2022–2029) y del futuro intermedio, para lo cual se consideraron los rangos abarcados entre los años (2030–2060) y (2070–2100).

3.3. Valores de caudales de los 14 GCM

Respecto a los caudales simulados en el modelo hidrológico SWAT con los datos de los 14 GCM, se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 5, Figura 6, Figura 7 y Figura 8.

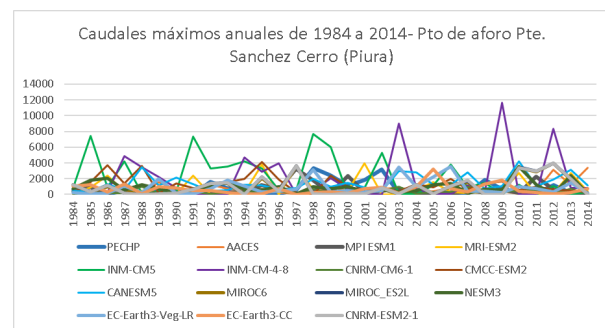


Figura 5: Comparación entre los registros históricos de caudales del PECH y los caudales simulados para cada GCM (1984–2014)

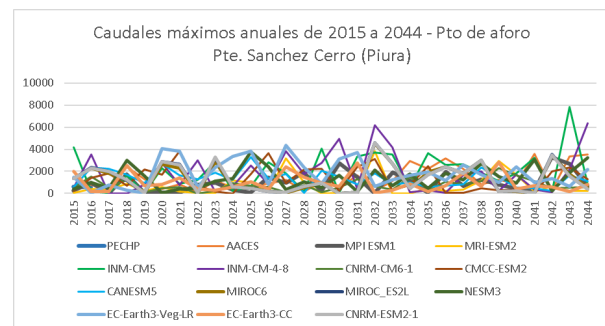


Figura 6: Comparación entre los registros históricos de caudales del PECH y los caudales simulados para cada GCM (2015–2044)

Como se mencionó anteriormente, el modelo climático global seleccionado para estimar los caudales futuros fue el MPI ESM1 GERMANIA. Al comparar los caudales observados del PECHP y los caudales simulados a partir de los datos de precipitación y temperatura del GCM mencionado,

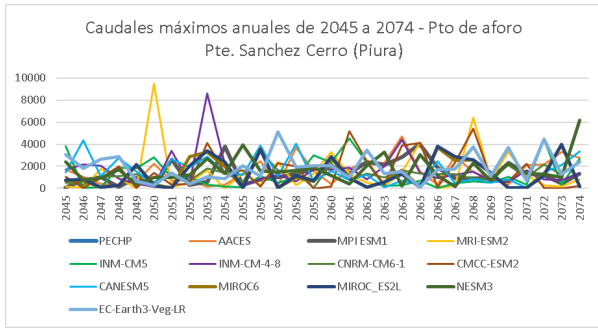


Figura 7: Comparación entre los registros históricos de caudales del PECH y los caudales simulados para cada GCM (2045–2074)

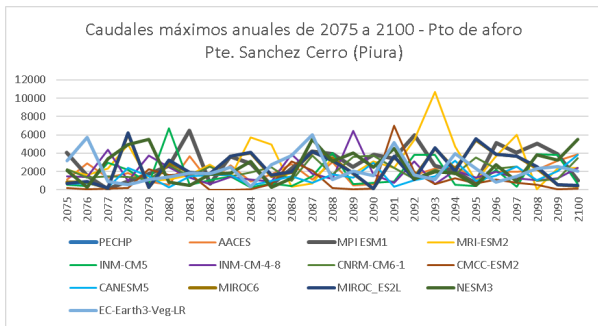


Figura 8: Comparación entre los registros históricos de caudales del PECH y los caudales simulados para cada GCM (2075–2100)

se observa en ambos casos una tendencia creciente de los caudales, pero no un crecimiento proporcional, sino que la línea de tendencia de los caudales proyectados refleja un crecimiento mayor a lo largo de los años, tal como lo muestra la Figura 9.

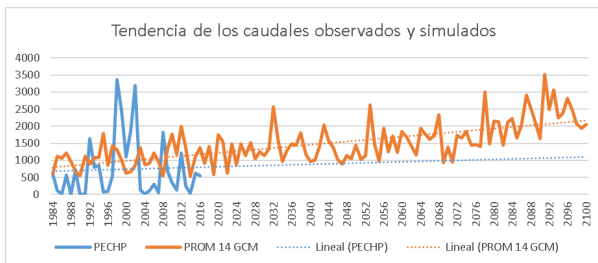


Figura 9: Comparación de los registros históricos de caudales del PECH con los simulados en SWAT y su comportamiento en el futuro intermedio (2030–2100)

Los resultados se analizaron en los rangos 2022–2029, 2030–2060 y 2070–2100. En el primer rango

se obtuvo un caudal máximo en el punto de aforo Pte. Sanchez Cerro de 1930 m³/s para el año 2028, mientras que en el segundo rango el caudal máximo obtenido fue de 3790 m³/s para el año 2054 y en el tercer rango de 6490 m³/s para el año 2081. Lo antes descrito se puede observar en la Figura 10, Figura 11 y Figura 12.

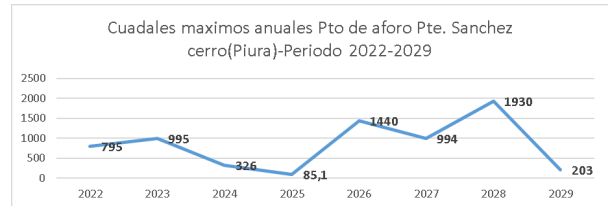


Figura 10: Caudales proyectados para el periodo 2022–2029 por efecto del cambio climático utilizando el modelo climático MPI ESM1 (Germania)

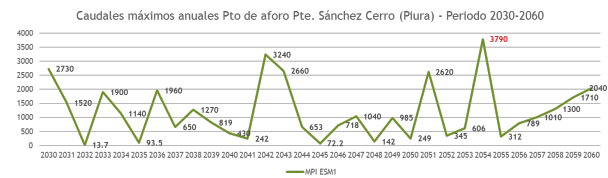


Figura 11: Caudales proyectados para el periodo 2030–2060 por efecto del cambio climático

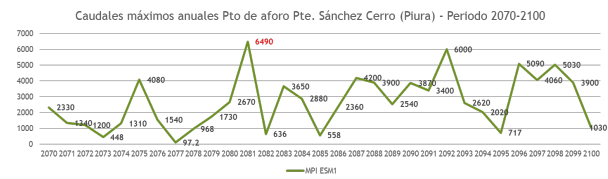


Figura 12: Caudales proyectados para el periodo 2030–2060 por efecto del cambio climático

Conclusiones

Indistintamente del GCM utilizado para obtener caudales futuros en los periodos 2030–2060 y 2070–2100, todos los modelos climáticos analizados marcan una clara tendencia a incrementar los caudales en el futuro debido al efecto del cambio climático.

Tal como se aprecia en la Figura 11 y Figura 12, existe la probabilidad que ocurran fenómenos parecidos al fenómeno del niño costero ocurrido

en el año 2017, en el que se produjo un caudal de $2754,5 \text{ m}^3/\text{s}$, asimismo fenómenos que superen el fenómeno del niño ocurrido en el año 1988 donde se produjo un caudal de $3367 \text{ m}^3/\text{s}$.

Con la data del GCM MPI ESM1 GERMANIA y utilizando el modelo hidrológico SWAT, se estima que en el periodo 2030–2060 se registrará un caudal máximo de $3790 \text{ m}^3/\text{s}$ y en el periodo 2070–2100 un caudal máximo de $6490 \text{ m}^3/\text{s}$, ambos en el punto de aforo Puente Sánchez Cerro.

Las proyecciones futuras realizadas considerando el efecto del cambio climático manifiestan que se registrarán caudales muy superiores a los permitidos, por lo que se producirá el inminente desborde del río en la zona en análisis, generando la inundación de la zona histórica del distrito de Piura (margen derecho) y la zona comercial del distrito de Castilla (margen izquierdo). Esto concuerda con otras investigaciones realizadas sobre el tema, donde por ejemplo se recalca que en la zona alta de Piura se evidenciaría un incremento de temperatura entre $0,2$ y 2°C hacia 2030 [19]. Asimismo, para el caso de las precipitaciones, resultados de estudios ya realizados afirman que éstas se incrementarían para la costa norte del Perú [20], por lo que al incrementar la temperatura y las precipitaciones, es coherente que los caudales futuros aumenten, como se ha demostrado en la presente investigación.

Con el caudal futuro calculado en el periodo 2030–2060 de $3790 \text{ m}^3/\text{s}$ se realizó la simulación hidráulica en el punto de aforo, verificándose el desborde en las zonas laterales del río Piura, generando inundaciones tal como se muestra en la Figura 13.

4. Recomendaciones

Es fundamental alertar a las autoridades locales y regionales competentes para que puedan evaluar el escenario crítico que se producirá en un futuro, y ello pueda influir en la toma de decisiones que se hagan en el presente, tales como medidas de adaptación, reubicación y/o expropiación de la población asentada a ambos márgenes del río Piura.

Asimismo, es importante gestionar y supervisar proyectos de construcción de defensas ribereñas (planeamiento, diseño y ejecución) tales como

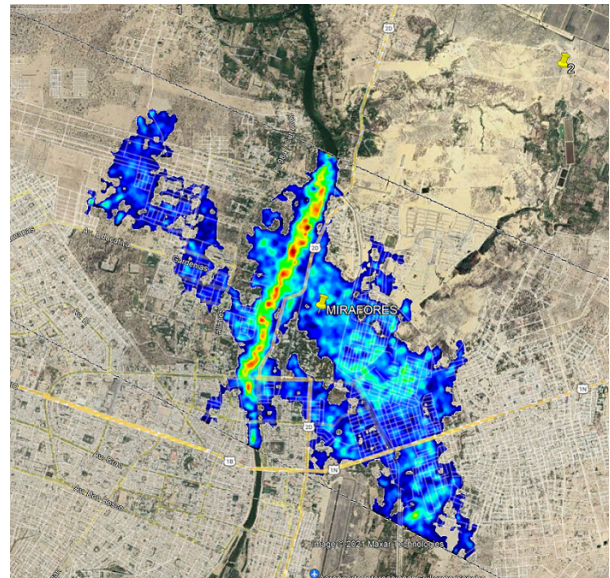


Figura 13: Simulación con el caudal de $3790 \text{ m}^3/\text{s}$ (caudal máx del periodo 2030–2060) en el punto de aforo Puente Sánchez Cerro

muros de contención, ensanchamiento de la sección hidráulica, etc. que protejan y aseguren la estabilidad de los terraplenes a ambos márgenes del río Piura en la zona de estudio, permitiendo así mitigar los daños que puedan ocasionar debido a una probable inundación fluvial.

Finalmente, se recomienda realizar una investigación más profunda y detallada de los efectos adversos generados por máximas avenidas en el futuro intermedio, no sólo en el área de estudio de la presente investigación, sino aguas arriba y aguas abajo, donde no sólo existe una gran cantidad de centros poblados asentados a la ribera del río, sino también extensas áreas de parcelas agrícolas, que se verían afectadas, o incluso podrían desaparecer.

5. Referencias

- [1] A. Rocha, “La costa norte peruana y su vulnerabilidad frente al Fenómeno de El Niño,” *Revista Técnica del Capítulo de Ingeniería Civil del Colegio de Ingenieros del Perú*, vol. 8, no. 29, 2006.
- [2] N. Andres, F. Vegas, W. Lavado, and M. Zappa, “Water resources and climate change impact modelling on a daily time scale in the Peruvian Andes,” *Hydrological Sciences Journal*, vol. 59, no. 11, pp. 2043–2059, 2014. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.862336>
- [3] F. Su, Y. Hong, and D. Lettenmaier, “Evaluation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA)

- and its utility in hydrologic prediction in the La Plata Basin,” *Journal of Hydrometeorology*, vol. 9, no. 4, pp. 622–640, 2008. <https://doi.org/10.1175/2007JHM944.1>
- [4] IPCC, “Cambio Climático 2014: informe de síntesis,” Contribución de los Grupos I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo de Expertos sobre el Cambio Climático,” IPCC, Ginebra, Suiza, Informe técnico, 2014.
- [5] T. Barker, “Climate Change 2007”: An Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change,” IPCC, Geneva, Switzerland, Tech report, 2007.
- [6] S. Ardoin-Bardin, A. Dezetter, E. Servat, J. Paturel, G. Mahé, H. Niel, and C. Dieulin, “Using general circulation model outputs to assess impacts of climate change on runoff for large hydrological catchments in West Africa,” *Hydrological Sciences Journal*, vol. 54, no. 1, pp. 77–89, 2009. <https://doi.org/10.1623/hysj.54.1.77>
- [7] A. Moya, J. Ortega, and X. Jurado, “Evaluación del Modelo Climático Global MIROC5 y estimaciones de temperatura y precipitaciones para las zonas sur y norte del Perú,” *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, vol. 5, no. 2, pp. 8–15, 2015. <https://doi.org/10.18259/acs.2015028>
- [8] P. Burlando and R. Rosso, “Effects of transient climate change on basin hydrology. 1. Precipitation scenarios for the Arno River, central Italy,” *Hydrological Processes*, vol. 16, no. 6, pp. 1151–1175, 2002. <https://doi.org/10.1002/hyp.1055>
- [9] P. Burlando and R. Rosso, “Effects of transient climate change on basin hydrology. 2. Impacts on runoff variability in the Arno River, central Italy,” *Hydrological Processes*, vol. 16, no. 6, pp. 1177–1199, 2002. <https://doi.org/10.1002/hyp.1056>
- [10] K. L. Denman, G. Brasseur, A. Chidthaisong, P. Ciais, P. M. Cox, R. E. Dickinson, D. Hauglustaine, C. Heinze, E. Holland, D. Jacob, U. Lohmann, S. Ramachandran, P. L. da Silva Dias, S. C. Wofsy, and X. Zhang, “Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry,” in *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, and H. Miller, Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [11] K. McGuffie and A. Henderson-Sellers, *A Climate Modelling Primer*, 3rd ed. Chichester: Wiley J, Sons, editors, 2005.
- [12] A. Dai, “Precipitation characteristics in eighteen coupled climate models,” *Journal of Climate*, vol. 19, no. 18, pp. 4605–4630, 2006. <https://doi.org/10.1175/JCLI3884.1>
- [13] D. A. Randall, R. A. Wood, S. Bony, R. Colman, T. Fiechfet, J. Fyfe, V. Kattsov, A. Pitman, J. Shukla, J. Srinivasan, R. J. Stouffer, A. Sumi, and K. E. Taylor, “Climate Models and Their Evaluation,” in *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, and H. Miller, Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [14] G. R. de Piura-ANA-GTZ/PDRS, *Proceso de elaboración del plan de gestión de la cuenca del río Piura – Aspectos metodológicos*, Folleto 2, 1ra. Ed. ed. Lima, Perú: Editorial y Gráfica EBRA E.I.R.L., 2009.
- [15] C. Aybar, W. Lavado, A. Huerta, C. Fernández, F. Vega, E. Sabino, and O. Felipe, “Uso del Producto Grillado PISCO de precipitación en Estudios, Investigaciones y Sistemas Operacionales de Monitoreo y Pronóstico Hidrometeorológico,” SENAMHI, Lima-Perú, Nota Técnica 001 SENAMHI-DHI-2017, 2017.
- [16] J. Arnold and N. Fohrer, “SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling,” *Hydrological Processes Journal*, vol. 19, no. 3, pp. 563–572, 2005. <https://doi.org/10.1002/hyp.5611>
- [17] K. Abbaspour, E. Rouholahnejad, S. Vaghefi, R. Srinivasan, H. Yang, and B. Kløve, “A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model,” *Journal of Hydrology*, vol. 524, pp. 733–752, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>
- [18] S. N. de Meteorología e Hidrología, “Escenarios climáticos en el Perú para el año 2030,” SENAMHI, Centro de Predicción Numérica, Lima, Informe técnico, 2009.
- [19] M. del Ambiente del Perú, “Segunda Comunicación Nacional del Perú a la Convención de Naciones Unidas sobre Cambio Climático,” MINAM, Consejo Nacional del Ambiente, Lima, Informe técnico, 2010.
- [20] S. S. Moradkhani, H., “General Review of Rainfall-Runoff Modeling: Model Calibration, Data Assimilation, and Uncertainty Analysis,” in *Hydrological Modelling and the Water Cycle. Water Science and Technology Library*, S. Sorooshian, K. Hsu, E. Coppola, B. Tomassetti, M. Verdecchia, and G. Visconti, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009.

Microbiological activity as a quality indicator in sandy soils on beaches in Puerto Cabello municipality, Carabobo state

Joselin Albuja^{*a} , Arnaldo Armado^b 

^a Laboratorio de Investigaciones Bioquímicas, Suelos y Ambiente (LIBSA). Centro de Investigación y Extensión en Ambiente, Biología y Química (AMBIOQUIM), Facultad de Ciencias de la Educación, Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.

^b Laboratorio de Investigaciones Bioquímicas, Suelos y Ambiente (LIBSA). Centro de Investigación y Extensión en Ambiente, Biología y Química (AMBIOQUIM), Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.



<https://doi.org/10.54139/revinguc.v29i2.177>

Abstract.- Coastal ecosystems are affected by degradation processes due to various anthropogenic activities. It is necessary to evaluate these degradation processes to establish cause-effect relationships that allow the development of methods for restoration, maintenance and improvement of soil quality in these ecosystems. Microbiological activity is one of the parameters most affected by anthropogenic activity. For this reason, the objective was to evaluate the microbiological activity and microbial biomass, as well as physicochemical parameters in soils from El Palito, Waikiki and Blanca beaches from the Puerto Cabello municipality, Carabobo state. Microbiological activity was estimated through the determination of basal respiration (RB) and biomass carbon (Cbiomass) by the fumigation-incubation method. The microbiological parameters were sensitive to seasonal changes and constitute the two variables that define the system, with 99 % variance, according to the principal component analysis. Both RB and Cbiomass were negatively correlated with pH, while Cbiomass was positively correlated with organic matter and RB. Finally, it is concluded that the evaluated indicators are sensitive to changes in the dynamics of sandy soils in the study area.

Keywords: environmental pollution; microbial biomass; respiration; sandy soils.

Actividad microbiológica como indicador de calidad en suelos arenosos de playas del municipio Puerto Cabello, estado Carabobo

Resumen.- Los ecosistemas costeros son afectados por procesos de degradación debido a diversas actividades antropogénicas. Se hace necesario evaluar estos procesos degradativos para establecer relaciones causa-efecto que permitan desarrollar métodos de restauración, mantenimiento y mejora de la calidad del suelo en dichos ecosistemas. La actividad microbiológica es uno de los parámetros más afectados por la actividad antropogénica. Por esta razón, se planteó como objetivo evaluar la actividad microbiológica y biomasa microbiana, además de parámetros fisicoquímicos en suelos de las playas El Palito, Waikiki y Blanca del municipio Puerto Cabello, estado Carabobo. La actividad microbiológica se estimó a través de la determinación de la respiración basal (RB) y el carbono de la biomasa (Cbiomasa) por el método de fumigación-incubación. Los parámetros microbiológicos resultaron sensibles a los cambios estacionales y constituyen las dos variables que definen el sistema, con un 99 % de varianza, según el análisis de componentes principales. Tanto la RB como el Cbiomasa se correlacionaron negativamente con el pH, mientras que el Cbiomasa se correlacionó positivamente con la materia orgánica y la RB. Finalmente, se concluye que los indicadores evaluados son sensibles a los cambios en la dinámica de los suelos arenosos en el área de estudio.

Palabras clave: contaminación ambiental; biomasa microbiana; respiración; ecosistemas costeros.

Recibido: 13 de septiembre, 2022.

Aceptado: 31 de octubre, 2022.

1. Introducción

La zona costera se considera una región amplia y heterogénea que mantienen interacciones físicas, químicas y biológicas, donde ocurren intercambios dinámicos de energía y materiales entre ecosistemas terrestres, marinos y la atmósfera. Por tanto, la conservación de los elementos bióticos y abióticos

* Autor para correspondencia:

Correo-e: jalbuja@uc.edu.ve (J. Albuja)

es un aspecto fundamental para la continuidad de los servicios ecosistémicos que proporcionan estos ambientes [1]. Dentro de estos servicios se tienen los de provisión de insumos alimenticios, los servicios de regulación, ayudando a mantener el equilibrio ecológico perseverando la calidad del agua y el secuestro de carbono y los de apoyo que incluyen procesos como los ciclos de nutrientes, entre otros [2].

La mayoría de estos procesos se desarrollan en los suelos de estos ecosistemas y al igual que con suelos destinados a usos agrícolas, están experimentando una presión antropogénica muy grande; sin embargo, los arenales, que son un orden de suelo característico de los ecosistemas de playas y dunas costeras, han sido poco estudiados [3]. Estas zonas reciben cada vez más, una variedad de impactos negativos como la contaminación producto de actividades industriales, explotación de especies costeras y actividades turísticas y recreativas, por lo que es necesario evaluar su calidad ambiental.

La calidad de un suelo incluye componentes intrínsecos, determinados por las propiedades físicas, químicas y biológicas dentro de los límites establecidos por el clima y los ecosistemas; asimismo, está condicionada por un componente externo de índole antrópico [4]. Este constructo tiene un carácter funcional e incluye variables, conocidas como indicadores de calidad del suelo, que ofrecen información sobre las propiedades, procesos y características del suelo así como también sobre su funcionalidad con respecto al ambiente. Estas variables son consideradas herramientas de medición que indican si la calidad de un suelo mejora, permanece constante o disminuye [5]. Actualmente, se han dirigido esfuerzos hacia la búsqueda de indicadores adecuados para funciones diferentes a la productividad agrícola; dentro de este grupo, los parámetros de tipo biológico, representan una gran ventaja, debido a que ofrecen señales tempranas de los cambios que sufren los suelos por la intervención antrópica [6].

En este sentido, se considera a las propiedades bioquímicas del suelo indicadores de cambios en los procesos edáficos, debido a su sensibilidad y su relación con la actividad microbiana y los

procesos de mineralización de la materia orgánica [7]. La actividad microbiana se desarrolla según factores intrínsecos y extrínsecos al suelo, por lo que constituye un indicador de las condiciones fisicoquímicas que permiten el desarrollo de los procesos metabólicos de bacterias, hongos, algas y actinomicetos y su acción sobre los sustratos [5].

Algunos de los indicadores de uso frecuente son la respiración y el carbono de la biomasa microbiana. La respiración, evaluada a través de la producción de CO₂, refleja directamente la actividad microbiana e indirectamente la disponibilidad de sustrato. En el caso del carbono de la biomasa microbiana, este se considera relevante debido a que constituye una fracción del carbono total, es reservorio de nutrientes y es más lábil que la materia orgánica [8]. La respiración microbiana refleja las pérdidas de carbono del suelo por acción de la biota edáfica [9], cuando estas pérdidas son excesivas pueden generar reducciones en la biomasa microbiana y en la materia orgánica del suelo. La biomasa microbiana cuantifica la cantidad global de microorganismos presentes en un suelo [10]. Se considera la parte de la materia orgánica del suelo que constituye microorganismos vivos menores de 5-10 m³ [11].

En el caso específico del municipio Puerto Cabello, en el estado Carabobo se encuentran industrias como refinerías cercanas a playas arenosas que impactan de manera negativa, tanto el ecosistema marino, como el terrestre. El incremento de estas actividades pueden modificar los procesos bioquímicos naturales y el funcionamiento de ecosistemas muy productivos, debido a que sus residuos pueden contener gran cantidad de metales y otras sustancias contaminantes que ocasionarían cambios notables en la calidad del sedimento superficial [12]. Dependiendo de las condiciones hidrodinámicas de las playas arenosas, este tipo de contaminantes puede tener un gran impacto en los organismos acuáticos, ya que tienden a bioacumularse a través de las cadenas tróficas. Estas especies tienden a disminuir la biomasa microbiana en el suelo, ya que propician condiciones de estrés en los microorganismos lo que implica un gasto energético adicional que involucra disminución del sustrato disponible,

afectando las funciones y estructura del suelo y los ciclos de nutrientes [13].

En tal sentido, se hace necesaria la evaluación de los procesos de degradación a los que están siendo sometidos estos ecosistemas a fin de establecer las relaciones causa-efecto que permitan desarrollar métodos para la restauración, mantenimiento e incremento de la calidad del suelo. Esto es de particular relevancia para los objetivos del desarrollo sostenible que la comunidad internacional se ha comprometido a alcanzar y que solo es posible si los recursos naturales, como el suelo, son gestionados de forma razonable [14]. Por todo lo antes expuesto, es de gran importancia el estudio de parámetros que puedan ser utilizados como indicadores ambientales en la determinación de la calidad de suelos arenosos característicos de ecosistemas costeros. En esta investigación se planteó el estudio de la actividad microbiológica en suelos arenosos del municipio Puerto Cabello del estado Carabobo como posible indicador ambiental. Resultados parciales de esta investigación fueron presentados en la Conferencia LatinXChem 2021 [15].

2. Metodología

Se seleccionaron tres playas para el estudio: Playa El Palito (EP), Playa Waikiki (W) y Playa Blanca (PB), ubicadas en el municipio Puerto Cabello, estado Carabobo (Figura 1).

En cada playa se tomaron cuatro unidades de muestreo, distribuidas en función de las zonas de la playa. Dos unidades en el área correspondiente a la duna, denominada zona seca (S) y dos en la intermareal, señalada como zona húmeda (H). En cada unidad de muestreo se tomaron 10 submuestras simples superficiales (0-20 cm) y 10 submuestras subsuperficiales (20-40 cm) para obtener las muestras compuestas. Las muestras se tomaron en julio 2019 en la estación lluviosa y en marzo 2020 en estación seca. Las coordenadas de las unidades de muestreo se presentan en la Tabla 1.

Se tomó una alícuota de 500 g de cada muestra y se almacenaron en bolsas plásticas a 4 °C para la evaluación de las propiedades microbiológicas. El resto de las muestras fueron

secadas al aire a temperatura ambiente para los análisis de parámetros fisicoquímicos. La textura se estimó a través del método descrito por Bouyoucos [16], el pH y la conductividad se determinaron en un extracto acuoso en proporción 1:2 (m/v), la retención y el contenido de humedad se estimaron gravimétricamente. La materia orgánica se determinó por el método escrito por Cargua [17] y el carbono orgánico total (COT) se determinó mediante oxidación húmeda con H₂SO₄ concentrado y K₂Cr₂O₇ 2N y el Cr (III) se midió espectrofotométricamente a 600 nm. La respiración basal se determinó utilizando el método de incubaciones estáticas, referenciado por Pardo [18] y la biomasa microbiana se evaluó empleando la metodología de fumigación con cloroformo y posterior incubación, propuesta por Brookes [19].

Para el análisis estadístico se utilizó el software libre PAST 3.24 donde se verificaron los supuestos de normalidad y se realizó una comparación de medias a través del estadístico prueba Tukey, con un nivel de confianza del 95 %, entre las unidades de muestreo evaluadas. Se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) para establecer las variables representativas en las zonas estudiadas y un análisis de correlaciones de Pearson a fin de estudiar las relaciones entre los indicadores seleccionados para el estudio.

3. Análisis y Discusión de Resultados

En las Tablas 2 y 3 se muestran los resultados obtenidos de los parámetros fisicoquímicos determinados para los suelos en estudio.

En los resultados obtenidos se refleja que el porcentaje de arena varía entre 89 y 91 %; mientras que el de arcilla varía entre 8,7 y 10 % (Tabla 2 y Tabla 3). Esto permite clasificar los suelos como Arenosoles [20]. La variación textural a lo largo de todas las zonas señala una ligera tendencia a disminuir el tamaño de grano desde la playa (zona seca) hacia la zona intermareal, tal como lo describe Bunicontro [21]. Esta diversificación en los tamaños influye en gran medida en las propiedades fisicoquímicas de estos suelos como aireación, movimiento del agua,



Figura 1: Ubicación de las playas El Palito, Waikiki y Blanca del municipio Puerto Cabello, estado Carabobo. Fuente: Google Maps.

Tabla 1: Ubicación de unidades de muestreo en las playas El Palito, Waikiki y Blanca del municipio Puerto Cabello, estado Carabobo

Unidad de muestreo	Coordenadas	
	Estación lluviosa	Estación seca
EPS	Lat 10,480057 N 10°28'48,204 12'' Long -68,106778 W 68°6'24,401 88''	Lat 10,480100 N 10°28'48,36'' Long -68,107373 W 68°6'26,291 88''
	Lat 10,481915 N 10°28'54,894'' Long -68,111495 W 68°6'41,382''	Lat 10,482212 N 10°28'55,962 12'' Long -68,112018 W 68°6'43,265 88''
EPH	Lat 10,480179 N 10°28'24,8779'' Long -68,106853 W 68°6'24,8238''	Lat 10,480276 N 10°28'48,9918'' Long -68,107255 W 68°6'26,118''
	Lat 10,482082 N 10°28'55,4912'' Long -68,111370 W 68°6'40,932''	Lat 10,482207 N 10°28'55,944 12'' Long -68,111647 W 68°6'41,928 12''
WS	Lat 10,482413 N 10°28'56,687 88'' Long -68,038520 W 68°2'18,672''	Lat 10,482021 N 10°28'55,276 68'' Long -68,037872 W 68°2'16,337 76''
	Lat 10,483362 N 10°29'0,102 12'' Long -68,039805 W 68°2'23,297 64''	Lat 10,483530 N 10°29'0,708'' Long -68,039895 W 68°2'23,622''
WH	Lat 10,482387 N 10°28'56,592 12'' Long -68,038443 W 68°2'18,395 88''	Lat 10,482053 N 10°28'55,391 88'' Long -68,037822 W 68°2'16,158 12''
	Lat 10,483477 N 10°29'0,516 12'' Long -68,039822 W 68°2'23,358 12''	Lat 10,483550 N 10°29'0,78'' Long -68,040028 W 68°2'24,101 88''
PBS	Lat 10,473664 N 10°28'25,189 32'' Long -68,017637 W 68°1'3,494 64''	Lat 10,477441 N 10°28'38,788 68'' Long -68,010303 W 68°0'37,091 88''
PBH	Lat 10,473838 N 10°28'25,8178'' Long -68,017490 W 68°1'2,964''	Lat 10,473891 N 10°28'26,006 52'' Long -68,018205 W 68°1'5,538 72''

retención de humedad, retención y liberación de iones, disponibilidad de nutrientes y productividad.

Los valores de pH obtenidos varían en un rango entre 7,5 y 8,9; lo cual indica que los suelos evaluados se clasifican como alcalinos. La alcalinidad de suelos con las características de las playas arenosas puede atribuirse a factores como una evotranspiración potencial mayor que la precipitación lo que genera un déficit de agua que disminuye la remoción de bases; de igual

forma, a fuentes antropogénicas de contaminantes inorgánicos, entre otros.

En cuanto a la conductividad, su determinación en extractos de suelos permite estimar su contenido de sales, observándose una variación desde 0,2 hasta 7,4 mS. La salinidad, entre otros factores, hacen que el suelo pueda resultar un medio desfavorable para la mayoría de los microorganismos, especialmente, los nitrificadores [22]. Este parámetro influye en parámetros

Tabla 2: Parámetros fisicoquímicos de suelos arenosos de las playas El Palito, Waikiki y Blanca del municipio Puerto Cabello, estado Carabobo, estación lluviosa

	Zona seca			Zona húmeda		
	EP	W	PB	EP	W	PB
A (%)	91,28 ± 0,10	89,90 ± 0,00	90,00 ± 0,47	91,20 ± 0,83	90,90 ± 0,87	89,95 ± 0,21
Ar (%)	8,73 ± 0,10	10,20 ± 0,00	10,0 ± 0,47	8,83 ± 0,82	8,73 ± 0,10	10,05 ± 0,21
pH	8,49 ^a ± 0,17	8,94 ^b ± 0,19	7,58 ^c ± 0,02	8,38 ^a ± 0,27	7,96 ^a ± 0,32	8,27 ^a ± 0,21
Cond (mS)	0,92 ^a ± 0,80	0,30 ^a ± 0,18	0,26 ^a ± 0,10	7,47 ^b ± 0,78	4,99 ^b ± 3,28	6,66 ^b ± 0,45
RH (%)	29,16 ^a ± 1,51	22,77 ^b ± 1,80	24,78 ^a ± 0,23	26,85 ^a ± 1,16	26,29 ^a ± 0,42	25,15 ^a ± 0,08
CH (%)	3,76 ^a ± 1,69	2,90 ^a ± 0,93	2,10 ^a ± 2,02	22,23 ^b ± 1,41	13,69 ^c ± 7,65	17,50 ^b ± 1,34
MO (%)	0,18 ^a ± 0,03	0,17 ^a ± 0,09	0,09 ± 0,03	0,25 ^a ± 0,02	0,15 ^a ± 0,02	0,23 ^a ± 0,08
COT (gC/kg ss)	0,83 ± 0,73	0,31 ± 0,06	0,37 ± 0,26	0,39 ± 0,19	0,55 ± 0,13	0,67 ± 0,07

EP: Playa El Palito; W: Playa Waikiki; PB: Playa Blanca; A: Arena; Ar: Arcilla; Cond: Conductividad; RH: Retención de humedad; CH: Contenido de humedad; MO: Materia orgánica; COT: Carbono orgánico total. Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas entre los sistemas (Prueba Tukey, $P < 0,05$)

Tabla 3: Parámetros fisicoquímicos de suelos arenosos de las playas El Palito, Waikiki y Blanca del municipio Puerto Cabello, estado Carabobo, estación seca

	Zona seca			Zona húmeda		
	EP	W	PB	EP	W	PB
A (%)	90,63 ± 0,96	90,08 ± 0,43	89,95 ± 0,07	90,48 ± 1,23	90,20 ± 0,82	90,0 ± 0,14
Ar (%)	9,38 ± 0,96	9,95 ± 0,38	10,05 ± 0,07	9,55 ± 1,18	9,03 ± 0,66	10,0 ± 0,14
pH	7,88 ^c ± 0,07	8,10 ^a ± 0,11	8,02 ^a ± 0,01	7,76 ^c ± 0,04	7,76 ^c ± 0,04	7,74 ^c ± 0,03
Cond (mS)	2,39 ^a ± 0,34	1,57 ^a ± 0,30	1,26 ^a ± 0,34	6,56 ^b ± 1,47	5,04 ^b ± 0,60	4,31 ^a ± 1,55
RH (%)	30,95 ^c ± 4,94	24,43 ^a ± 0,52	23,27 ^a ± 2,36	30,28 ^c ± 0,92	24,64 ^a ± 1,78	23,56 ^a ± 0,75
CH (%)	4,44 ^a ± 2,42	1,58 ^a ± 0,33	1,20 ^a ± 0,44	20,27 ^b ± 3,03	13,39 ^c ± 4,59	16,53 ^b ± 1,61
MO (%)	0,28 ^a ± 0,05	0,14 ^a ± 0,02	0,13 ^a ± 0,02	0,40 ^b ± 0,04	0,23 ^a ± 0,05	0,26 ^a ± 0,03
COT (gC/kg ss)	0,82 ± 0,29	0,29 ± 0,24	0,20 ± 0,01	0,77 ± 0,11	0,30 ± 0,15	0,56 ± 0,02

EP: Playa El Palito; W: Playa Waikiki; PB: Playa Blanca; A: Arena; Ar: Arcilla; Cond: Conductividad; RH: Retención de humedad; CH: Contenido de humedad; MO: Materia orgánica; COT: Carbono orgánico total. Letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas entre los sistemas (Prueba Tukey, $P < 0,05$)

biológicos como el carbono microbiano [23]. En el caso de estudio, se observó que la conductividad fue más alta en las zonas húmedas, donde la mayor contribución de sales proviene del agua de mar.

Los valores de retención de humedad evidencian variaciones desde 22,7 a 30,95 % (Tabla 2 y Tabla 3). La capacidad de retención de agua por el suelo depende de las fuerzas que se desarrollan en este y dependen de factores como el tamaño de las partículas y la porosidad. El tamaño de los poros está definido por la estructura y textura del suelo; poros grandes se asocian a texturas gruesas y los pequeños a texturas finas. A menor tamaño del poro, mayor es la fuerza con la que es retenida el agua. En este caso, la retención del agua es baja. Con respecto al contenido de humedad de los suelos estudiados, varía de 1,2 a 4,4 % en las zonas secas, mientras que en las húmedas va de 13,39 a 22,27 %. La cantidad de agua que posee el suelo está determinada por su textura, el contenido

de materia orgánica, la composición de la fracción mineral y la orgánica y el arreglo que presente el medio físico edáfico, por el aporte natural (lluvia y mar) o artificialmente (riego) de ella, así como por el consumo causado por la evapotranspiración. En este caso, los valores obtenidos son bajos, lo que concuerda con las condiciones climáticas e hidrodinámicas características de las playas.

La materia orgánica es un parámetro que tiene efectos importantes sobre las propiedades físicas químicas y biológicas del suelo. En los suelos evaluados se observó una variación de 0,09 a 0,4 %. En este tipo de suelos, el contenido de materia orgánica tiende a ser bajo, lo que es característico de suelos arenosos. La materia orgánica, en todas sus diferentes formas, tiene efectos marcados en casi todas las propiedades del suelo, regula los procesos químicos que allí ocurren, influye sobre las características físicas y es el centro de todas las actividades biológicas, incluyendo las

de la microflora, las de la fauna y hasta las del sistema de raíces de plantas superiores. El carbono orgánico total varió de 0,2 a 0,8 gC/kgss. Estos resultados son bastante bajos, lo que indica que la disponibilidad de este elemento como nutriente está limitada.

4. Actividad microbiológica

La actividad microbiológica se determinó a través de la respiración basal (RB). De acuerdo con los resultados obtenidos (Figura 2), este parámetro varió de 33,63 a 125,60 mgC – CO₂/kg en la estación lluviosa y de 185,31 a 250,12 mg C – CO₂/kg en la estación seca. Se observan diferencias significativas ($p < 0,05$) en los distintos puntos de muestreo entre playas en la estación lluviosa, mientras que en la estación seca no se observan diferencias significativas entre las zonas evaluadas. Al comparar la respiración basal en las estaciones en las que se realizó el muestreo, se observa que esta es mayor en la estación seca. Estos resultados concuerdan con lo descrito por Cui [24], que establece que la reducción del contenido de agua en el suelo, producto de sequías, aumenta el contenido de O₂ en el suelo, aumentando así la tasa de descomposición de la materia orgánica y la liberación de CO₂. Liu [25] también encontró una disminución en la respiración edáfica en los períodos lluviosos debido a la limitación de la aireación del suelo que conlleva a la reducción de la concentración del oxígeno disuelto. En la estación lluviosa, un suelo saturado puede producir condiciones anóxicas restringiendo la respiración del suelo [26].

Las diferencias observadas entre las zonas secas y húmedas se asocian a las condiciones a las que están sometidas cada una. En el caso de la zona intermareal, esta franja está expuesta a condiciones hidrodinámicas características de cada playa, lo que condiciona la biodiversidad allí existente, a diferencia de la zona seca (espacio hacia tierra), en la que la afectación es principalmente la actividad antropogénica de tipo turístico y las condiciones eólicas de la zona. Tanto en playa El Palito como en Waikiki no se observan diferencias significativas entre las zonas seca y húmeda, mientras que

en Playa Blanca se evidencia el comportamiento contrario. Esto puede asociarse a que la zona húmeda de esta playa en la estación lluviosa tiene un mayor contenido de materia orgánica con respecto a la zona seca, lo que promueve una mayor disponibilidad de sustrato para ser mineralizado.

5. Carbono de biomasa microbiana (C biomasa)

El carbono de la biomasa microbiana se cuantificó a través del método de fumigación-incubación. Este método se basa en la ruptura de la membrana celular por un biocida, siendo el cloroformo uno de los más utilizados debido a que no solubiliza la materia orgánica no microbiana del suelo y la vuelve susceptible a descomposición [27].

Los resultados obtenidos para el carbono de la biomasa microbiana (Figura 3) en la estación varían de 53,16 a 209,75 mgCbiomasa/kgss en la estación lluviosa, mientras que en la estación seca varía desde 546,42 hasta 818,53 mgCbiomasa/kgss. En este caso, no se observó diferencia significativa entre las distintas unidades de muestreo en la estación lluviosa; sin embargo, en la estación seca se observaron diferencias significativas entre las zonas intermareales de playa El Palito y Waikiki con respecto a las otras zonas evaluadas.

El comportamiento evidenciado es similar al de la actividad microbiológica, reflejándose valores más altos en la estación seca que en la lluviosa. Al disminuir las precipitaciones, también lo hace el arrastre de material al mar y hay mayor disponibilidad de sustrato para los microorganismos, lo que aumenta la biomasa microbiana presente en estos suelos. El crecimiento microbiano producto del acceso a compuestos orgánicos depende de la mayor disponibilidad de carbono en el suelo [28]. La disminución de la biomasa microbiana luego de períodos de lluvia está asociada a posibles limitaciones de sustrato disponible o a cambios en la estructura de las comunidades microbianas [29].

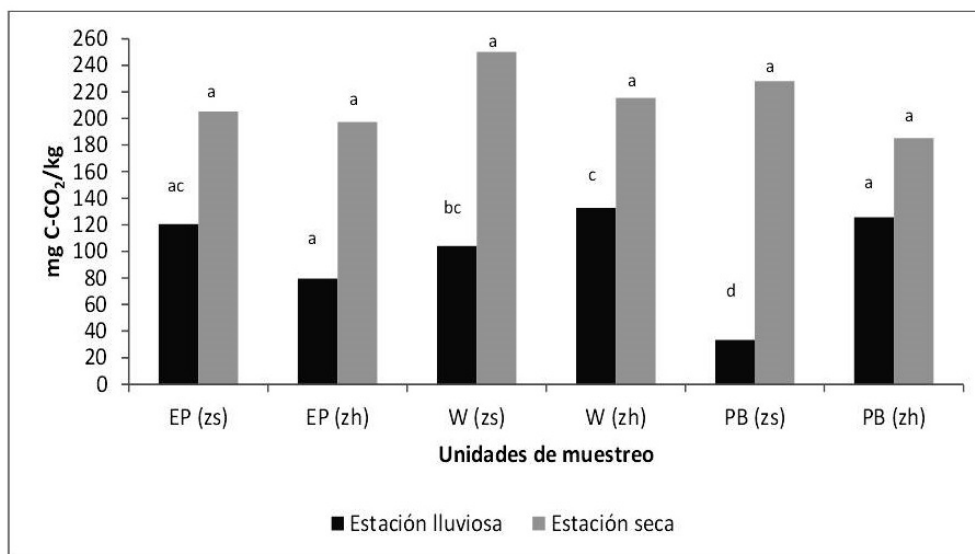


Figura 2: Respiración basal en las playas El Palito, Waikiki y Blanca del municipio Puerto Cabello, estado Carabobo

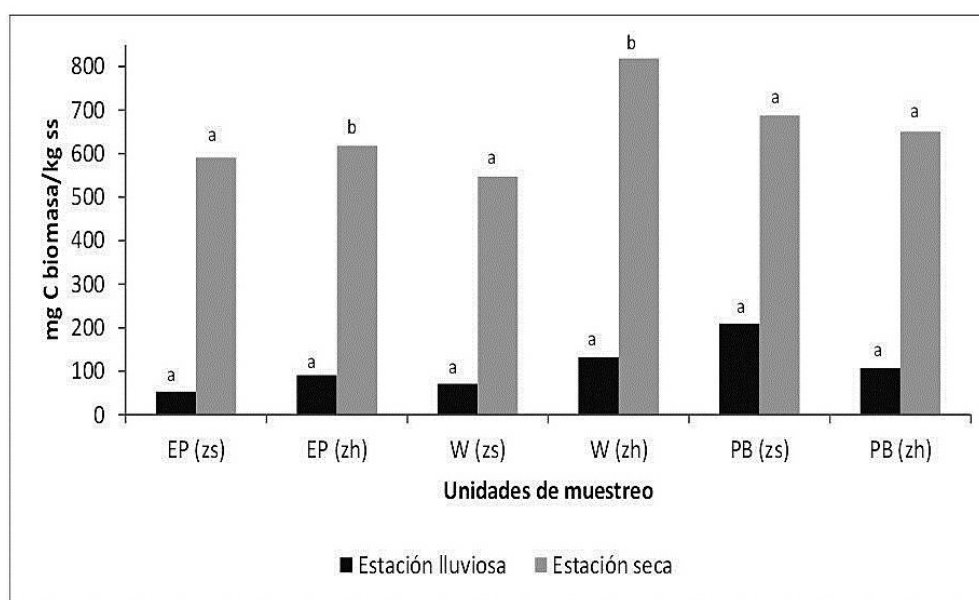


Figura 3: Biomasa microbiana determinada por el método de Fumigación-Incubación en las playas El Palito, Waikiki y Blanca del municipio Puerto Cabello, estado Carabobo

6. Análisis de componentes principales (ACP)

Para disminuir la dimensionalidad de los datos, determinar si existen agrupamientos y encontrar variables que resuman la información [4] se realizó un análisis de componentes principales (Figura 4). De allí se obtuvieron dos componentes que representan más del 99 % de la varianza total de los datos. La contribución relativa de

cada parámetro (Tabla 4) evidencia valores muy bajos para las variables analizadas, excepto para el carbono de la biomasa microbiana en el CP1 (>0,9 %) y para la respiración del suelo en el CP2 (>0,9 %). Esto indica que los parámetros asociados a la actividad microbiológica pueden representar en gran medida la calidad de los suelos arenosos estudiados. La distribución mostrada en la Figura 4

refleja que las unidades de muestreo analizadas se diferencian según la estacionalidad, CP1 con la estación seca y CP2 con la lluviosa, y no según la playa, por lo que es posible inferir que las variables que describen los componentes principales 1 y 2 no tienen carácter de especificidad con respecto a las zonas evaluadas. Por tanto, pueden integrarse en un índice de calidad ambiental en suelos arenosos de modo general.

Tabla 4: Coeficientes asociados a los parámetros evaluados en el Análisis de Componentes Principales de las distintas unidades de muestreo de los suelos arenosos de las playas El Palito, Waikiki y Blanca del municipio Puerto Cabello, estado Carabobo

Parámetro	CP1	CP2
A (%)	-0,00059955	0,0019534
Ar (%)	0,00051913	-0,0024418
pH	-0,00057608	-0,0014208
Conductividad (mS)	0,0016683	-0,0021728
RH (%)	0,0010711	0,0055766
CH (%)	0,0031004	-0,013664
MO (%)	0,000091557	0,00018252
COT (gC/kg ss)	-0,000013436	0,000040452
RB (mg C-CO ₂ /kg)	0,11205	0,99359
Cbiomasa (mg C biomasa/kg ss)	0,9937	-0,112

7. Correlación entre parámetros fisicoquímicos y microbiológicos

Con el fin de estudiar las relaciones entre las variables analizadas se realizó un análisis de correlación de Pearson (Tabla 5), donde se evidenció que tanto la respiración basal como el carbono de la biomasa se correlacionan de manera negativa con el pH del suelo. Es decir, que valores de pH altos disminuyen la respuesta de estos parámetros. En los suelos evaluados el pH es superior a 7,5 unidades, por lo que es posible indicar que a valores menores se favorecería la actividad microbiológica en las zonas de estudio, tomando en cuenta que el pH del suelo puede regular la actividad de las comunidades microbianas a través de la mineralización del carbono [30]. El pH del suelo también afecta la actividad de enzimas extracelulares, la reactividad de la materia orgánica

y la homeostasis del pH intracelular, por lo que las fluctuaciones de pH influyen significativamente en el crecimiento microbiano y la actividad metabólica [31]. También se evidencia una relación positiva entre el carbono de la biomasa microbiana y la materia orgánica, esto es debido a que la disponibilidad de carbono en el suelo estimula el crecimiento microbiano [28]. El carbono de la biomasa microbiana y la respiración basal son propiedades bioquímicas sensibles para monitorear la mineralización de la materia orgánica [7], por lo que es razonable la relación positiva entre la respiración del suelo y la biomasa microbiana. La actividad respiratoria en relación al tamaño de la población microbiana se considera un indicador de la energía requerida para el mantenimiento de los microorganismos y de eficiencia metabólica [4].

Tabla 5: Correlación de Pearson entre la RB y el C biomasa con los parámetros evaluados en los suelos arenosos de las playas El Palito, Waikiki y Blanca del municipio Puerto Cabello, estado Carabobo ($P > 0,005$)

Parámetro	RB	Cbiomasa
A (%)	-0,0152	-0,2735
Ar (%)	-0,0382	0,2446
pH	-0,4545	-0,4975
Conductividad (mS)	0,0754	0,2148
RH (%)	0,1552	0,1161
CH (%)	-0,014	0,1364
MO (%)	0,3034	0,3598
COT (gC/kg ss)	-0,0011	-0,0145
RB (mg C-CO ₂ /kg)		0,5224

Con los resultados obtenidos se realizó un diagrama para evaluar las relaciones causa-efecto de las variaciones en los indicadores establecidos (Figura 5). En él se muestran al carbono de la biomasa microbiana y la actividad biológica como las causas de influencia directa en la disminución de la calidad del suelo arenoso, las cuales son producto de las variaciones en el contenido de materia orgánica y el pH del medio. En el caso del pH, el aporte de especies inorgánicas que generan modificaciones en la dinámica del intercambio de H⁺, es la principal causa de su variación; mientras que, el bajo contenido de materia orgánica, puede ser asociado a procesos condicionados por las características físicas del

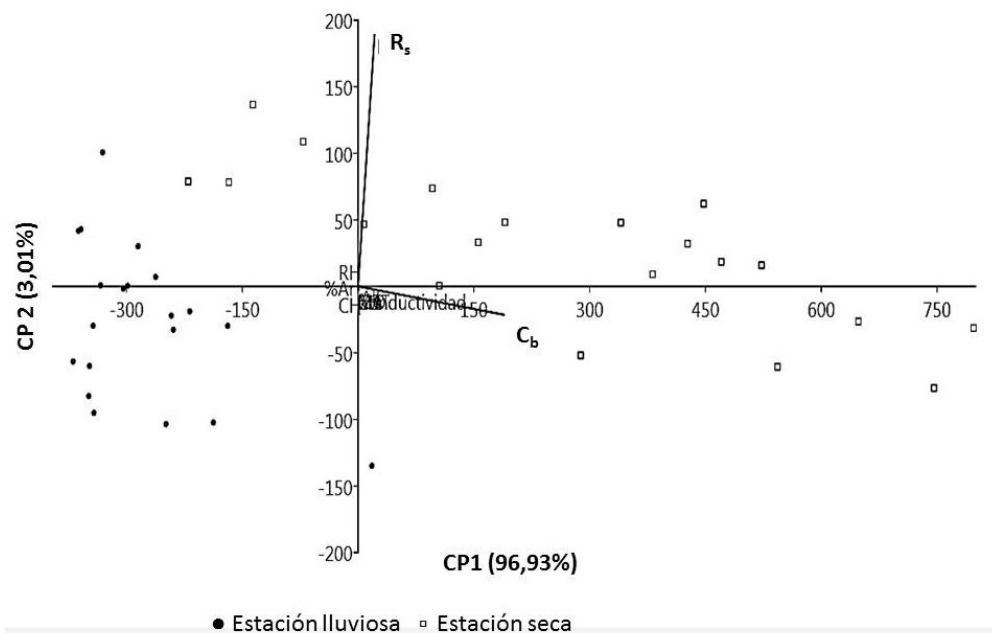


Figura 4: Análisis de componentes principales sobre los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos evaluados en las unidades de muestreo de las playas El Palito, Waikiki y Blanca del municipio Puerto Cabello, estado Carabobo

medio. Las causas que generan estos impactos pueden atribuirse a las actividades antrópicas que se llevan a cabo en las zonas de estudio, principalmente las turísticas, descarga de residuos industriales provenientes de refinerías y transporte marítimo y, efluentes domésticos provenientes de los desarrollos urbanísticos de la zona. Todas estas actividades deben ser supervisadas y reglamentadas a fin de que generen el menor impacto posible en la calidad de los recursos que componen el ecosistema costero.

8. Conclusiones

Los suelos de las playas arenosas seleccionadas para el estudio tienen características fisicoquímicas propias asociadas a su textura, como son baja retención de humedad y contenido de materia orgánica, propiedades que condicionan el comportamiento de indicadores como la actividad microbiológica. La respiración y la biomasa microbiana del suelo varían con la estacionalidad en suelos arenosos de playas. Los parámetros estudiados como RB y Cbiomasa, se relacionan de manera directa con el pH y disponibilidad

de materia orgánica en los suelos arenosos de las playas analizadas del municipio Puerto Cabello. Estos parámetros pueden ser considerados indicadores de calidad de este tipo de suelos por tener un comportamiento más sensible ante impactos ambientales negativos producidos por las actividades turísticas e industriales que se desarrollan en las zonas en estudio. En base a los resultados obtenidos en este trabajo, se establece que las metodologías que se apliquen para el monitoreo, mantenimiento y mejoras de la calidad ambiental de este tipo de suelos, deben estar enfocadas en propiedades biológicas, tales como biomasa microbiana y la respiración edáfica, por ser los de mayor sensibilidad ante posibles impactos.

9. Referencias

[1] R. Silva, M. Martínez, P. Moreno, E. Mendoza, J. López, D. Lithgow, G. Vásquez, R. Martínez, R. Monroy, J. Cáceres, A. Ramírez, and M. Boy, *Aspectos generales de la zona costera*. México: UNAM- INECOL, 2017.

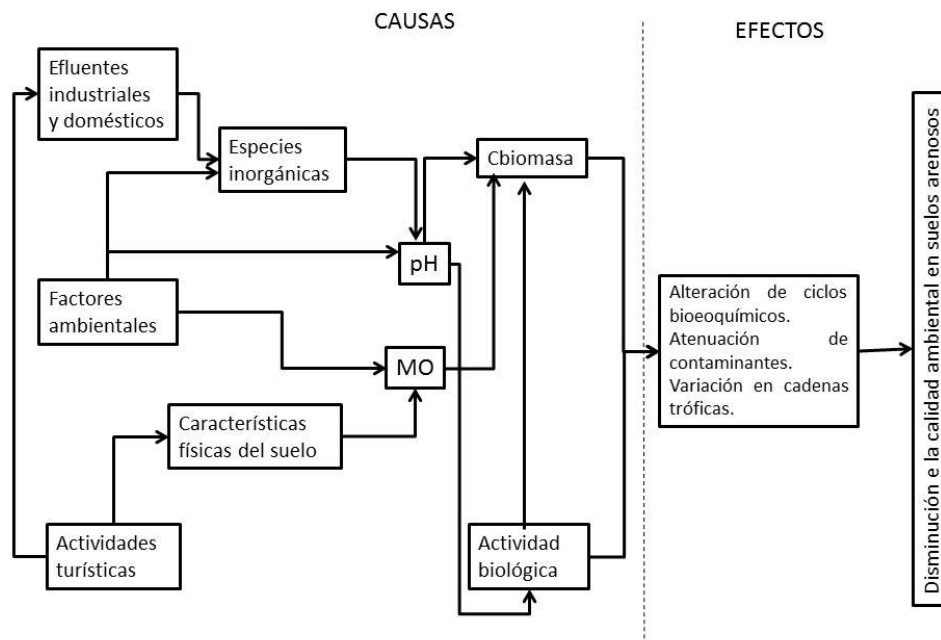




Figura 5: Diagrama causa-efecto de las alteraciones en la calidad ambiental de suelos arenosos de playas del municipio Puerto Cabello, estado Carabobo

- [2] V. F. . G.-G. R. Agardy, T., *Ecosistemas América Latina y el Sector de Ecoturismo en y el Caribe*. Caracas: CAF, 2019.
- [3] J. Yost, y A. Hartemink, "Soil organic carbon in sandy soils: A review," in *Advances in Agronomy*, D. L. Sparks, Ed. Academic Press, 2019, vol. 158, ch. 4, pp. 217–310. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2019.07.004>
- [4] S. F. V. . G. C. Ferreras, L.; Toresani, "Sensibilidad de indicadores biológicos edáficos en un Argiudol de la Región Pampeana Argentina," *Spanish Journal of Soil Science*, vol. 5, no. 3, pp. 227–242, 2015. <https://doi.org/10.3232/SJSS.2015.V5.N3.04>
- [5] H. González, A. González-Pedraza, J. Atencio, and A. Soto, "Evaluación de calidad de suelos plataneros a través de la actividad microbiana en el sur el lago de Maracaibo, estado Zulia, Venezuela," *Revista de la Facultad de Agronomía (LUZ)*, vol. 38, no. 1, pp. 1–25, 2021. [https://doi.org/10.47280/RevFacAgron\(LUZ\).v38.n1.03](https://doi.org/10.47280/RevFacAgron(LUZ).v38.n1.03)
- [6] I. Hernández, "Impacto de actividades antrópicas sobre parámetros microbiológicos y bioquímicos del suelo: tres casos de estudio," *Acta Biológica Venezolana*, vol. 39, no. 1, pp. 73–90, 2019.
- [7] N. De La Portilla, R. Vaca, P. D. Águila, L. Salinas, G. Yañez, and J. Lugo, "Carbono de la biomasa microbiana, respiración basal y cinética del carbono de dos suelos erosionados enmendados con biosólidos," *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, vol. 37, pp. 43–453, 2021. <https://doi.org/10.20937/RICA.53863>
- [8] R. Fernández, I. Frasier, M. Rorig, A. Quiroga, and E. Noellemeyer, "Evaluación de indicadores biológicos en suelos de la región semiárida pampeana central,," *Ecología Austral*, vol. 28, no. 1, pp. 145–156, 2018. <https://doi.org/10.25260/EA.18.28.1.0.555>
- [9] D. Jenkinson and D. Powlson, "The effect of biocidal treatments on metabolism in soil-V. A method for measuring soil biomass," *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 8, no. 3, pp. 209–213, 1976. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(76\)90005-5](https://doi.org/10.1016/0038-0717(76)90005-5)
- [10] J. Paolini, "Actividad microbiológica y biomasa microbiana en suelos cafetaleros de los Andes venezolanos," *Terra Latinoamericana*, vol. 36, no. 1, pp. 13–22, 2017. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i1.257>
- [11] K. Alef and P. Nannipieri, *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry*. London: Academic Press, 1995. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-513840-6.X5014-9>
- [12] M. Fuentes, "Metales pesados Cu, Cr, Ni, Zn, Pb y Cd en los sedimentos del muelle pesquero de Güiria, estado Sucre, Venezuela," *Tecnociencia*, vol. 10, no. 2, pp. 61–79, 2008.
- [13] C. Zhang, S. Nie, J. Liang, G. Zeng, H. Wu, S. Hua, J. Liu, Y. Yuan, H. Xiao, L. Deng, and H. Xiang,

- “Effects of heavy metals and soil physicochemical properties on wetland soil microbial biomass and bacterial community structure,” *Science of the Total Environment*, vol. 557–558, pp. 785–790, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.170>
- [14] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, “Estado mundial del recurso suelo,” FAO, Italia, Resumen Técnico, 2015.
- [15] J. Aljujar and A. Armado, “Estudio de parámetros físicoquímicos y biológicos en suelos arenosos de playas del municipio puerto cabello, estado carabobo,” in *LatinXChem Conference*, 2021. <https://doi.org/10.26226/morressier.616e5c2462ba8657678b132b>
- [16] G. Bouyoucos, “Directions for making mechanical analysis of soils by the hydrometer method,” *Soil Science*, vol. 42, no. 3, pp. 225–228, 1936. <https://doi.org/10.1097/00010694-193609000-00007>
- [17] F. Cargua, M. Rodríguez, D. Damián, C. Recalde, and G. Santillán, “Comparación de dos métodos analíticos para la determinación de carbono orgánico del suelo de bosque andino, parque nacional Sangay-Ecuador,” *Acta agronómica. Funcionamiento biológico, químico y físico del suelo*, vol. 66, no. 39, pp. 408–413, 2017. <https://doi.org/10.15446/acag.v66n3.52467>
- [18] Y. Pardo, J. Paolini, and M. Cantero, “Biomasa microbiana y respiración basal del suelo bajo sistemas agroforestales con cultivos de café,” *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, vol. 22, no. 1, 2019. <https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n1.2019.1144>
- [19] P. Brookes, D. Powlson, and D. Jenkinson, “Measurement of microbial biomass phosphorus in soil,” *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 14, no. 4, pp. 319–329, 1982. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(82\)90001-3](https://doi.org/10.1016/0038-0717(82)90001-3)
- [20] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, “Guía para la descripción de los suelos,” FAO, Roma, Italia, Resumen técnico, 2009.
- [21] M. Bunicontro, S. Marcomini, N. Weiler, R. López, and S. Quenardelle, “Caracterización textural, composicional y análisis de procedencia de los sedimentos de playa del Golfo Nuevo, Provincia de Chubut,” *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, vol. 74, no. 2, pp. 207–222, 2017.
- [22] P. Chaveli, L. Font, B. Calero, A. Cervantes, P. López, R. Caballero, and M. Valenciano, “Uso de indicadores microbiológicos para la evaluación de la degradación de suelos oscuros plásticos arroceros de la provincia de Camagüey,” *Centro agrícola*, vol. 3, no. 3, pp. 61–66, 2003.
- [23] J. . R. J. Sánchez, L.; Paolini, “Dinámica de las propiedades del suelo en bosques de *Rhizophora mangle* L. (*Rhizophoraceae*) en Isla de Margarita, Venezuela,” *Revista de Biología Tropical*, vol. 58, no. 2, pp. 547–564, 2010.
- [24] H. Cui, J. Bai, S. Du, J. Wang, G. Nitta, W. Wang, G. Zhang, and J. Jia, “Interactive effects of groundwater level and salinity on soil respiration in coastal wetlands of a Chinese delta,” *Environmental Pollution*, vol. 286, no. 117400, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117400>
- [25] Y. Liu, C. Zhao, Q. Shang, and L. Wang, “Responses of soil respiration to spring drought and precipitation pulse in a temperate oak forest,” *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 268, pp. 289–298, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.01.029>
- [26] M. Zhao, S. Guo, and R. Wang, “Diverse soil respiration responses to extreme precipitation patterns in arid and semiarid ecosystems,” *Applied Soil Ecology*, vol. 163, no. 103928, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.103928>
- [27] C. García, y J. Félix, *Técnicas de caracterización de suelos y abonos orgánicos*, 1era ed. Sinaloa, México: Fundación Produce Sinaloa A.C, 2014.
- [28] S. K. Y. . Z. B. Moghimian, N.; Mohsen, “Evaluating soil biochemical/microbial indices as ecological indicators of different land use/cover in Northern Iran,” *Acta Ecológica Sinica*, vol. 39, no. 4, pp. 328–333, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2019.05.006>
- [29] A. Shi and P. Marschner, “Soil respiration and microbial biomass in multiple drying and rewetting cycles-Effect of glucose addition,” *Geoderma*, vol. 305, pp. 219–227, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.06.010>
- [30] K. Zhang, L. Chen, Y. Li, P. Brookes, J. Xu, and Y. Luo, “Interactive effects of soil pH and substrate quality on microbial utilization,” *European Journal of Soil Biology*, vol. 96, no. 103151, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2020.103151>
- [31] Y. Yang, Y. Shi, J. Fang, H. Chu, and J. Adams, “Soil Microbial Network Complexity Varies with pH as a Continuum, not a Threshold, across the North China Plain,” *Frontiers in Microbiology*, vol. 13, no. 895687, 2022. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.895687>

Establishment of the system of somatic embryogenesis in *Azadirachta indica* A. Juss from cell suspensions, coupled to the production of azadiractin *in vitro*

Rafael Fernández–Da Silva * , Valeria Montilla 

Centro de Biotecnología Aplicada (CBA), Departamento de Biología, Facultad Experimental de Ciencias y Tecnología (Facyt), Universidad de Carabobo (UC). Valencia, Venezuela



<https://doi.org/10.54139/revinguc.v29i2.169>

Abstract.- Neem (*Azadirachta indica* A. Juss; Meliaceae) is a woody tree versatile in medical, environmental and agricultural fields. In agriculture, its role is bioinsecticide, due to the secondary metabolite azadirachtin (AZA), only synthesized by this specie. To obtain the optimal concentration required a large amount of seeds, available for a short period of time per year, however, by techniques biotechnological, elite varieties coupled to a higher yield in the production of said compound can be obtained, regardless of the period of the year. Therefore, this study to establish the somatic embryogenesis system linked to the *in vitro* production of AZA in suspensions cells, from leaf and cotyledon, with different concentrations of cytokinin (BAP) and auxins (2,4-D and AIA) to regenerate plants and non-embryogenic callus, for the latter in liquid medium, to evaluate the effect of different proportions nitrate/ammonium, sodium acetate and squalene. Somatic embryos were differentiated in cell suspensions with 2 mg/L of BAP and 1 mg/L of 2,4-D, after 5 months of culture. The maximum production (52,53 mg/L) of AZA in 14 days of culture was achieved by simultaneously using nitrate (60 mM), sodium acetate and squalene (10 mg/L each).

Keywords: precursor; nitric MS; *in vitro* regeneration; cell suspension.

Establecimiento del sistema de embriogénesis somática en *Azadirachta indica* A. Juss a partir de suspensiones celulares, acoplado a la producción de azadiractina *in vitro*

Resumen.- El neem (*Azadirachta indica* A. Juss; Meliaceae), es un árbol leñoso versátil en medicina, remediación y agricultura. En el agrícola, su rol es bioinsecticida, debido al metabolito secundario azadiractina (AZA), únicamente sintetizado por esta especie, cuya concentración óptima, requiere principalmente gran cantidad de semillas, disponibles por un breve lapso de tiempo al año, no obstante, por técnicas biotecnológicas, se puede obtener variedades elite acopladas a un mayor rendimiento en la producción de dicho compuesto, independientemente del periodo del año, por lo cual el objetivo de este trabajo fue establecer el sistema de embriogénesis somática concatenado a la producción *in vitro* de AZA en suspensiones celulares, a partir de hoja y cotiledón, con distintas concentraciones de citocinina (BAP) y auxinas (2,4-D y AIA) para regenerar plantas y callo no embriogénico, para de este último en medio líquido, evaluar el efecto de distintas proporciones de nitrato/amonio, acetato de sodio y escualeno. En suspensiones celulares se diferenciaron embriones somáticos con 2 mg/L de BAP y 1 mg/L de 2,4-D, luego de 5 meses de cultivo. La máxima producción (52,53 mg/L) de AZA en 14 días de cultivo, se logró empleando simultáneamente nitrato (60 mM), acetato de sodio y escualeno (10 mg/L c/u).

Palabras clave: precursor; MS nítrico; regeneración *in vitro*; suspensión celular.

Received: 15 de mayo, 2022.

Accepted: 25 de julio, 2022.

1. Introducción

El Neem (*Azadirachta indica* A. Juss) es una planta arbórea de la familia Meliaceae, originada en la India, cuyo cultivo se ha extendido al Asia tropical, Australia y el neo trópico, [1]. Este árbol es un emblema ancestral indio, dado a su múltiple y versátil uso desde el año 4.500 AC

* Autor para correspondencia:

Correo-e: rafaelfer21031970@gmail.com (R. Fernández–Da Silva)

[2], mientras que en Venezuela se ha utilizado para recuperar suelos, reforestación elaboración de abonos e insecticidas [1]. Sin embargo, en este siglo, diferentes partes vegetativas y reproductivas de esta planta son empleados en el tratamiento en medicina popular de distintas enfermedades [3], dada la presencia de ciertos metabolitos secundarios [4], ya sea en afecciones digestivas como dermatológicas [5], como tumorales [6]. Aunado a ello, la presencia exclusiva del metabolito secundario azadiractina (AZA) [7], en esta especie vegetal, determina el rol biocontrolador de insectos plagas [8], no obstante, la producción convencional depende fundamentalmente de semillas, que al producirse una sola vez al año, por viabilidad económica necesita gran cantidad de dicha materia prima, usando mayores extensiones de tierras que no pueden usarse para otros cultivos de importancia agroalimentaria. Por tanto, las técnicas biotecnológicas por cultivo de tejidos, permiten producir masivamente a bajo costo la AZA [9], basándose en la totipotencia de las células vegetales, que puede generar células indiferenciadas denominadas callo [10], con características regenerativas de plantas (exclusivamente el Callo embriogénico) o en la producción de metabolitos secundarios (Callo embriogénico y callo no embriogénico) [11].

En relación a la regeneración de plantas *in vitro*, se ha reportado en medio sólido, ya sea a través de la germinación de semillas [12], así como de explantes como semillas [13], anteras [14], brotes axilares [15], endospermo [16] y embriones cigóticos [17, 18]. Las *in vitro* plantas obtenidas se diferencian, ya sea por organogénesis como por embriogénesis somática, tanto primaria como secundaria [19, 20, 21], distinguiéndose el desarrollo organogénico directo en explantes nodales [22], mientras que mayor es la tasa regenerativa a través de embriones somáticos desarrollados indirectamente de explantes cotiledonares [23].

La producción *in vitro* de AZA es eficiente [24] en callo, suspensiones celulares y en raíces en cabellera [25, 26, 27, 28, 29, 30, 31], pero tiene mucho menos tiempo de estudio en comparación con otros metabolitos secundarios de interés comercial [32] variando los reportes de AZA entre 2,5 a 72,81 mg/L, en relación

a las condiciones biológicas, químicas y físicas del cultivo, potenciando el uso del agente permeabilizante Tritón X-100, para facilitar la extracción sin pérdida de la viabilidad celular [33] velocidad de agitación de 120 rpm [34], para mantener un nivel adecuado de oxígeno [11, 28, 29], así como de precursores como el acetato de sodio, y escualeno [35], incrementando los niveles de nitrógeno [36], utilizando callos friables de diferente origen [37, 38], o tipo [39], donde el último reporte de suspensiones celulares derivadas de callo friable verde amarillento derivado de flores, utilizando los precursores pirofosfato geranil y isopentil pirofosfato y altos niveles de nitrógeno repercutió en 71,6 mg/L de AZA [40] o con extracto de levadura logrando 190,5 mg/L [41].

A pesar de los reportes de eficientes protocolos de regeneración por embriogénesis somática en Neem, no se ha descrito este sistema en suspensiones celulares, el cual facilitaría la masiva y rápida micropropagación de plantas elites en la producción de AZA. Asimismo, por suspensión celular, también se conoce mucho de la producción de este metabolito secundario, como el mayor rendimiento empleando callo no embriogénico de segmentos foliares, donde sería apropiada la optimización de los parámetros químicos referentes a la combinación de precursores químicos con distintas relaciones de nitrógeno. De tal manera, que el objetivo de esta investigación, fue establecer el sistema de embriogénesis somática en *Azadirachta indica* a partir de suspensiones celulares, acoplado a la producción de azadiractina *in vitro*.

2. Materiales y métodos

Cultivo in vitro en medio sólido

A partir de árboles de Neem (*Azadirachta indica* A. Juss) sanos, ubicados en el Campus de la Universidad de Carabobo (Estado Carabobo-Venezuela), se obtuvieron frutos inmaduros, que fueron el material biológico inicial de los ensayos *in vitro* en el año 2017. Estos se desinfectaron el mismo día de su colecta, en una campana de flujo laminar horizontal, escindiendo el embrión cigótico, aislando primero el epicarpio

y mesocarpio, permaneciendo solo el endocarpio, que se lavó dos veces por 2 min cada uno, con agua destilada estéril y detergente líquido comercial (Dodecilbencensulfonato de sodio, Clic[®], Fácil Química C.A.). Posteriormente, se efectuó un lavado con isopropanol al 70 % v/v durante 30 segundos y con agua destilada estéril por 1 min, otro lavado con cloro comercial (3,5 % de hipoclorito de sodio) al 20 % v/v y Tween 20 (1 gota/10mL) por 5 min, y definitivamente 3 lavados con agua destilada estéril de 1 min cada uno, para eliminar el cloro y alcohol isopropílico sobrante. Finalmente, se sumergió en una solución de cisteína al 1 % en agua destilada estéril por 30 min, para minimizar la oxidación del embrión cigótico como explante inicial. De este se desarrolla la *vitro planta* en el medio MS con 0,2 mg/L de BAP (6-N-bencil-aminopurina), en oscuridad continua y temperatura ambiente (25 °C) hasta la diferenciación radical y la apertura de la hojas cotiledonares, estimulando el desarrollo de la misma a $120 \mu\text{E}/\text{m}^2\text{s}^{-1}$ de iluminación continua, que luego de 2 semanas se obtuvo como explantes definitivos (cotiledón y hoja) para la inducción de callo (embriogénico “E”; no embriogénico “NE”) en placas de Petri, con medio MS sólido suplementado con distintos tipos y niveles de reguladores del crecimiento, medios de cultivo óptimos establecidos por Artigas y Fernández [19] y Fernández *et al.* [21] en oscuridad continua y temperatura ambiente (25 °C). Para segmentos foliares se empleó 1 mg/L de BAP con 0,4 mg/L de AIA (ácido índol acético), mientras que para cotiledón se utilizó 1 mg/L de BAP con 0,4 mg/L de 2,4-D (ácido 2,4-diclorofenoxiacético).

Cultivo in vitro en medio líquido

A partir de segmentos pequeños de callo E o NE se iniciaron las suspensiones celulares, siguiendo el sistema de Fernández *et al.* [42]. En matraces Erlenmeyer con 100 mL de medio líquido, de idéntica composición para el inducción callogénica en medio sólido según el tipo de explante, se colocó mediante una pinza y/o bisturí estéril 1 g de los trozos disgregados del tipo de callo (según el caso). Con el callo E derivado de secciones de hoja y de cotiledón se evaluó la

inducción de la embriogénesis somática, mientras que del callo NE originado de segmentos foliares se evaluó la producción de azadiractina (AZA). Los cultivos inicialmente de suspensión gruesa, se mantuvieron en oscuridad continua y a temperatura ambiente (25 °C), con agitación continua de 150 rpm, para facilitar una mayor disgregación de los agregados celulares. Después de 2 semanas, se pasó a través de un tamiz de malla de acero (150 mesh), obteniéndose una suspensión fina, que se dejó en agitación a 100 rpm, a temperatura ambiente (25 °C) y oscuridad continua, variando la reposición de medio de cultivo, cada 15 días por 5 meses para inducción de embriones somáticos y sin renovación (estrés) por 5 semanas para la producción de AZA. Para el proceso regenerativo se evaluó la combinación de la citocinina BAP (1, 2, 4 y 6 mg/L) con la auxina 2,4-D (0,4, 1 y 2 mg/L), mientras que para la síntesis de AZA la incidencia de luz fue nula, para facilitar la mayor producción de este terpenoide, ya que al ser este fotosensible se degrada con dicho estímulo [43].

Evaluación morfo histológica

la caracterización anatómica y morfológica de las suspensiones celulares, se efectuó de acuerdo al protocolo establecido por Fernández *et al.* [21, 42, 44] y Artigas y Fernández [19, 20]. Para el registro fotográfico se empleó un microscopio estereoscópico Leica MZ75 y para el estudio anatómico se empleó un microscopio compuesto Leica DM1000.

Producción y extracción de azadiractina (AZA)

La producción de AZA, se evaluó una vez por semana, durante 5 semanas consecutivas en un cultivo, de la misma composición descrita anteriormente para suspensión celular, pero suplementada con 10 mg/L de Tritón X-100 (agente permeabilizante de la membrana), en función de las siguientes variables: relación de las sales de nitrógeno en mM $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ 40:20 (KNO_3 : 20; NH_4NO_3 :20), 50:10 (KNO_3 : 40; NH_4NO_3 :10), y 60 (KNO_3 : 60; NH_4NO_3 :0) combinadas con los precursores acetato de sodio (AC: 0, 10 y 50 mg/L) y escualeno (ES: 0, 10 y 50 mg/L), realizándose treinta (30) replicas por

tratamiento. Se determinó el nivel de AZA por espectrofotometría UV-visible, una técnica barata, expedita y exacta, tomando en consideración el patrón de concentración conocida del metabolito secundario [45], siguiendo el método de la vainillina aceptada para limonoides relacionados a AZA [46], el cual inicia tomando 1 mL de medio de cultivo, que se trasladó a un tubo de centrifuga Falcon cónico de 10 mL, donde se añadió 5 mL etanol al 9 % v/v, para inmediatamente mezclar por inversión, centrifugándose a 7000 rpm por 15 minutos. Consecutivamente, se evaporó el etanol de la muestra en un baño de María a 75 °C, resuspendiéndose la muestra subsiguientemente en 1 mL de agua destilada estéril, que se almacenó a -80 °C, hasta el instante de la evaluación por espectrofotometría, la cual se efectuó tomando 0,35 mL de la muestra almacenada, a los cuales se les añadió 0,1 mL de solución de metanol de vainillina (0,02 mg/mL), agitándose por inversión, y dejándose reposar por 2 minutos. Prontamente, se agregaron 0,15 mL de ácido sulfúrico concentrado al 97 % (v/v) en 3 partes de 0,05 mL, agitándose por inversión por 10 segundos con cada adición. Inmediatamente de esto, se adicionaron 0,35 mL de metanol, dejándose reposar la muestra por 15 min a temperatura ambiente (25 °C). La absorbancia se midió en un espectrofotómetro (Genesys™ 10, UV-Vis) a 577 nm. Los datos obtenidos se valoraron por medio de su comparación con una curva estándar de AZA, la cual se realizó utilizando soluciones patrón de azadiractina en diclorometano, entre 0,01–1 mg/mL, que asintió validar la exactitud del método espectrofotométrico que se manejó para establecer la AZA en este estudio [47].

Análisis estadístico

Se realizaron análisis de la diferenciación de agregados embriogénicos y embriones somáticos, en función de los reguladores de crecimiento y explantes, mientras que en la producción de AZA se efectuó en función de la relación de sales de nitrógeno (nitrato y amonio) y precursores químicos (AC y ES), aplicando una ANOVA de dos vías una vez corroborado que los datos cumplían los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza, utilizando el programa de análisis

estadístico PAST (versión 3.15, Hammer Ø., Museo de Historia Natural, Universidad de Oslo, Noruega). También se realizaron comparaciones puntuales a posteriori mediante la prueba de Tukey. En todos los casos, se utilizó como criterio un valor de significancia de $p < 0,05$ [48]. Los resultados de inducción de embriogénesis somática se evaluó con las variaciones promedio de células y agregados embriogénicos en curvas continuas en función del tiempo, en relación a las combinaciones de reguladores de crecimiento en el medio de cultivo, mientras que la producción de AZA se valoró en función la concentración del metabolito con los tratamientos referentes a la combinación de sales de nitrógeno y precursores químicos.

3. Resultados y discusión

Las características de las poblaciones de las células y de los agregados celulares en una suspensión celular, varían en función al tipo de callo empleado y a su vez del explante de origen, ya sea para establecer suspensiones a partir de callo embriogénico (E) para estudiar la embriogénesis somática o con callo no embriogénico (NE) para la producción de azadiractina (AZA). Así la suspensión celular obtenida del callo E de hoja (De color blanco y de consistencia compacta por presentar “neomorfos”) fue menos concentrada (poco turbia) que la obtenida del callo E originado del cotiledón (color beige, consistencia suave), obteniéndose una población celular heterogénea, ya que no se descarta la presencia de “parches” callo NE, mientras que en las suspensiones no embriogénicas, predominan las células NE. En este sentido, las células no embriogénicas y embriogénicas pueden estar agrupadas, siendo hialinas, alargadas y de mayor tamaño las células no embriogénicas, algo densas en citoplasma, isodiamétricas y más pequeñas las células embriogénicas (Figura 1a), encontrándose también de forma individual células no embriogénicas (Figura 1b) y embriogénicas (Figura 1c), o en grupo celular homogéneo no embriogénico (Figura 1d) o embriogénico (Figura 1e), así como en forma de agregados celulares poco compacto (Figura 1f), o compacto (Figura 1g), donde se evidencia un

patrón de división celular simétrico (Figura 1g) o asimétrico (Figura 1h), potenciándose el desarrollo de embriones somáticos (Figura 1i) o callo E (Figura 1j), que facilitaron la proliferación primaria indirecta y asincrónica de embriones somáticos individuales de forma globular (Figura 1k), torpedo (Figura 1l) y cotiledonar (Figura 1m), diferenciándose asincrónica y directamente a nivel epicotilar en estos dos últimos, embriones somáticos secundarios (Figura 1n), que germinaron (Figura 1ñ) y desarrollaron plantas completas (Figura 1o). En Cultivo *in vitro* de Neem, solo hay algunos trabajos del proceso regenerativo por organogénesis y embriogénesis somática en medio sólido, donde de manera detallada se describen los sistemas, en particular el embriogénico primario y cíclico o repetitivo, el cual es de mayor tasa regenerativa, empleando explantes cotiledonares [19, 20, 21], por tanto, este es el primer reporte en el establecimiento del sistema de suspensión celular de Neem, donde las características de las células, agregados celulares, patrón de división celular, estadios del embrión somático, asincronía embriogénica y diferenciación directa de embriones somáticos repetitivos es similar al indicado en *Coffea arabica* [42].

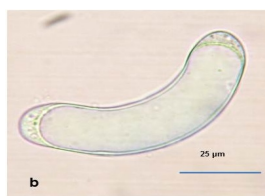
Al evaluar cada 15 días los cultivos en suspensión, se observó un crecimiento lento, el oscurecimiento (oxidación) del medio por la acumulación de sustancias fenólicas al ser un sistema sin recambio, donde la mayor proliferación de células y agregados celulares fue a partir de 30 y 60 días al emplear respectivamente callo E de hoja y cotiledón, empleando altas concentraciones de BAP y 2,4-D, en particular 2 BAP+1 2,4-D para el primero y 4 BAP+1 2,4-D para el segundo (Figura 2). Destacándose significativamente una formación de células y agregados en el caso de callo E originado de cotiledón, distinguiéndose un promedio de $4,5 \pm 8$ /mL de estructuras embriogénicas primarias y secundarias en diferentes estadios a los 5 meses, únicamente en el medio óptimo ya reseñado. El empleo de BAP combinado con auxinas como el 2,4-D o AIA, favorece la inducción de la embriogénesis somática en medio sólido en Neem [17, 18, 21, 49, 50, 51],

pero en medio líquido este trabajo el primer reporte de ello, donde el cultivo sin reemplazo de medio, favoreció la acumulación de compuestos fenólicos, una condición de estrés que pudo haber contribuido la activación de la embriogénesis somática, tal como lo plantea un trabajo previo [52], al indicar que la exposición transitoria de las células a condiciones fuertes de estrés (estrés osmótico, aplicación de metales pesados, alta o baja temperatura, hipoxia, radiación ultravioleta, tratamientos mecánicos o químicos) y/o altas concentraciones de reguladores del crecimiento, facilita el desarrollo de embriones somáticos, tal como se describe en callo embriogénico de la planta leñosa *Feijoa sellowiana*, donde se favorece la diferenciación de embriones somáticos en altas concentraciones de los compuestos fenólicos floroglucinol y ácido caféico [53], no obstante, no se ha dilucidado las vías específicas por medio de la cual este agente estresante activa el desarrollo de los embriones somáticos. Asimismo, la baja diferenciación de embriones somáticos en un único medio de cultivo, evidencia lo recalcitrante de la especie vegetal al evento regenerativo en medio líquido, tal como se observó en medio sólido [21], donde altas concentraciones de citocininas como el BAP favorece tanto la embriogénesis primaria como secundaria en plantas leñosas como el Neem [19, 20, 21] o el café [42].

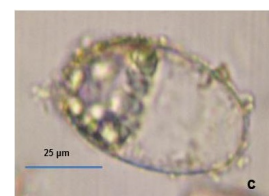
Al evaluar la producción de azadiractina (AZA) con 15 tratamientos en 5 semanas de cultivo, la variación en función del tiempo fue similar con los tratamientos, donde se incrementó la concentración del metabolito secundario en las dos primeras semanas de cultivo (14,3–52,9 mg/mL), decayendo progresivamente en las tres restantes (28,8–14,1 mg/mL), encontrándose la mayor síntesis en la segunda semana (33,1–52,9 mg/mL). Asimismo, en función de la combinación de precursores químicos y relaciones de sales de nitrógeno en los tratamientos, se observó que las menores concentraciones de AZA (12,1–37,2 mg/mL) estuvieron en tratamientos sin precursores (T1-T3), mientras que las mayores concentraciones (14,4–52,9 mg/mL) se detectaron en tratamientos (T5-T6) con los dos precursores (10 mg/mL de acetato de sodio “AS”+ 10 mg/mL escualeno “ES”) con las



(a) Agrupación de células embriónicas (E) y no embriónicas (NE)



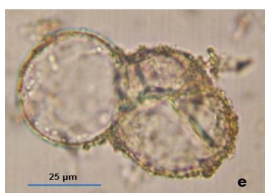
(b) Célula NE individual



(c) Célula E individual



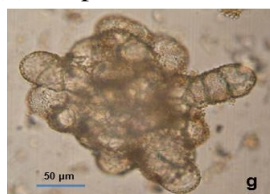
(d) Grupo de células NE



(e) Grupo de células E



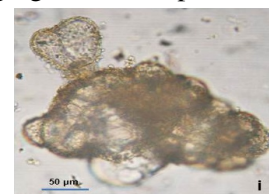
(f) Agregado celular poco compacto



(g) Agregado celular compacto con células E en patrón de división simétrica



(h) Agregado celular compacto con células E en patrón de división asimétrica



(i) Agregado celular compacto con células E en patrón de división embrión somático globular



(j) Microcallos



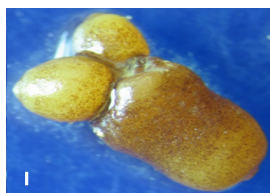
(k) Embrión somático globular



(l) Embrión somático torpedo



(m) Embrión somático con cotiledonar



(n) Diferenciación directa de embriones secundarios



(ñ) Germinación de embriones secundarios



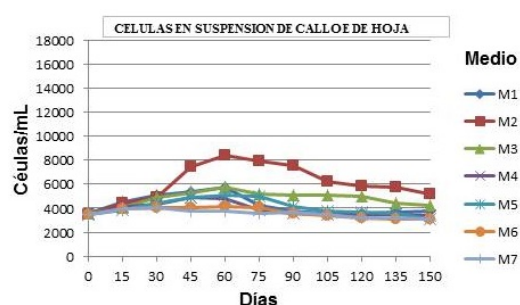
(o) Vitro plantas con primarias hojas desarrolladas

Figura 1: Morfo anatomía de la suspensión celular de *Azadiractha indica*

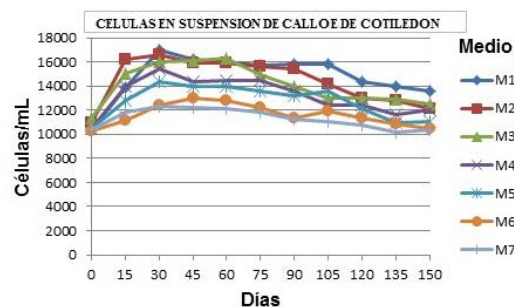
mayores relación de nitrato ($\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$, 50:10 y 60:0), encontrándose diferencias significativas ($p \leq 0,0002$) entre estos, siendo la mayor concentración (52,9 mg/mL) en T6 (10 mg/mL AC+10 mg/mL ES+MS 60:0), siendo menores las concentraciones de AZA en tratamientos (T7-T15)

con mayores concentraciones de precursores (50 mg/mL de AS y/o ES) (Figura 3).

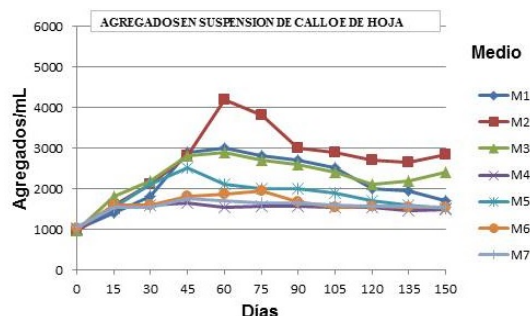
En este sentido, estos resultados confirman la tendencia de incremento progresivo de la síntesis de AZA hasta los 14 días (2 semanas de cultivo), disminuyendo en las subsiguientes semanas de



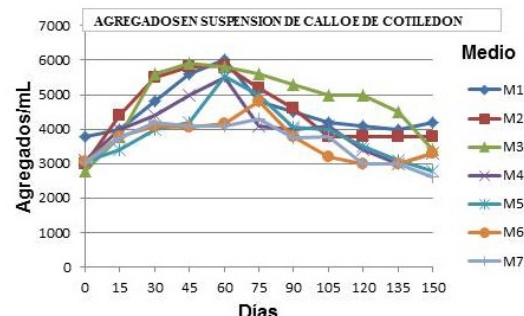
(a) Células en suspensión de Callo E de Hoja



(b) Células en suspensión de Callo E de Cotiledon



(c) Agregados en suspensión de Callo E de Hoja



(d) Agregados en suspensión de Callo E de Cotiledon

M1: 1 BAP+0,4 2,4-D; M2: 2 BAP+1 2,4-D; M3: 4 BAP+1 2,4-D; M4: 6 BAP+ 1 2,4-D;
M5: 2 BAP+2 2,4-D; M6: 4 BAP+2 2,4-D M7: 6 BAP+2 2,4-D

Figura 2: Variación en el número de células y agregados por mL en suspensión de callo E derivado de segmentos foliares y de cotiledón, cada 15 días durante 5 meses de cultivo en 7 medios con distintas concentraciones (mg/mL) de BAP y 2,4-D

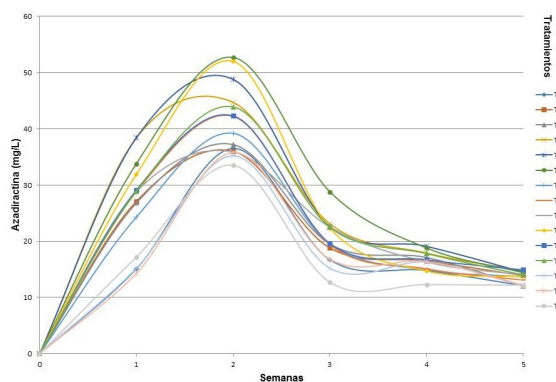
cultivo, por el agotamiento de nutrientes en el medio nutritivo, descrito previamente en suspensiones celulares de callo NE derivado de secciones foliares [39], explicándose que la síntesis del metabolito secundario probablemente se da por tres factores:

1. una menor tasa de síntesis, ya que se alcanza una fase estacionaria,
2. la iniciación de un proceso de degradación y
3. a cambios en la estructura del fitoquímico, derivando este en otros compuestos no-detectables [54],

donde la aparición de estos factores está asociada a los cambios en la composición de nutrientes en el medio de cultivo, tales como nitrógeno, fósforo y fuente de carbono como la sacarosa, que progresivamente son metabolizados por las células [54], como en los cultivos celulares de

callos derivados de brotes de *A. indica*, que para el día 12, más de la mitad del nitrato y el total de sacarosa presente en el cultivo había sido consumido [55]. Asimismo, también se indica que la combinación de 10 mg/mL de acetato de sodio y escualeno como precursores químicos fue el óptimo en la producción del metabolito secundario (44,2 mg/mL) [39], sin embargo, fue menor a la concentración obtenida en este trabajo (52,9 mg/mL), debido al incremento de nitrógeno (relación nítrica en el medio de cultivo MS 60:0).

Con respecto a la variación del pH del medio durante las seis semanas de cultivo, se encontró un incremento del nivel (6,2–6,5) del mismo a partir de la segunda semana, en función de la relación de sales de nitrógeno empleadas, partiendo de 5,8 (inicio del cultivo), hasta 6,8–7,2 en la quinta semana (Figura 4). Esta respuesta es explicada por el hecho que la absorción del nitrógeno inorgánico puede alterar fuertemente el pH del medio, lo cual



Tratamientos: T1: 0 AC+0 ES+MS 40:20; T2: 0 AC+0 ES+MS 50:10; T3: 0 AC+0 ES+MS 60:0; T4: 10 AC+10 ES+MS 40:20; T5: 10 AC+10 ES+MS 50:10; T6: 10 AC+10 ES+MS 60:0; T7: 10 AC+50 ES+MS 40:20; T8: 10 AC+50 ES+MS 50:10; T9: 10 AC+50 ES+MS 60:0; T10: 50 AC+10 ES+MS 40:20; T11: 50 AC+10 ES+MS 50:10; T12: 50 AC+10 ES+MS 60:0; T13: 50 AC+50 ES+MS 40:20; T14: 50 AC+50 ES+MS 50:10; T15: 50 AC+50 ES+MS 60:0.

Figura 3: Producción *in vitro* de azadiractina en el tiempo (semanas) en función de la combinación de distintas relaciones MS de nitrógeno “ $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ ” (40:20, 50:10 y 60:0 o “nitrítico”) con los precursores acetato de sodio “AC” (0, 10 y 50 mg/L) y escualeno “ES” (0, 10 y 50 mg/L)

afecta a la azadiractina sintetizada. En el caso más específico de los iones NO_3^- , presentes en el nitrato de potasio (KNO_3) del medio MS, su consumo resulta en un incremento del pH del medio. La azadiractina es una molécula estable en disoluciones acuosas medianamente ácidas, con un pH entre 4 y 6, siendo inestable en soluciones fuertemente ácidas o alcalinas, e incluso muy cercanas a pH 7 [56]. Estas variaciones son similares a las reportadas por otros investigadores [54, 55], donde el pH de 5,8 al inicio del cultivo, se reduce durante los primeros 10 días hasta valores entre 4,5–5, para luego aumentar nuevamente, alcanzando valores de hasta 6,2 en el día 16. Igualmente, es posible que estas variaciones en el pH sean consecuencia del consumo de otros iones presentes en el medio nutritivo o a la excreción de sustancias de desecho en este.

Al detallar la síntesis de AZA en la segunda semana de cultivo en función de la combinación de precursores y relaciones de sales de nitrógeno, evidenciamos que significativamente ($p \leq 0,0005$)

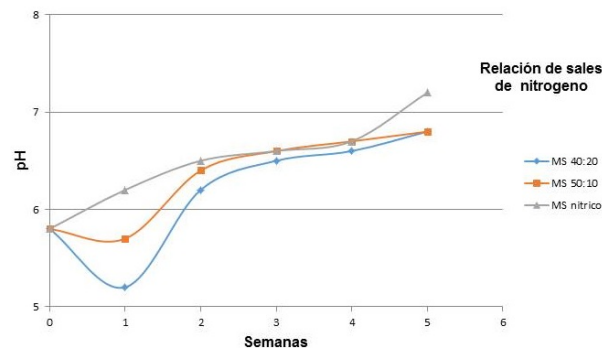
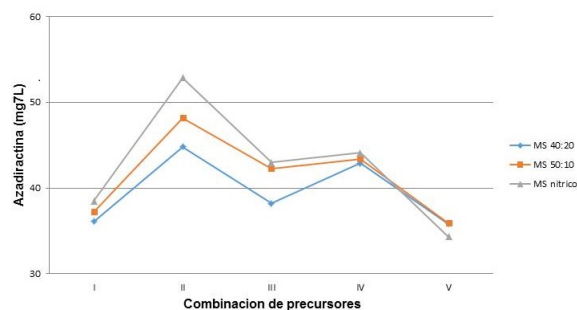


Figura 4: Variación del pH en función del tiempo de cultivo (semanas) en medios MS de nitrógeno “ $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ ” con diferentes combinaciones (40:20, 50:10 y 60:0 o “nitrítico”).

la mayor concentración del metabolito secundario se halla al combinar 10 mg/mL AC+10 mg/mL ES con la mayor relación de nitrógeno nitrítica ($\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$: MS 50:10 y MS 60:0) (Figura 5). De tal manera, se ratifica el importante papel de los precursores acetato de sodio y escualeno en la producción de azadiractina [57], donde el primero al no pertenecer a la ruta biosintética del mismo, debe ser transformado en ácido acético, y posteriormente incorporarse al ciclo de los ácidos tricarbónicos, permitiendo un incremento en los niveles de acetil CoA, que comprende el primer paso en la ruta del mevalonato, mientras que el segundo es un precursor obligado que participa directamente en la ruta de síntesis, incorporándose sin necesidad de ser transformado, facilitando su paso a 2,3-oxidoescualeno, después a lanosterol, seguido de productos intermedios hasta llegar a la azadiractina. Así hay reportes que indican que es mayor la síntesis de AZA empleando individualmente escualeno [35, 58] o acetato de sodio [31], sin embargo, la combinación de ambos precursores en concentraciones óptimas en el interior celular mejora la síntesis del metabolito secundario, ya que actúan en cascada a distintos niveles de la síntesis de triterpenoides [32, 33], pero si se aumenta mucho sus concentraciones pueden inhibir por retroalimentación la ruta biosintética, disminuyendo significativamente el nivel de AZA [31, 57, 58, 59], como se demostró en cultivos en raíz en cabellera de *A. indica*, principalmente

al utilizar 50 mg/ml de escualeno [31] o con suspensiones de callo NE de hojas al combinar 50 y 100 mg/L de AC y ES [39], tal como se observó en esta investigación.



I: 0 AC+0 ES; II: 10 AC+10 ES; III: 10 AC+50 ES; IV: 50 AC+10 ES; V: 50 AC+50 ES.

Figura 5: Producción in vitro de azadiractina en la segunda semana de cultivo, agrupando los resultados según las relaciones MS de nitrógeno “ $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ ” (40:20, 50:10 y 60:0 o “nitróico”) con los precursores acetato de sodio “AC” (0, 10 y 50 mg/L) y escualeno “ES” (0, 10 y 50 mg/L)

Por otra parte, la relevancia en la proporción de sales de nitrógeno en cultivo in vitro, es destacada por varios investigadores [60, 61], que plantean que a pesar que el nitrógeno en forma de amonio (NH_4^+) es preferido por el metabolismo celular vegetal, dado al menor requerimiento energético que en el caso del ion NO_3^- del nitrato de potasio (KNO_3), sólo pocas especies vegetales pueden desarrollarse bien cuando el NH_4^+ es proporcionado como fuente de nitrógeno mayoritaria, debido a efectos negativos sobre el crecimiento y morfogénesis, y sobre la producción de metabolitos secundarios. En tal sentido, mejores resultados en la síntesis de metabolitos secundarios, suelen ser obtenidos cuando se suministran ambos iones en simultáneo, estando el NO_3^- en mayor proporción, y, en algunos casos, cuando este es la única fuente de nitrógeno en el medio, tal como se describe al aplicar una proporción de nitrato:amonio en 5:1 en la producción de Jaceosidina en *Saussurea medusa* [62], de artemisina en *Artemisia annua* [63], de ginsenosidos por *Panax ginseng* con solo medio nitróico [61]. Así en el caso de *A. indica*, en callos derivados de semillas inmaduras, es mayor la

concentración de AZA (así como en la producción de biomasa) al incrementar la proporción de nitrato respecto a la de amonio, obteniendo la mayor producción del metabolito secundario (12,49 mg/L) cuando el nitrato fue utilizado como única fuente de nitrógeno [36], ratificando los resultados encontrados en este trabajo, donde se logró un mayor rendimiento de azadiractina a partir de callo no embriogénico derivado de tejido foliar, combinando ambos precursores en MS nitróico, lo que potencia la realización de otros estudios in vitro a nivel de biorreactores, a fin de obtener de manera continua este metabolito secundario de importancia bioinsecticida.

4. Conclusiones

Este trabajo es el primer reporte en *Neem* de embriogénesis somática a partir de suspensiones celulares, diferenciando embriones somáticos primarios y secundarios, utilizando altas concentraciones de la citocinina BAP (2 mg/L) combinada con la auxina 2,4-D (1 mg/L) luego de 5 meses de cultivo sin recambio. Mientras que la mayor producción (52,53 mg/L) de AZA en 14 días de cultivo, se logró empleando simultáneamente nitrato (60 mM), acetato de sodio y escualeno (10 mg/L c/u). Estos hallazgos pudieran ser la base de subsiguientes investigaciones en bioreactores, para la micro propagación masiva de plantas elite y la producción a gran escala de este importante metabolito secundario de función bioinsecticida.

Agradecimientos

Al Centro de Biotecnología Aplicada (CBA) del Departamento de Biología de la Universidad de Carabobo (Naguanagua-Edo. Carabobo), por el apoyo en el estudio morfo-histológico y de cultivo *in vitro* en esta investigación.

5. Referencias




- [1] M. Urdaneta, *Neem Un Árbol Milagroso*, 1st ed. Maracaibo-Venezuela: Universidad del Zulia, Facultad de Agronomía, 2001.

- [2] M. Vanisree, C. Lee, S. Lo, S. Nalawade, C. Lin, and H. Tsay, "Studies on the production of some important secondary metabolites from medicinal plants by plant tissue cultures," *Botanical Bulletin of Academia Sinica*, vol. 45, no. 1, pp. 1–22, 2003.
- [3] K. Biswas, I. Chattopadhyay, and R. Banerjee, "Biological activities and medicinal properties of Neem (*Azadirachta indica*)," *Current Science*, vol. 82, no. 11, pp. 1336–1345, 2002.
- [4] R. Bijauliya, S. Alok, D. Chanchal, M. Sabharwal, and R. Yadav, "An Updated review of pharmacological studies on *Azadirachta indica* (Neem)," *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, vol. 9, no. 7, pp. 2645–2655, 2018. [https://doi.org/10.13040/IJPSR.0975-8232.9\(7\).2645-55](https://doi.org/10.13040/IJPSR.0975-8232.9(7).2645-55)
- [5] S. Akbar, *Handbook of 200 Medicinal Plants a comprehensive review of Their traditional medical uses and scientific justifications*, 1st ed. Switzerland: Springer, 2020.
- [6] S. Agrawala, D. Poplib, K. Sircarb, and A. Chowdhry, "Are view of the anti cancer activity of *Azadirachta indica* (Neem) in oral cancer," *Journal of Oral Biology Craniofacial Research*, vol. 10, no. 2, pp. 206–209, 2020. <https://doi.org/10.1016%2Fj.jobcr.2020.04.007>
- [7] M. Gowda, S. Ambardar, and C. Kole, *The Neem Genome*, ed. Switzerland: Springer International Publishing, 2019.
- [8] S. B. M. Dougoud, J.; Toepfer and W. Jenner, "Efficacy of homemade botanical insecticides based on traditional knowledge. A review," *Agronomy of Sustainable Development*, vol. 39, pp. 37–57, 2019. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0583-1>
- [9] N. Joshee, A. Sadanand, and D. Parajuli, *Medicinal Plants From Farm to Pharmacy*, 1st ed. Switzerland: Springer, 2019.
- [10] T. Çalışkan, R. Hatipoğlu, and S. Kirici, "Production of Plant Secondary Metabolites from Cell and Organ Cultures under In vitro Conditions," *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, vol. 7, no. 7, pp. 971–980, 2019.
- [11] F. Orozco, G. Sepúlveda, G. Trejo, A. Zamilpa, and M. Rodríguez, "Oxygen limitations to grow *Azadirachta indica* cell culture in shake flasks," *Revista mexicana de ingeniería química*, vol. 10, no. 3, pp. 343–352, 2011.
- [12] B. Murthy and P. Saxena, "Somatic embryogenesis and plant regeneration of Neem (*Azadirachta indica* A. Juss)," *Plant Cell Report*, vol. 17, no. 6–7, pp. 469–475, 1998. <https://doi.org/10.1007/s002990050427>
- [13] A. Wewetzer, "Callus cultures of *Azadirachta indica* and their potential for the production of azadirachtin," *Phytoparasitica*, vol. 26, no. 1, pp. 7–52, 1998. <https://doi.org/10.1007/BF02981265>
- [14] V. Gautam, K. Nanda, and S. Gupta, "Development of shoots and roots in anther-derived callus of *Azadirachta indica* A. Juss." *Plant Cell, Tissue Organ and Culture*, vol. 34, no. 1, pp. 13–18, 1993. <https://doi.org/10.1007/BF00048458>
- [15] S. Sharry, J. Cabrera, L. Herrera, R. Rangel, S. Ledo, and W. Abedini, "An alternative pathway for plant in vitro regeneration of chinaberry tree *Melia azedarach* L. derived from the induction of somatic embryogenesis," *Journal of Biotechnology Spec Issue*, vol. 9, no. 3, pp. 188–194, 2006.
- [16] T. Thomas and R. Chaturvedi, "Endosperm culture: a novel method for triploid plant production." *Plant Cell Tissue and Organ Culture*, vol. 93, no. 1, pp. 1–14, 2008. <https://doi.org/10.1007/s11240-008-9336-6>
- [17] R. Chaturvedi, M. Razdan, and S. Bhojwani, "In vitro morphogenesis in zygotic embryo cultures of Neem (*Azadirachta indica* A. Juss.)," *Plant Cell Report*, vol. 22, no. 11, pp. 801–809, 2004. <https://doi.org/10.1007/s00299-004-0768-0>
- [18] G. Rout, "In vitro somatic embryogenesis in callus cultures of *Azadirachta indica* A. Juss.- a multipurpose tree," *Journal of Forest Research*, vol. 10, no. 4, pp. 263–267, 2005. <https://doi.org/10.1007/s10310-004-0130-y>
- [19] M. Artigas and R. Fernández, "Establecimiento del sistema de regeneración por embriogénesis somática de *Azadirachta indica* A. Juss." *Acta Biológica Colombiana*, vol. 20, no. 2, pp. 73–83, 2015. <http://dx.doi.org/10.15446/abc.v20n2.44200>
- [20] M. Artigas and R. Fernández, "Morpho-anatomical characterization of secondary somatic embryogenesis in *Azadirachta indica* (Meliaceae)," *Acta Botánica Mexicana*, vol. 122, no. 1, pp. 1–14, 2018. <https://doi.org/10.21829/abm122.2018.1242>
- [21] R. Fernández, A. Villarroel, L. Cuamo, and V. Storaci, "Evaluación de un sistema de regeneración por embriogénesis somática de Neem (*Azadirachta indica*)," *Acta Biológica Colombiana*, vol. 21, no. 3, pp. 581–592, 2016. <https://doi.org/10.15446/abc.v21n3.52626>
- [22] A. Bello, K. Aliabad, A. Saravi, and H. SodaeiZade, "Determination of the Best Culture Medium and plant growth regulators for micropropagation of Neem Tree (*Azadirachta indica* A.Juss)," *International Journal of Horticultural Science and Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 237–245, 2022. <https://doi.org/10.22059/IJHST.2021.322456.463>
- [23] G. N. S. Dhandapani, B.; Ramasamy and K. Kalyanasundaram, "Regeneration potential of different explants during micropropagation of neem tree (*Azadirachta indica* A. Juss)," *Journal of Phytology*, vol. 13, pp. 171–177, 2021. <https://doi.org/10.25081/jp.2021.v13.7352>
- [24] D. Thakore and A. Srivastava, "Review: Production of biopesticide azadirachtin using plant cell and hairy root cultures," *Engineering in Life Sciences*, vol. 17, pp. 997–1005, 2017. <https://doi.org/10.1002/elsc.201700012>
- [25] S. Srivastava and A. Srivastava, "Statistical medium optimization for enhanced azadirachtin production

- in hairy root culture of *Azadirachta indica*,” *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*, vol. 48, pp. 73–84, 2011. <https://doi.org/10.1007/s11627-011-9395-y>
- [26] S. Srivastava and A. Srivastava, “Azadirachtin production by hairy root cultivation of *Azadirachta indica* in a modified stirred tank reactor,” *Bioprocess and Biosystem Engineering*, vol. 35, pp. 1549–1553, 2012. <https://doi.org/10.1007/s00449-012-0745-x>
- [27] S. Srivastava and A. Srivastava, “In Vitro azadirachtin production by hairy root cultivation of *Azadirachta indica* in nutrient mist bioreactor,” *Applied Biochemistry and Biotechnology*, vol. 166, no. 2, pp. 365–378, 2012. <https://doi.org/10.1007/s12010-011-9430-9>
- [28] S. Srivastava and A. Srivastava, “Strategies to overcome oxygen transfer limitations during hairy root cultivation of *Azadirachta indica* for enhanced azadirachtin production,” *Applied Biochemistry and Biotechnology*, vol. 167, p. 1818–1830, 2012. <https://doi.org/10.1007/s12010-011-9531-5>
- [29] S. Srivastava, A. Srivastava, and R. Palavalli, “Development of a mathematical model for growth and oxygen transfer in in vitro plant hairy root cultivations,” *Applied Biochemistry and Biotechnology*, vol. 167, pp. 1831–1844, 2012. <https://doi.org/10.1007/s12010-011-9515-5>
- [30] S. Srivastava and A. Srivastava, “Production of the biopesticide azadirachtin by hairy root cultivation of *Azadirachta indica* in liquid-phase bioreactors,” *Applied Biochemistry and Biotechnology*, vol. 171, pp. 1351–1361, 2013. <https://doi.org/10.1007/s12010-013-0432-7>
- [31] S. Srivastava and A. Srivastava, “Effect of elicitors and precursors on azadirachtin production in hairy root culture of *Azadirachta indica*,” *Applied Biochemistry and Biotechnology*, vol. 172, pp. 2286–2297, 2014. <https://doi.org/10.1007/s12010-013-0664-6>
- [32] F. Orozco and M. Rodríguez, “Cultivos de células en suspensión de *Azadirachta indica* para la producción de un bioinsecticida,” *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, vol. 6, no. 3, pp. 251–258, 2007.
- [33] T. Kuruvilla, P. Komaraiiah, and V. Ramakrishna, “Enhanced secretion of azadirachtin by permeabilized margosa (*Azadirachta indica*) cells,” *Indian Journal of Experimental Biology*, vol. 37, pp. 89–91, 1999.
- [34] J. Bedoya and R. Hoyos, “Efecto de la Relación Agitación-Aireación sobre el Crecimiento Celular y la Producción de Azadiractina en Cultivos Celulares de *Azadirachta indica* A. Juss,” *Revista de la Facultad Nacional de Agronomía (Medellin)*, vol. 63, no. 1, pp. 5293–5305, 2010.
- [35] K. Balaji, C. Veeresham, K. Srisilam, and C. Kokate, “Azadirachtin, a novel biopesticide from cell cultures of *Azadirachta indica*,” *Journal of Plant Biotechnology*, vol. 5, no. 2, pp. 121–129, 2003.
- [36] G. Prakash and A. Srivastava, “Statistical media optimization for cell growth and azadirachtin production in *Azadirachta indica* (A. Juss) suspension cultures,” *Process and Biochemistry*, vol. 40, no. 12, p. 3795–3800, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.05.010>
- [37] M. Rodríguez, R. Festucci, L. Campos, and W. Campos, “Azadirachtin biosynthesis induction in *Azadirachta indica* A. Juss cotyledonary calli with elicitor agents,” *Brazilian Archives of Biology and Technology*, vol. 57, no. 2, pp. 155–162, 2014. <https://doi.org/10.1590/S1516-89132014000200001>
- [38] L. Sánchez, “Escalamiento del cultivo de células en suspensión de *azadirachta indica* (neem) en biorreactor tanque agitado para la producción de azadiractina,” Requisito parcial para optar al título de Licenciada en Ingeniería en Biotecnología, Escuela de Biología del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica, 2016.
- [39] R. Fernández, J. Salomón, A. Villarroel, and V. Montilla, “Evaluation of the in vitro production of azadirachtin in Neem according to the type of callus and chemical agents,” *Revista Ingeniería UC*, vol. 28, no. 2, pp. 282–293, 2021. <https://doi.org/10.54139/revinguc.v28i2.27>
- [40] N. Rafiq, M. Ali, M. Malhi, O. Aksoy, S. Ahmed, and M. Umar, “Production of azadirachtin contents from immature flowers derived in vitro cultures of *Azadirachta indica* A. Juss,” *Fresenius Environmental Bulletin*, vol. 26, no. 3, pp. 2056–2063, 2017.
- [41] R. Farjaminezhad and G. Garoosi, “Improvement and prediction of secondary metabolites production under yeast extract elicitation of *Azadirachta indica* cell suspension culture using response surface methodology,” *AMB Express*, vol. 11, pp. 43–59, 2021. <https://doi.org/10.1186/s13568-021-01203-x>
- [42] R. Fernández, L. Hermoso, and A. Menéndez, “Primary and secondary somatic embryogenesis in leaf sections and cell suspensions of *Coffea arabica* cv. Catimor,” *Interciencia 2005*, vol. 30, no. 11, pp. 694–698, 2005.
- [43] D. Barrek, O. Paise, and M. Grenier-Loustalot, “Analysis of Neem oil by LC-MS and degradation kinetics of azadirachtin-A in a controlled environment. Characterization of degradation products by HPLC-MS-MS,” *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, vol. 378, no. 3, pp. 753–763, 2004. <https://doi.org/10.1007/s00216-003-2377-0>
- [44] R. Fernández, P. Ramírez, J. Silva, V. Storaci, L. Cuamo, Z. D. Guglielmo, and G. Smits, “Establecimiento de un sistema de selección in vitro de variedades venezolanas de arroz (*Oryza sativa* L.) resistentes al hongo *Pyricularia grisea*,” *Acta biológica Colombiana*, vol. 22, pp. 85–100, 2017. <https://doi.org/10.15446/abc.v22n1.56933>
- [45] D. Sharma, P. Kaur, G. Singh, D. Singh, S. Verma, and J. Singh, “Development and Validation of Stability Indicating UV-Visible Spectrophotometric Method for simultaneous Estimation of Neem (*Azadirachtin*) and

- Curcumin in Pharmaceutical Tablet Dosage form,” *Analytical Chemistry Letters*, vol. 9, no. 4, pp. 564–581, 2019. <https://doi.org/10.1080/22297928.2019.1652113>
- [46] J. Dai, V. Yaylayan, V. Raghavan, and J. Pare, “Extraction and Colorimetric Determination of Azadirachtin-Related Limonoids in Neem Seed Kernel,” *Journal of Agricultural Food Chemical*, vol. 47, pp. 3738–3742, 1999. <https://doi.org/10.1021/jf990227h>
- [47] T. Singh, S. Haq, S. Salman, A. Namreen, and A. Rasheed, “Analytical Method Validation of Azadirachtin Extracted From *Azadirachta Indica*,” *International Journal of Applied Pharmaceutical Sciences and Research*, vol. 2, no. 4, pp. 99–106, 2017. <https://doi.org/10.21477/ijapsr.v2i04.9552>
- [48] O. Hammer, A. David, T. Harper, and P. Ryan, “PAST: Paquete de programas de estadística paleontológica para enseñanza y análisis de datos,” *Version. 2.17. Palaeontologia Elec*, vol. 4, no. 1, p. 9, 2001.
- [49] W. K. Y. Su, W.; Hwang and Y. Sagawa, “Induction of somatic embryogenesis in *Azadirachta indica*,” *Plant Cell, Tissue culture and Organ*, vol. 50, no. 2, pp. 91–95, 1997. <https://doi.org/10.1023/A:1005891113815>
- [50] G. Shekhawat, S. Mathur, and A. Batra, “Role of phytohormones and nitrogen in somatic embryogenesis induction in cell culture derived from leaflets of *Azadirachta indica*,” *Biologia Plantarum*, vol. 53, no. 4, pp. 707–710, 2009. <https://doi.org/10.1007/s10535-009-0127-7>
- [51] P. Das, “In Vitro Somatic Embryogenesis in Some Oil Yielding Tropical Tree Species,” *American Journal of Plant Sciences*, vol. 2, no. 1, pp. 217–222, 2011. <https://doi.org/10.4236/ajps.2011.22023>
- [52] A. Fehér, “Somatic embryogenesis—stress-induced remodeling of plant cell fate,” *Biochim Biophys Acta, Genetic Regulation Mech.*, vol. 1849, no. 4, pp. 385–402, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.bbagr.2014.07.005>
- [53] E. Reis, T. Batista, and J. Canhoto, “Effect and analysis of phenolic compounds during somatic embryogenesis induction in *Feijoa sellowiana* Berg,” *Protoplasma*, vol. 232, no. 3–4, pp. 193–202, 2008. <https://doi.org/10.1007/s00709-008-0290-2>
- [54] G. Prakash, C. Emmanuel, and A. Srivastava, “Variability of azadirachtin in *Azadirachta indica* (Neem) and batch kinetics studies of cell suspensions culture,” *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, vol. 10, no. 3, pp. 198–204, 2005. <https://doi.org/10.1007/BF02932013>
- [55] K. Raval, S. Hellwig, G. Prakash, A. Ramos, A. Srivastava, and J. Biichs, “Necessity of a two-stage process for the production of azadirachtin-related limonoids in suspension cultures of *Azadirachta indica*,” *Journal of Bioscience and Bioengineering*, vol. 96, no. 1, pp. 16–22, 2003. [https://doi.org/10.1016/S1389-1723\(03\)90091-0](https://doi.org/10.1016/S1389-1723(03)90091-0)
- [56] N. Saxena and Y. Kumar, “Chemistry of Azadirachtin and other Bioactive Isoprenoids from Neem (*Azadirachta indica* A. Juss),” in *Neem. A Treatise*, ed., K. Singh K., S. Phogat, A. Tomar, and R. S. Dhillon, Eds. Nueva Delhi, India: I. K. International, 2008, pp. 208–231.
- [57] S. Srivastava and A. Srivastava, “In vitro Azadirachtin Production,” in *Bioactive Molecules and Medicinal Plants*, 1st ed., K. G. Ramawat and J. M. Mérillon, Eds. New York-USA: Springer Science & Business Media, 2008.
- [58] G. Prakash and A. Srivastava, “Integrated yield and productivity enhancement strategy for biotechnology production of azadirachtin by suspension culture of *Azadirachta indica*,” *Asia-pacific, Journal of Chemical Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 129–137, 2011. <https://doi.org/10.1002/apj.482>
- [59] M. Arias, A. Angarita, J. Aguirre, J. Restrepo, and C. Montoya, “Estrategias para incrementar la producción de metabolitos secundarios en cultivos de células vegetales,” *Revista de la Facultad Nacional de Agronomía (Medellin)*, vol. 62, no. 1, pp. 4881–4895, 2009.
- [60] C. Ramage and R. Williams, “Mineral nutrition and plant morphogenesis,” *In Vitro Cellular and Developmental Biology- Plant*, vol. 38, no. 2, pp. 116–124, 2002. <https://doi.org/10.1079/IVP2001269>
- [61] G. Sivakumar, K. Yu, and K. Paek, “Production of biomass and ginsenosides from adventitious roots of *Panax ginseng* in bioreactor cultures,” *Engineering in Life Science*, vol. 5, no. 4, pp. 333–342, 2005. <https://doi.org/10.1002/elsc.200520085>
- [62] D. Zhao, J. Xing, M. Li, D. Lu, and Q. Zhao, “Optimization of growth and jaceosidin production in callus and cell suspension cultures of *Saussurea medusa*,” *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, vol. 67, no. 3, pp. 227–234, 2001. <https://doi.org/10.1023/A:1012770623153>
- [63] J. Wang and R. Tan, “Artemisinin production in *Artemisia annua* hairy root cultures with improved growth by altering the nitrogen source in the medium,” *Biotechnology Letters*, vol. 24, no. 14, pp. 1153–1156, 2002.

STATIS-CNS2: an exploratory analysis technique for qualitative non-symmetric data

Jennyfer Combariza * , Guillermo Ramírez , Maura Vasquez 

Área de Postgrado en Estadística y Actuariado de la Facultad de Ciencias Económicas y Sociales de la Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.



<https://doi.org/10.54139/revinguc.v29i2.174>

Abstract.- The problem raised in this research focuses on the search for a methodology, based on STATIS, that allows comparing and simultaneously explaining the influence of an explanatory qualitative variable x as determinant of a criterion categorical variable y on H occasions. To this end, a Frobenius scalar product is defined between the objects, which allows us to conceptualize a statistical distance between objects, based on the Goodman-Kruskal statistic τ .

An application of the proposed technique on a set of real data from the financial field is also presented made up of 4 blocks of paired data, where each block contains the measurement of two qualitative variables on a sample of 20316 individuals, with the purpose of measuring the impact it has on the information emanating from the Colombian credit bureaus the segmentation used for the calculation of provisions both in local accounting and accounting under IFRS9 regulations.

Keywords: STATIS; τ Goodman-Kruskal; non-symmetric correspondence analysis.

STATIS-CNS2: una técnica de análisis exploratorio para datos no simétricos cualitativos

Resumen.- El problema planteado en esta investigación se centra en la búsqueda de una metodología, basada en el STATIS, que permita comparar y explicar simultáneamente la influencia que tiene una variable cualitativa explicativa x como determinante de una variable categórica criterio y en H ocasiones. Con este fin se define un producto escalar tipo Frobenius entre los objetos, que permite conceptualizar una distancia estadística entre objetos, en función del estadístico τ de Goodman-Kruskal.

Se presenta además una aplicación de la técnica propuesta sobre un conjunto de datos reales del ámbito financiero conformado por 4 bloques de datos apareados, donde cada bloque contiene la medición de dos variables cualitativas sobre una muestra de 20316 individuos, con el propósito de medir el impacto que tiene sobre la información emanada de las centrales de riesgo colombianas la segmentación utilizada para el cálculo de provisiones tanto en la contabilidad local como contabilidad bajo normativa NIIF9.

Palabras clave: STATIS; τ de Goodman-Kruskal; análisis de correspondencias no simétrico.

Received: 01 de julio, 2022.

Accepted: 03 de agosto, 2022.

1. Introducción

En el mundo de la ciencia de datos, saber qué datos tenemos y cómo los podemos utilizar es un tema determinante para la solución de problemas no sólo en el ámbito académico. Por esta razón el disponer de diversas herramientas de análisis exploratorio es clave. La técnica que vamos a

presentar en este artículo es una herramienta de análisis exploratorio que permite representar un conjunto particular de datos cualitativos no simétricos longitudinales en un único espacio de representación.

D'Ambra y Lauro [1] han propuesto el análisis de correspondencias no simétrico (ACNS) para obtener un espacio de representación de datos cualitativos no simétricos. Esta técnica, basada en la descomposición del estadístico τ de Goodman-Kruskal, plantea obtener estimaciones mínimo cuadráticas de una variable cualitativa y , obtenidas al proyectarla ortogonalmente sobre el espacio generado por las modalidades de una variable x . En

* Autor para correspondencia:

Correo-e: jennyfer.combariza@gmail.com (J. Combariza)

el caso que se disponga la medición de estas dos variables en diferentes instantes de tiempo surge la necesidad de analizar varios conjuntos de datos y realizar un estudio comparativo de sus estructuras, lo que nos lleva al problema de cómo trasladar los resultados de los distintos ACNS a un único espacio de representación.

La conocida metodología STATIS (Structuration des Tableaux A Trois Indices de la Statistique También conocido como ACT. ACT: Analyse Conjointe de Tableaux) fue inicialmente diseñada para el tratamiento de información generada al caracterizar n individuos según p variables continuas en H ocasiones diferentes y simétricas.

La propuesta que se ofrece STATIS-CNS2 (Las siglas CNS2 significa que se está estudiando un escenario cualitativo, no simétrico con asociación medida a través del τ de Goodman-Kruskal y el dos significa que son analizadas sólo dos variables: una variable criterio y como función de una variable independiente x) tiene como propósito fundamental exhibir un espacio de representación único que permita analizar los cambios que se producen en la influencia que tiene una variable explicativa categórica x sobre una variable categórica a explicar y , a lo largo de H ocasiones.

La organización de este artículo es la siguiente:

- El objetivo de la sección 1.1 de preliminares, es presentar la visión estratégica del STATIS-CNS2. Para esto se debe partir de la visión estratégica del STATIS clásico, seguidamente se enseña la configuración de los datos que se requieren para el análisis de correspondencias no simétrico (ACNS), se muestra un resumen de las etapas del ACNS de los profesores D'Ambra y Lauro [1], se describe el τ de Goodman-Kruskal y finalmente se presenta la visión estratégica de la investigación.
- En la sección 2 se presenta todo el fundamento teórico para la comprensión de la Metodología STATIS-CNS2.
- En la sección 3 se expone una aplicación del STATIS-CNS2 sobre una muestra de datos reales.

1.1. Preliminares

En esta sección presentamos los conceptos básicos requeridos para poder entender la adaptación desarrollada: uno de ellos es la configuración de datos, es importante que el lector tenga claro qué características deben tener los datos para poder ser analizados con STATIS-CNS2. Otro concepto importante es entender las etapas a seguir para realizar el análisis de correspondencias no simétrico (ACNS) así como el uso del τ de Goodman-Kruskal para evaluar la intensidad de la fuerza con que una variable cualitativa explica a otra. Finalmente pero no menos importante presentamos la propuesta de la estrategia ICI (Interestructura - Compromiso - Intraestructura) para este caso particular.

1.1.1. STATIS: estrategia ICI

La metodología del análisis multivariante denominada STATIS inicialmente introducida por Escoufier [2] se sustenta en las propiedades de operadores asociados a H diferentes matrices de datos cuantitativos en un escenario simétrico. El STATIS es un procedimiento de análisis en etapas, mediante una estrategia denominada ICI (interestructura - compromiso - intraestructura). Esto quiere decir que se lleva a cabo un procedimiento de tres fases que responde a los objetivos de:

1. Identificar los bloques de información que son similares (**interestructura**).
2. Proveer un bloque resumen (**compromiso**).
3. Describir las diferencias o similitudes entre los individuos sobre un espacio compromiso (**intraestructura**).

En la Figura 2 se presenta un resumen de la estrategia ICI para el STATIS.

1.1.2. Configuración de los datos en el ACNS

En el ACNS (análisis de correspondencias no simétrico) se consideran dos variables cualitativas x e y :

1. Una variable explicativa x con p modalidades $A_1, \dots, A_i, \dots, A_p$.
2. Una variable explicada y con q modalidades $B_1, \dots, B_j, \dots, B_q$.

Así mismo, se considera $(\mathbf{x}_h, \mathbf{y}_h)$, $h = 1, \dots, H$, bloques apareados no simétricos, que contienen la medición de dos variables cualitativas sobre n individuos.

Las variables cualitativas son observadas sobre los mismos n individuos en H ocasiones. En el caso de diseños longitudinales se utilizará el término ocasión para identificar cada uno de los h posibles instantes de medición, en tanto que los términos situación y condición se reservarán para los casos en que h no esté vinculado al paso del tiempo sino a clasificaciones conceptuales propias a los significados que tengan las variables que se estén analizando. Para fines de desarrollo teórico utilizamos el término ocasión.

Para cada ocasión h , los valores observados de las variables x e y sobre los n individuos pueden organizarse sobre matrices disyuntivas completas de la forma:

$$X_h = (x_{sih})_{1 \leq s \leq n, 1 \leq i \leq p} \quad Y_h = (y_{sjh})_{1 \leq s \leq n, 1 \leq j \leq q}$$

siendo, según las ecuaciones (1), (2):

$$x_{sih} = \begin{cases} 1 & \text{si el individuo } s \text{ presenta la } \\ & i\text{-ésima modalidad de la} \\ & \text{variable } x \text{ en la} \\ & h\text{-ésima ocasión} \\ 0 & \text{en otro caso.} \end{cases} \quad (1)$$

$$y_{sjh} = \begin{cases} 1 & \text{si el individuo } s \text{ presenta la } \\ & j\text{-ésima modalidad de la} \\ & \text{variable } y \text{ en la} \\ & h\text{-ésima ocasión} \\ 0 & \text{en otro caso.} \end{cases} \quad (2)$$

A lo largo de esta investigación indicar que el individuo s presenta la i -ésima modalidad de la variable x en la h -ésima ocasión es equivalente a indicar que el individuo s presenta la modalidad A_i de la variable x en la h -ésima ocasión. Lo anterior vale también para las modalidades de la variable y en la h -ésima ocasión, por simplicidad utilizaremos j -ésima modalidad para indicar la modalidad B_j en la h -ésima ocasión. En la Figura 1 $k_{.j}$ es el número de individuos que presentan la modalidad B_j de la variable y y satisfacen la condición $\sum_{j=1}^q k_{.j} = n$ y $k_{.j}$ es el número de individuos que presentan la modalidad B_j de la variable y y satisfacen la condición $\sum_{j=1}^q k_{.j} = n$.

1.1.3. Índice de Goodman-Kruskal

Un aspecto central en esta investigación tiene que ver con analizar la influencia que la variable categórica \mathbf{x} (con p modalidades) ejerce sobre la variable categórica \mathbf{y} (q modalidades), y estudiar los cambios que pudieran producirse a lo largo de varias ocasiones.

En esta sección presentaremos un índice estadístico τ de Goodman-Kruskal [3] que nos permite obtener una medida de la intensidad de la fuerza con que la variable \mathbf{x} explica a la \mathbf{y} . El mismo, tiene la siguiente representación, de acuerdo con la ecuación (3) :

$$\tau_{\mathbf{y} \cdot \mathbf{x}} = \frac{\sum_{j=1}^q \sum_{i=1}^p \frac{f_{ij}^2}{f_{i.}} - \sum_{j=1}^q f_{.j}^2}{1 - \sum_{j=1}^q f_{.j}^2}, \quad (3)$$

donde $f_{.j} = \frac{k_{.j}}{n}$, $f_{i.} = \frac{k_{i.}}{n}$, $f_{ij} = \frac{k_{ij}}{n}$.

1.1.4. Análisis interno de cada bloque con un enfoque ACNS

El tratamiento analítico de la información dentro del bloque h , plantea efectuar un ACNS [1], lo que implica analizar la variabilidad de \mathbf{y}_h explicada por \mathbf{x}_h , mediante la descomposición del estadístico $\tau_{\mathbf{y}_h \cdot \mathbf{x}_h}$ de Goodman-Kruskal, de acuerdo con las siguientes etapas:

Etapas. Para cada ocasión h , se obtienen las estimaciones mínimo cuadráticas de \mathbf{y}_h , sobre el espacio generado por las modalidades de la variable \mathbf{x}_h , expresada en la ecuación (4):

$$\tilde{\mathbf{Y}}_h = \mathbf{X}_h (\mathbf{X}_h^t \mathbf{X}_h)^{-1} \mathbf{X}_h^t \mathbf{Y}_h. \quad (4)$$

En este arreglo, la estimación mínimo cuadrática que corresponde a la variable \mathbf{y}_h en un individuo en el que está presente la modalidad i de la variable \mathbf{x}_h queda definida por el vector de probabilidades condicionales estimadas:

$$(\tilde{P}(\mathbf{y}_h = 1 | \mathbf{x}_h = i) \cdots \tilde{P}(\mathbf{y}_h = j | \mathbf{x}_h = i) \cdots \tilde{P}(\mathbf{y}_h = q | \mathbf{x}_h = i))$$

El centro de gravedad de las filas de $\tilde{\mathbf{Y}}_h$ es el vector:

$$(\tilde{P}(\mathbf{y}_h = 1) \cdots \tilde{P}(\mathbf{y}_h = j) \cdots \tilde{P}(\mathbf{y}_h = q))$$

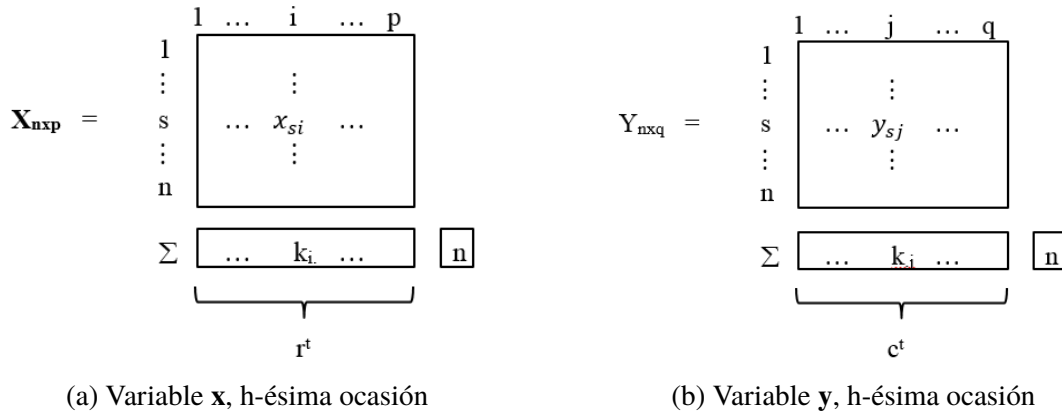


Figura 1: Matrices disyuntivas h -ésima ocasión

La matriz de estimaciones centrada \tilde{Y}_{ch} , expresada en la ecuación (5):

$$\tilde{Y}_{ch} = (P_{X_h} - P_m)Y_h \quad (5)$$

tiene como fila genérica:

$$\begin{aligned} & (\tilde{P}(y_h = 1 | x_h = i) - P(y_h = 1)) \\ & \dots \tilde{P}(y_h = j | x_h = i) - P(y_h = j) \\ & \dots \tilde{P}(y_h = q | x_h = i) - P(y_h = q) \end{aligned}$$

Etapa 2. Se construye el cociente entre la variabilidad de las estimaciones mínimo cuadráticas (variabilidad explicada) y la variabilidad total de la variable y_h , encontrándose que este cociente coincide con el estadístico de Goodman-Kruskal:

1. Variabilidad total $VT(h)$: según la ecuación (6)

$$VT(h) = \text{traza}(Y_{ch}^t Y_{ch}) \quad (6)$$

2. Variabilidad explicada $VE(h)$: según la ecuación (7)

$$VE(h) = \text{traza}(\tilde{Y}_{ch}^t \tilde{Y}_{ch}) \quad (7)$$

3. τ de Goodman-Kruskal (8):

$$\begin{aligned} \tau_{y_h \cdot x_h} &= \frac{VE(h)}{VT(h)} \\ &= \frac{n}{\sum_{j=1}^q \sum_{i=1}^p \frac{f_{ijh}^2}{f_{i \cdot h}} - \sum_{j=1}^q f_{\cdot jh}^2} \end{aligned} \quad (8)$$

Etapa 3. Se determinan las direcciones principales de un ACNS obtenidas mediante la descomposición espectral de la matriz $\tilde{Y}_h^t \tilde{Y}_h$ que a su vez genera una descomposición de $\tau_{y_h \cdot x_h}$ en sumandos, cada uno de los cuales mide la porción de la variabilidad de y_h explicada por x_h , captada por la correspondiente dirección principal.

Con este fin se obtienen los autovalores y autovectores de la matriz $\tilde{Y}_h^t \tilde{Y}_h$:

$$\tilde{Y}_h^t \tilde{Y}_h v^{\alpha_h} = \lambda_{\alpha_h} v^{\alpha_h}, \alpha_h = 1, \dots, q, h = 1, \dots, H$$

Calculando además para cada dirección el cociente $\frac{\lambda_{\alpha_h}}{\tau_{y_h \cdot x_h}}$. Este cociente mide la proporción de la variabilidad de y_h explicada por x_h , captada por la α_h -ésima dirección principal.

Etapa 4. Para cada ocasión h , se construye una representación biplot de las filas (probabilidades condicionales de $y|x = i$ para las distintas modalidades de la variable y) y las columnas (probabilidades condicionales de $y = j$ para las distintas modalidades de la variable x) de la matriz \tilde{Y}_h . El vector de proyección de las filas sobre el eje α_h :

$$\begin{aligned} \psi^{\alpha_h} &= \tilde{Y}_h v^{\alpha_h}, \\ \alpha_h &= \mathbf{1}, \dots, \mathbf{q}, \\ \mathbf{h} &= \mathbf{1}, \dots, \mathbf{H} \end{aligned}$$

así que la proyección de un individuo s que posea la modalidad i de x_h (proyección de la i -ésima modalidad de x_h) viene dada por:

$$\psi_{s\alpha_h} = \sum_{j=1}^q v_{j\alpha_h} (P(y_h = j | x_h = i)),$$

$$\alpha_h = 1, \dots, q,$$

$$h = 1, \dots, H$$

y las coordenadas de proyección de las columnas de la j -ésima modalidad de \mathbf{y}_h :

$$\varphi_{j\alpha_h} = v_{j\alpha_h}, \quad \mathbf{j}, \alpha_h = 1, \dots, q, \quad \mathbf{h} = 1, \dots, H$$

1.1.5. STATIS-CNS2: Estrategia ICI

En el caso de esta investigación en particular se pretende comparar la variabilidad de la variable \mathbf{x}_h en función de la variable \mathbf{y}_h , entre H ocasiones, en términos del coeficiente $\tau_{y_h \cdot x_h}$ de Goodman - Kruskal.

Para ello se procede a construir un marco semejante al de la metodología STATIS, que permita extender el análisis a objetos que contengan toda la información necesaria para reconstruir el coeficiente $\tau_{y_h \cdot x_h}$ de Goodman - Kruskal en cada bloque no simétrico $(\mathbf{x}_h, \mathbf{y}_h)$, $h = 1, \dots, H$.

Así las cosas, se propone un símil de la estrategia denominada ICI (Interestructura - Compromiso - Intraestructura) para este caso en particular. Esto quiere decir que se lleva a cabo un procedimiento de tres fases que responde a los objetivos de:

1. Identificar los bloques de información $(\mathbf{x}_h, \mathbf{y}_h)$, $h = 1, \dots, H$, que son similares entre sí. (**interestructura**).
2. Construir un marco de representación común a todos los bloques de información $(\mathbf{x}_h, \mathbf{y}_h)$, $h = 1, \dots, H$, (**compromiso**).
3. Describir las diferencias o similitudes entre los individuos (**intraestructura**), utilizando como pieza fundamental el ACNS para analizar el comportamiento de los individuos en cada ocasión y los bloques que de alguna manera expliquen las razones o causas de las semejanzas y/o diferencias entre los individuos.

En la Figura 2 se presenta un resumen de la estrategia ICI para el STATIS.

En la siguiente sección se presentan los elementos teóricos necesarios para efectuar la

adaptación del STATIS a la problemática planteada en esta investigación.

2. Metodología STATIS-CNS2

En esta sección se presenta un resumen de los distintos elementos requeridos para el desarrollo de la metodología, para más detalle de los cálculos contemplados en esta sección se recomienda consultar el capítulo 3 en [4].

2.1. Elementos básicos del STATIS-CNS2

Definición 1 El estudio para el h -ésimo bloque se define como la tripleta $E_h = ((\mathbf{X}_h, \mathbf{Y}_h), \mathbf{M}_h, \mathbf{D}_h)$, donde:

1. \mathbf{X}_h y \mathbf{Y}_h , son las matrices disyuntivas correspondientes a las variables cualitativas \mathbf{x} e \mathbf{y} , en la h -ésima ocasión sobre n individuos.
2. $\mathbf{M}_h = (\mathbf{X}_h^t \mathbf{X}_h)^{-1}$ es una matriz definida positiva que define la métrica utilizada para construir las distancias entre los individuos.
3. $\mathbf{D}_h = \frac{1}{\sqrt{VT(h)}} \mathbf{I}_n$ siendo $VT(h)$ la variabilidad total de \mathbf{y} en el bloque h .

Definición 2 (Definición de objeto no simétrico)

Dado el estudio para el h -ésimo bloque E_h , se define el objeto no simétrico de acuerdo con la ecuación (9):

$$\mathbf{W}_h = \mathbf{X}_h \mathbf{M}_h \mathbf{X}_h^t \mathbf{Y}_h = (\mathbf{P}_{\mathbf{X}_h} - \mathbf{P}_m) \mathbf{Y}_h \quad (9)$$

donde la c indica en este caso que el arreglo correspondiente está centrado, $\mathbf{P}_{\mathbf{X}} = \mathbf{X}(\mathbf{X}^t \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^t$, donde $\mathbf{P}_{\mathbf{X}}$ es la matriz de proyección sobre el espacio generado por las modalidades de la x en la h -ésima ocasión. y $\mathbf{P}_m = \frac{(jj^t)}{n}$, siendo $j = (1, \dots, 1)^t$.

El objeto \mathbf{W}_h resulta ser una matriz de orden $(n \times n) \times (n \times q) = n \times q$. Como puede observarse el orden de este arreglo resulta independiente de p , el número de modalidades de la variable explicativa, más si depende del número de individuos bajo estudio y el número de modalidades q de las

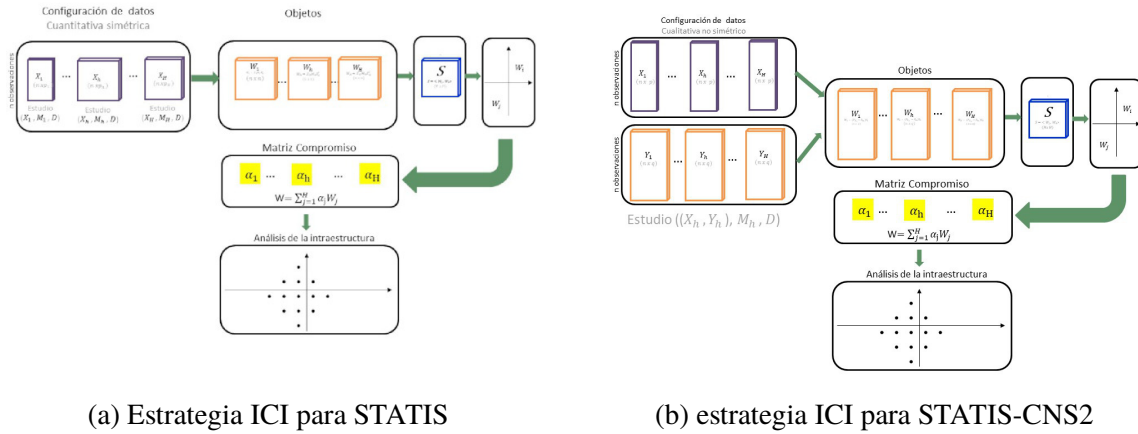


Figura 2: Estrategia ICI de cada una de las metodologías

variables criterio. Estos objetos no son matrices cuadradas como en el STATIS clásico y menos aún simétricas.

El número de columnas del bloque del objeto depende del número de modalidades de la variable categórica y , las columnas de \mathbf{W}_h , se definen mediante la notación \mathbf{W}_{lh} para $l = 1, \dots, q$. Cada vector \mathbf{W}_{lh} , $l = 1, \dots, q$ contiene las estimaciones mínimo-cuadráticas de la variable criterio y , medida en la ocasión h , en función de las variables explicativas \mathbf{x} .

Definición 3 (producto escalar de Frobenius)

Se define el producto escalar de tipo Frobenius entre dos matrices \mathbf{W}_h y \mathbf{W}_l , de dimensión $n \times q$, según la ecuación (10):

$$\langle \mathbf{W}_h | \mathbf{W}_l \rangle_{FCNS2} = \text{traza}((\mathbf{D}_h \mathbf{W}_h)^t \mathbf{D}_l \mathbf{W}_l) = \text{traza}(\mathbf{W}_h^t \mathbf{D}_h \mathbf{D}_l \mathbf{W}_l) \quad (10)$$

con rango de valores sobre la recta real, tanto positivos como negativos.

2.1.1. Producto escalar Frobenius en el momento h

El producto escalar Frobenius en el momento h se expresa según la ecuación (11):

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{W}_h | \mathbf{W}_h \rangle_{FCNS2} &= \text{traza}((\mathbf{D}_h \mathbf{W}_h)^t \mathbf{D}_h \mathbf{W}_h) \\ &= \frac{1}{\sqrt{VT(h)VT(h)}} \text{traza}(\tilde{\mathbf{Y}}_{ch}^t \tilde{\mathbf{Y}}_{ch}) \\ &= \tau_{y_h \cdot x_h} \end{aligned} \quad (11)$$

así que el producto escalar de un objeto consigo mismo, en la h -ésima ocasión, indica una relación de variabilidad o asociación entre variables medido a través del $\tau_{y_h \cdot x_h}$.

2.1.2. Producto escalar Frobenius en los momentos h y l

El producto escalar Frobenius en los momentos h y l se expresa según la ecuación (12).

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{W}_h | \mathbf{W}_l \rangle_{FCNS2} &= \text{traza}((\mathbf{D}_h \mathbf{W}_h)^t \mathbf{W}_l \mathbf{D}_l) \\ &= \text{traza}(\mathbf{W}_h^t \mathbf{D}_h \mathbf{D}_l \mathbf{W}_l) \\ &= \frac{1}{\sqrt{VT(h)VT(l)}} \text{traza}(\tilde{\mathbf{Y}}_{ch}^t \tilde{\mathbf{Y}}_{cl}) \end{aligned} \quad (12)$$

Este producto queda definido como función de las covarianzas entre las estimaciones de y en el bloque h y en el bloque l .

Definición 4 (Distancia entre objetos) Se define una distancia entre objetos basada en la norma dada de forma natural por el producto escalar de Frobenius, expresado en la ecuación (13):

$$\begin{aligned}
 d_{FCNS2}^2(\mathbf{W}_h, \mathbf{W}_l) &= \|\mathbf{W}_h - \mathbf{W}_l\|_{FCNS2}^2 \\
 &= \tau_{y_h \cdot x_h} + \tau_{y_l \cdot x_l} \\
 &\quad - 2\langle \mathbf{W}_h | \mathbf{W}_l \rangle_{FCNS2}
 \end{aligned} \tag{13}$$

donde el último término es una medida de la covarianza entre las estimaciones de \mathbf{y} en ambos bloques. De modo que mientras mayor sea esta covariabilidad, menor será la distancia entre las representaciones de los bloques. Es decir, es posible cuantificar en una medida de distancia D_{FCNS2} , las diferencias existentes entre las estructuras definidas por las estimaciones mínimo-cuadráticas del bloque de las q variables criterio en dos ocasiones diferentes que son

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} \langle \mathbf{W}_1 | \mathbf{W}_1 \rangle_{FCNS2} & \cdots & \langle \mathbf{W}_1 | \mathbf{W}_i \rangle_{FCNS2} & \cdots & \langle \mathbf{W}_1 | \mathbf{W}_H \rangle_{FCNS2} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \langle \mathbf{W}_i | \mathbf{W}_1 \rangle_{FCNS2} & \cdots & \langle \mathbf{W}_i | \mathbf{W}_i \rangle_{FCNS2} & \cdots & \langle \mathbf{W}_i | \mathbf{W}_H \rangle_{FCNS2} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \langle \mathbf{W}_H | \mathbf{W}_1 \rangle_{FCNS2} & \cdots & \langle \mathbf{W}_H | \mathbf{W}_i \rangle_{FCNS2} & \cdots & \langle \mathbf{W}_H | \mathbf{W}_H \rangle_{FCNS2} \end{pmatrix}$$

Sustituyendo las expresiones que definen a \mathbf{W}_h y \mathbf{W}_l , el término general queda expresado según la ecuación (14):

$$\begin{aligned}
 S_{hl} &= \frac{1}{\sqrt{VT(h)VT(l)}} \text{traza}(\tilde{\mathbf{Y}}_{ch}^t \tilde{\mathbf{Y}}_{cl}) \\
 &= \frac{1}{\sqrt{VT(h)VT(l)}} \text{traza}(\mathbf{Y}_h^t (\mathbf{P}_{X_h}^t \mathbf{P}_{X_l} - \mathbf{P}_m) \mathbf{Y}_l)
 \end{aligned} \tag{14}$$

donde \mathbf{P}_{X_h} es la matriz de proyección sobre el espacio generado por las modalidades de la \mathbf{x} en la h -ésima ocasión y así mismo $\tilde{\mathbf{Y}}_h = (\tilde{\mathbf{Y}}_{(1,h)}, \dots, \tilde{\mathbf{Y}}_{(q,h)})$ e $\tilde{\mathbf{Y}}_l = (\tilde{\mathbf{Y}}_{(1,l)}, \dots, \tilde{\mathbf{Y}}_{(q,l)})$ son las proyecciones de las \mathbf{y} sobre el espacio generado por las modalidades de las \mathbf{x} en las ocasiones h y l .

Un resultado muy importante es que sobre la diagonal principal de la matriz \mathbf{S} se encuentran los índices de asociación de Goodman-Kruskal correspondientes a cada uno de los H pares de

obtenidas en función de los correspondientes bloques de variables explicativas.

A continuación, se presenta el análisis que permite obtener la representación euclídea de los objetos \mathbf{W}_h , $h = 1, \dots, H$.

2.1.3. Espacio de representación de la interestructura

Se define a continuación un arreglo matricial que contiene los productos escalares de Frobenius entre los objetos de los distintos bloques.

Definición 5 (Matriz de productos escalares \mathbf{S})
 Se denotará mediante \mathbf{S} a la matriz de orden $H \times H$ que contiene los productos escalares de Frobenius entre los objetos dos a dos:

bloques, expresados en la ecuación (15):

$$S_{hh} = \frac{1}{VT(h)} \text{traza}(\mathbf{Y}_h^t (\mathbf{P}_{X_h} - \mathbf{P}_m) \mathbf{Y}_h) \tag{15}$$

La construcción de la matriz \mathbf{S} se hace para obtener por un lado un gráfico comparativo del nivel de asociación de los bloques apareados, y por otro lado ser una herramienta que facilita la reconstrucción de las distancias entre los objetos en el espacio euclídeo usual, con una interpretación de interés a los efectos del análisis.

La traza de la matriz \mathbf{S} es en sí misma una medida de la asociación contenida entre los H bloques bajo estudio.

El elemento S_{hl} fuera de la diagonal principal de la matriz \mathbf{S} , constituye una medida agregada de las covarianzas entre las estimaciones mínimo-cuadráticas de la variable criterio y en las ocasiones h y l . En efecto, quedando expresado en la ecuación (16).

$$\begin{aligned} \text{traza}(\mathbf{W}_h^t \mathbf{W}_h) &= \frac{1}{VT(h)} \text{traza}(\tilde{\mathbf{Y}}_h^t \tilde{\mathbf{Y}}_h) \\ &= \sum_{j=1}^q \tilde{\mathbf{Y}}_{jh}^t \tilde{\mathbf{Y}}_{jh} \end{aligned} \quad (16)$$

Como indicamos previamente la matriz que define las representaciones en el STATIS-CNS2 es la matriz \mathbf{S} que contienen los productos escalares de Frobenius entre objetos de los distintos bloques. Con la finalidad de construir un espacio de representación óptimo para los objetos \mathbf{W}_h se realiza un análisis de componentes principales sobre \mathbf{S} , determinado por las direcciones principales que definen los índices de asociación de Goodman-Kruskal $\tau_{y_h \cdot x_h}$. De esta manera el posicionamiento de un bloque apareado en ese espacio, determinado por su distancia al origen de coordenadas, deberá ser medida por una variación del índice de asociación de Goodman-Kruskal del bloque en cuestión, según la ecuación (17):

$$\begin{aligned} \|\mathbf{W}_h\|_{FCNS2}^2 &= \text{traza}(\mathbf{W}_h^t \mathbf{W}_h) \\ &= \frac{VE(h)}{VT(h)} = \tau_{y_h \cdot x_h} \end{aligned} \quad (17)$$

Se efectúa la descomposición espectral de esta matriz \mathbf{S} con el propósito de hallar un espacio de representación para los objetos de los distintos bloques. Se obtienen entonces los autovalores y autovectores: $SG^\alpha = t_\alpha G^\alpha$, $\alpha = 1, 2, \dots, H$.

Es decir la descomposición espectral de \mathbf{S} , queda descrita mediante la expresión $\mathbf{S} = \mathbf{G}\mathbf{T}\mathbf{G}^t$, siendo $\mathbf{G} = (\mathbf{G}^1, \dots, \mathbf{G}^h, \dots, \mathbf{G}^H)$ la matriz cuyas columnas son los autovectores de la matriz \mathbf{S} asociados con los correspondientes autovalores ordenados de forma descendente y organizados sobre la diagonal de la matriz:

$$\begin{pmatrix} t_1 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & t_h & \cdots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & t_H \end{pmatrix}$$

encontrándose con esta factorización la posibilidad de descomponer el índice de asociación de Goodman-Kruskal (18):

$$\text{traza}(\mathbf{S}) = \sum_{\alpha=1}^H \tau_{y_\alpha \cdot x_\alpha} = \sum_{\alpha=1}^H t_\alpha \quad (18)$$

Es decir, al diagonalizar la matriz $\mathbf{Y}_h^t (\mathbf{P}_{X_h} - \mathbf{P}_m) \mathbf{Y}_h$ se obtiene que la traza de la matriz \mathbf{S} es $\sum_{\alpha=1}^H \tau_{y_\alpha \cdot x_\alpha}$, donde cada autovalor está asociado con una dirección principal del análisis de correspondencias no simétrico (ACNS). Por lo tanto, la h -ésima dirección de este espacio, G^α , capta una porción igual a: $\frac{t_\alpha}{\sum_{\alpha=1}^H \tau_{y \cdot x_h}}$ de la medida global en que la x explica a la y a lo largo de los bloques.

2.2. Construcción de un objeto compromiso

El objeto compromiso resulta ser una pieza fundamental de análisis en la metodología STATIS. El propósito del objeto compromiso es el de realizar una comparación global de las H ocasiones. Este objeto es requerido en un intento de establecer un espacio de referencia sobre el cual sea posible representar a todos los elementos de interés en el análisis, que se denomina espacio compromiso. El objeto en referencia se construye como un promedio ponderado de los objetos que identifican a los diferentes bloques de datos $(\mathbf{x}_h, \mathbf{y}_h)$, $h = 1, \dots, H$, en el que los coeficientes usualmente se definen en función de las coordenadas del autovector de la matriz S , asociado al primer autovalor.

Se plantea construir el objeto compromiso como una combinación lineal de los objetos de la forma en la ecuación (19)

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_{\text{comp}} &= \sum_{h=1}^H \alpha_h \mathbf{W}_h \\ &= \sum_{h=1}^H \alpha_h \tilde{\mathbf{Y}}_{ch} \\ &= \sum_{h=1}^H \alpha_h (\mathbf{P}_{X_h} - \mathbf{P}_m) \mathbf{Y}_h \end{aligned} \quad (19)$$

de manera que se maximice globalmente una medida de covarianza con los objetos analizados

en el sentido del producto interno definido sobre los objetos según la ecuación (20):

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{W}_h | \mathbf{W}_1 \rangle_{FCNS2} &= \text{traza}(\mathbf{W}_h^t \mathbf{D}_h \mathbf{D}_1 \mathbf{W}_1) \\ &= \frac{1}{\sqrt{VT(h)VT(l)}} \text{traza}(\tilde{\mathbf{Y}}_{ch}^t \tilde{\mathbf{Y}}_{cl}^t) \end{aligned} \quad (20)$$

La función objetivo entonces, es de la forma: $\sum_{h=1}^H \langle \mathbf{W}_{comp} | \mathbf{W}_h \rangle_{FCNS2}^2 = \alpha^t \mathbf{S} \mathbf{S}^t \alpha$, con la restricción: $\sum_{h=1}^H \alpha_h^2 = 1$.

La expresión definida \mathbf{W}_{comp} destaca la naturaleza del objeto compromiso, en la que cada sumando es, salvo un escalar, la proyección de \mathbf{Y}_h , sobre las columnas de \mathbf{X}_h correspondiente, siendo por lo tanto el compromiso de dimensión $n \times q$, perteneciente al espacio generado por las matrices $\mathbf{W}_1, \dots, \mathbf{W}_h, \dots, \mathbf{W}_H$.

El problema reside en la determinación del vector $\alpha^t = (\alpha_1, \dots, \alpha_h, \dots, \alpha_H)$ de coeficientes del objeto compromiso.

Se considera en primer lugar que: $\langle \mathbf{W}_{comp} | \mathbf{W}_1 \rangle_{FCNS2} = \langle \sum_{h=1}^H \alpha_h \mathbf{W}_h | \mathbf{W}_1 \rangle_{FCNS2} = \alpha^t \mathbf{S}^l$. siendo \mathbf{S}^l la l-ésima columna de la matriz de productos interno \mathbf{S} . Por lo tanto la función a maximizar es $\sum_{l=1}^H \langle \mathbf{W}_{comp} | \mathbf{W}_1 \rangle_{FCNS2}^2 = \alpha^t \mathbf{S} \mathbf{S}^t \alpha = \alpha^t \mathbf{S}^2 \alpha$ sujeto a que α sea un vector normalizado.

Para hallar el vector que maximice la expresión, con la condición dada se define el lagrangiano $L = \alpha^t \mathbf{S} \mathbf{S}^t \alpha - \lambda(\alpha^t \alpha - 1)$

La solución se obtiene de la forma usual: $\frac{\partial L}{\partial \alpha} = 2\mathbf{S} \mathbf{S}^t \alpha - 2\lambda \alpha = 0 \Rightarrow \mathbf{S} \mathbf{S}^t \alpha = \lambda \alpha$

Por lo tanto el vector de α de coeficientes buscado es el autovector normalizado de la matriz simétrica $\mathbf{S} \mathbf{S}^t$ asociado con su mayor autovalor $(t_1)^2$, en la forma:

$$\alpha = \frac{\mathbf{G}^1}{\|\mathbf{G}^1\|_{FCNS2}} = \frac{\mathbf{G}^1}{(\mathbf{G}^{1t} \mathbf{G}^1)^{1/2}}$$

3. Aplicación del STATIS-CNS2

Según publica la Superintendencia Financiera de Colombia en el capítulo 2 de la circular externa básica contable y financiera 100 de 1995

<https://www.superfinanciera.gov.co/publicacion> el riesgo de crédito (RC) es la posibilidad de que una entidad incurra en pérdidas y se disminuya el valor de sus activos, como consecuencia de que un deudor o contraparte incumpla sus obligaciones.

Por lo anterior, las entidades financieras deben establecer esquemas eficientes de administración y control del riesgo de crédito al que se exponen en el desarrollo del negocio, en consonancia con su propio perfil de riesgo, segmentación de mercado, según las características de los mercados en los que opera y de los productos que ofrece; por lo tanto es necesario que cada entidad desarrolle su propio esquema de trabajo, que asegure la calidad de sus activos y además permita identificar, medir, controlar (mitigar) y monitorear la materialización de los diferentes riesgos a los que están expuestas como bancos.

3.1. Configuración de los datos

En esta sección se ilustra la técnica propuesta, aplicándola sobre un conjunto de datos reales referidos a dos variables cualitativas $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2$ e \mathbf{y} , medidas sobre 20316 individuos a lo largo de los 4 trimestres correspondientes al año 2020. Las variables consideradas son:

1. Una variable \mathbf{x}_1 que corresponde a la calificación de riesgo (a nivel de cliente) de cada cliente con 5 modalidades: A, B, C, D y E.
2. Una variable \mathbf{x}_2 que corresponde al staging de riesgo (a nivel de cliente) de cada cliente con 3 modalidades: stage1, stage2 y stage3.
3. Una variable \mathbf{y} que corresponde a un estado de riesgo (a nivel de cliente) que establece la entidad con información externa. Esta variable tiene 4 modalidades o categorías: Estado 1, Estado 2, Estado 3 y Estado 4.

Se parte del supuesto que: (1) la calificación interna del riesgo de cada cliente (variable \mathbf{x}_1) explica de alguna manera el estado obtenido con información externa (variable \mathbf{y}) y (2) el staging-NIIF9 de cada cliente (variable \mathbf{x}_2) explica de alguna manera el estado obtenido con información externa (variable \mathbf{y}).

A lo largo de esta sección, se detallan los bloques de datos explicando su estructura lógica, explorando en las siguientes secciones por un lado el bloque (x_{1h}, y_h) y por el otro el bloque (x_{2h}, y_h) , $h = 1, \dots, 4$, desde el punto de vista de la metodología STATIS-CNS2.

3.1.1. Definición de variables

A continuación presentaremos la definición detallada de cada variable.

1. Calificación del riesgo crediticio.

(variable x_1) Según la norma de la SuperFinanciera de Colombia <https://www.superfinanciera.gov.co/publicacion> los contratos deben clasificarse en una de las siguientes categorías de riesgo crediticio: categoría A o “riesgo normal”, categoría B o “riesgo aceptable, superior al normal”, categoría C o “riesgo apreciable”, categoría D o “riesgo significativo” y categoría E o “riesgo de incobrabilidad”.

Para más detalle de la definición de esta variable consulte el capítulo 4 de [4].

2. Staging de riesgo (variable x_2)

La NIIF 9 (Norma Internacional de Información Financiera 9, <https://www.bis.org/press/p161011.htm>) establece una serie de reglas y definiciones para los cálculos de provisiones a través de la pérdida esperada de los instrumentos financieros. Su correcta implementación requiere un conjunto de reglas y parámetros, entre ellos la definición de staging de los clientes al momento de cada fecha de reporte.

- Stage 3: Se considerará que el cliente se encuentra en stage 3 si satisface alguna de las siguientes condiciones: default > 60 días y calificación de riesgo D y E.
- Stage 2: el cliente se encuentra en este stage si satisface alguna de las siguientes condiciones: default > 30 días, o cuando la calificación es mayor a A, es decir, su valor puede ser B, C, D o E o cuando la calificación es A y la altura de mora es mayor a 16 días.

- Stage 1: Lo que no cumpla con las condiciones anteriores.

3. **Estado de riesgo (variable y)** Segmentación que realiza la entidad financiera para realizar un seguimiento a todos los clientes compartidos (Los clientes compartidos son aquellos que mantienen una operación vigente con la entidad y que, adicionalmente, presentan al menos una obligación con otra entidad del sector financiero), a partir del comportamiento de pago que estos presenten, tanto dentro de la entidad como en el sector financiero (esta variable incorpora datos de la central de riesgo. (La central de riesgo es una empresa privada, independiente de las instituciones financieras, de las comerciales y de las gubernamentales, que tiene como fin concentrar y proporcionar a sus empresas afiliadas, la información referente al comportamiento que han tenido las personas en sus créditos)) . Las entidades financieras utilizan los servicios de las centrales de riesgo porque esta información proporciona una innovadora herramienta de apoyo a la toma de decisiones en la evaluación, prevención del riesgo crediticio y gestión de clientes. Estos servicios, aunque no son gratuitos, le permiten el acceso de manera sencilla a la más actualizada y completa base de datos de información de incumplimientos.

- a) Estado 1: constituido por aquellos clientes que al ser consultados en las centrales de riesgo en el trimestre cumplen sus obligaciones financieras con el sector y cumplen con la entidad.
- b) Estado 2: constituido por aquellos clientes que al ser consultados en las centrales de riesgo en el trimestre incumplen sus obligaciones financieras con el sector y cumplen con la entidad.
- c) Estado 3: constituido por aquellos clientes que al ser consultados en las centrales de riesgo en el trimestre cumplen sus obligaciones financieras con el sector e incumplen con la entidad.

- d) Estado 4: constituido por aquellos clientes que al ser consultados en las centrales de riesgo en el trimestre incumplen sus obligaciones financieras con el sector e incumplen con la entidad.

Es importante observar que la variable x_1 es una variable con normativa colombiana utilizada por las entidades financieras para el cálculo de provisiones en contabilidad local mientras que la variable x_2 es utilizada para el cálculo de provisiones en contabilidad de normativa internacional.

3.1.2. Descripción de la muestra analizada

La muestra analizada forma parte de un estudio trimestral de endeudamiento que realiza una entidad financiera. Se trabaja con $n=20316$ clientes que fueron observados trimestralmente durante 12 meses ($H=4$ trimestres). Para fines prácticos utilizaremos la notación $2020T_i$, $i = 1, \dots, 4$, para indicar el i -ésimo trimestre del año 2020. Los $n=20316$ clientes fueron evaluados en cada trimestre en cada una de las variables mencionadas (estado de riesgo, calificación de riesgo y staging).

3.1.3. Análisis univariado de los datos

El año 2020 el coronavirus Covid-19, produjo un gran impacto financiero a nivel mundial. Esto se puede apreciar fácilmente en la distribución que vemos en las Tablas 1, 2 y 3. Los clientes deterioraron tanto en calificación como en staging de riesgo. No obstante, se observa un aumento más acentuado para los stages en los trimestres 3 y 4 (9% y 17%). Dado que este aumento representa un gran impacto en el cálculo de provisiones bajo contabilidad NIIF9 para la entidad, se solicita hacer un análisis exploratorio más detallado de los datos para detectar si existe algún error en el proceso de obtención de los datos o si estos valores son los correctos y efectivamente la junta directiva debe hacer frente a estos valores de provisiones.

3.2. Índice de Goodman-Kruskal

El analista de datos al recibir la solicitud de hacer un análisis exploratorio detallado, decide estudiar la influencia (por separado) que las variables

categorías calificación (x_1) y staging (x_2) ejercen sobre la variable estado de riesgo (y), y estudiar los cambios que pudieran producirse a lo largo de 2020. Para esto decide utilizar el índice estadístico τ de Goodman-Kruskal para medir la intensidad de la fuerza con la cual, por un lado, la variable calificación explica el estado de riesgo y por el otro, la intensidad con la cual la variable staging explica el estado de riesgo.

Los resultados están expuestos en la figura 3, como podemos apreciar la intensidad de la fuerza con la cual, la calificación explica el estado de riesgo es superior en los 4 trimestres a la intensidad de la fuerza con la que el staging explica el estado de riesgo. Además los valores del índice de Goodman-Kruskal en el caso de NIIF9 es inferior al 30% en todo el año. El analista de datos sugiere que se debe realizar una revisión de las variables utilizadas para el cálculo de la calificación de riesgo para los trimestres 2 y 3 del año 2020 porque los valores del índice de Goodman-Kruskal bajan drásticamente a 20,1% y 9,68%, respectivamente. Presentando valores por encima del 70% para los trimestres 1 y 4.

Con este primer análisis exploratorio la información debe ser evaluada por un perfil de ingeniería de datos, quien al consultar el origen de los datos confirma que la información es correcta y recomienda hablar con el dueño del proceso para ver si algún proceso macroeconómico puede estar causando este comportamiento en los datos.

3.3. Análisis interno de cada bloque con un enfoque ACNS

El analista de datos, decide continuar con el análisis exploratorio. Tomando en consideración la configuración de los datos, decide realizar un análisis de correspondencias no simétrico (ACNS). Al examinar los gráficos de biplot del ACNS (Figura 4) se ve principalmente que para los trimestres 1 y 4: los clientes con calificación A están asociados al estado 1, los clientes con calificación B están asociados a los estado 3 y 2, y las calificaciones C, D y E al estado 4. En cambio para los trimestres 2 y 3 hay muchos clientes con calificación B, C, D E y estado de riesgo 1. Dado que este resultado no es el esperado y ya se ha

Tabla 1: Comportamiento de la variable calificación de riesgo cliente a lo largo del período de tiempo bajo estudio -Centro de gravedad de la nube de perfiles fila (en $R^p, p = 5$).

	2020T1		2020T2		2020T3		2020T4	
A	19785	97 %	19666	97 %	18962	93 %	18159	89 %
B	326	2 %	389	2 %	963	5 %	667	3 %
C	60	0 %	27	0 %	145	1 %	616	3 %
D	67	0 %	49	0 %	63	0 %	546	3 %
E	78	0 %	185	1 %	183	1 %	328	2 %
Total	20316	100 %	20316	100 %	20316	100 %	20316	100 %

Observe que a medida que se avanza en el tiempo los clientes migran de calificación de riesgo bajas a calificaciones de riesgo altas, esto es medido a través del vector de centro de gravedad de esta variable.

Tabla 2: Comportamiento de la variable staging de riesgo cliente a lo largo del período de tiempo bajo estudio -Centro de gravedad de la nube de perfiles fila (en $R^p, p = 3$).

	2020T1		2020T2		2020T3		2020T4	
Stage1	18797	93 %	18574	91 %	15548	77 %	15504	76 %
Stage2	762	4 %	684	3 %	2907	14 %	1403	7 %
Stage3	757	4 %	1058	5 %	1861	9 %	3409	17 %
Total	20316	100 %	20316	100 %	20316	100 %	20316	100 %

Observe que a medida que se avanza en el tiempo los clientes migran de staging de riesgo bajos a staging de riesgo altos, esto es medido a través del vector de centro de gravedad de esta variable.

Tabla 3: Comportamiento de la variable estado de riesgo cliente a lo largo del período de tiempo bajo estudio-Centro de gravedad de la nube de perfiles columna (en $R^q, q = 4$).

	2020T1		2020T2		2020T3		2020T4	
Estado 1	19774	97 %	18805	93 %	18485	91 %	18160	89 %
Estado 2	18	0 %	866	4 %	1362	7 %	280	1 %
Estado 3	228	1 %	361	2 %	285	1 %	779	4 %
Estado 4	296	1 %	284	1 %	184	1 %	1097	5 %
Total	20316	100 %	20316	100 %	20316	100 %	20316	100 %

Observe que a medida que se avanza en el tiempo los clientes migran de estados de riesgo bajos a estados de riesgo altos, esto es medido a través del vector de centro de gravedad de esta variable.

validado que los datos son correctos, se procede a hacer una análisis STATIS-CNS2 para determinar si un plano de representación único pueda aportar más información.

3.4. STATIS-CNS2: Estrategia ICI

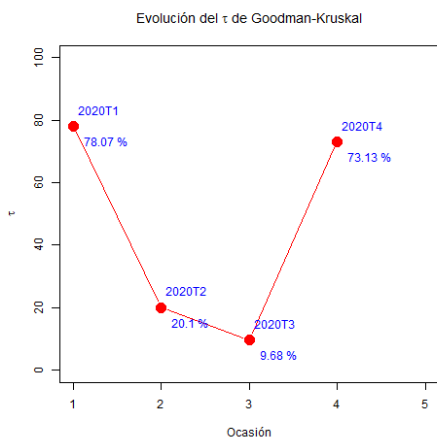
3.4.1. Matriz S

En la Figura 5 (5a, 5b), se puede apreciar que en el plano factorial obtenido en la descomposición de la matriz S, se forman dos grupos, un primer grupo constituido por la información de los trimestres 1 y 4, y otro grupo constituido por los trimestres 2 y 3. Adicional en la figura relacionada con el plano del Staging los puntos están más cerca del origen de coordenadas, este resultado va de la mano con el hecho que τ de Goodman-Kruskal toma

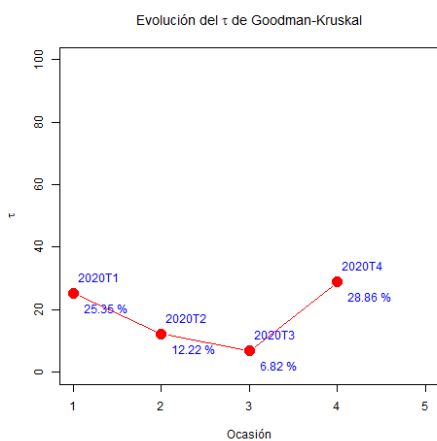
valores muy bajos para la relación no simétrica entre Staging-Estado. A partir de la matriz S se hace la reconstrucción de las distancias entre los objetos (5c, 5d), pudiendo apreciar fácilmente que el objeto W_4 está más alejado de los objetos W_1, W_2 y W_3 (con ambas variables).

3.4.2. Compromiso

El propósito fundamental por el cual el analista de datos realiza la construcción de la matriz compromiso, es disponer de una herramienta que permita realizar una comparación global en los 4 trimestres, es un intento de poder establecer un espacio de referencia sobre el cual sea posible representar a todos los clientes de interés en el análisis.



(a) Calificación-Estado



(b) Staging-Estado

Figura 3: Evolución de τ de Goodman-Kruskal

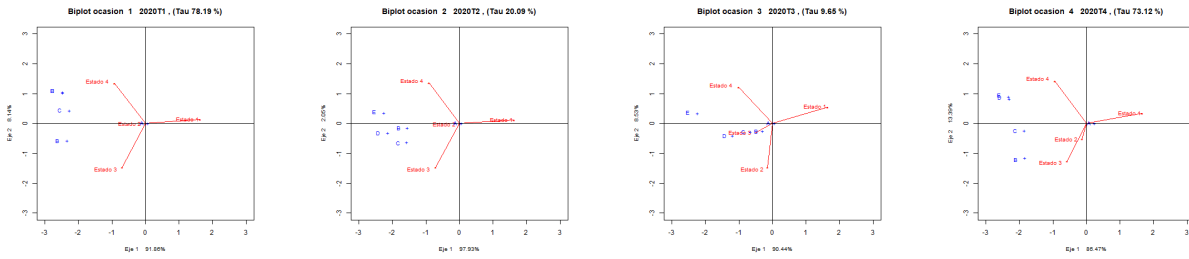
De la Figura 6a podemos deducir que los clientes son segmentados en 4 cuadrantes. De la relación calificación-estado de riesgo se deduce:

- Para el primer cuadrante: tiene 822 clientes (4 % del total). 618 clientes (75 % del total cuadrante) comienzan la calificación de riesgo A (2020T₁) y terminan en calificaciones D y E (2020T₄). Para estos clientes los estados de riesgo comienzan en los perfiles 1 y 2 (2020T₁) y terminan en perfiles 3 y 4 (2020T₄).
- En el segundo cuadrante hay 17684 clientes (87 % del total). De los cuales 16337 clientes (92 % del total cuadrante) se caracterizan por tener la combinación calificación A-Estado 1 en los 4 trimestres (resultado esperado).

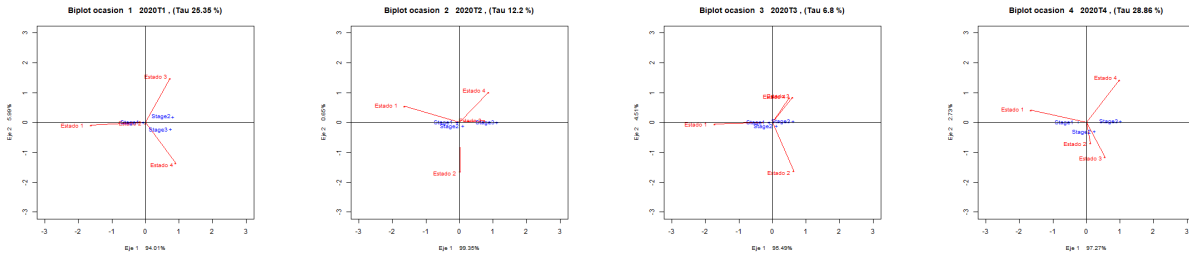
- En el tercer Cuadrante hay 349 clientes (2 % del total). 289 clientes (83 % del total cuadrante) tienen la combinación calificación A-Estado de riesgo tipo 1 (a excepción del trimestre 2020T₃ que presentan calificación A con Estados diferentes al perfil 1).
- Finalmente en el cuarto cuadrante hay 1461 clientes (7 % del total). 950 clientes (65 % del total cuadrante) comienzan el primer trimestre (2020T₁) con calificaciones A,B y estado de riesgo 1 y finalizan el 4to trimestre (2020T₄) con calificaciones distintas de A y estados de riesgo diferentes al 1 (se deterioran).

Por otro lado, de la relación calificación-estado de riesgo utilizando 6b podemos deducir que los clientes son segmentados en 4 cuadrantes:

- Para el primer cuadrante: tiene 13740 clientes (68 % del total). 12951 clientes (94 % del total cuadrante) presentan la combinación stage 1 y estado de riesgo 1, en los 4 trimestres bajo estudio.
- En el segundo cuadrante hay 2852 clientes (14 %). De los cuales 1037 clientes (36 % del total cuadrante) se caracterizan por iniciar el primer trimestre (2020T₁) con la combinación stage1-estado 1 y terminar en el último trimestre (2020T₄) en stage 3 y estado de riesgo distinto de 1. 907 clientes (32 % del total cuadrante) que comienzan en stage 1 (2020T₁) y terminan (2020T₄) en stage 3 pero el estado de riesgo siempre es 1 (en los 4 trimestres)(resultado no esperado). 402 clientes (14 % del total cuadrante) que en los 4 trimestres están en stage3 y tienen estado de riesgo 1 (resultado no esperado).
- En el tercer Cuadrante hay 2244 clientes (11 % del total). 920 clientes (41 % del total cuadrante) tienen la combinación stage 1 en 2020T₁, terminan en stage 2 en 2020T₄ y siempre tienen estado de riesgo 1.
- Finalmente en el IV cuadrante hay 1480 clientes (7 % del total). 1038 clientes (70 % del total cuadrante) en los trimestres 2020T₁,



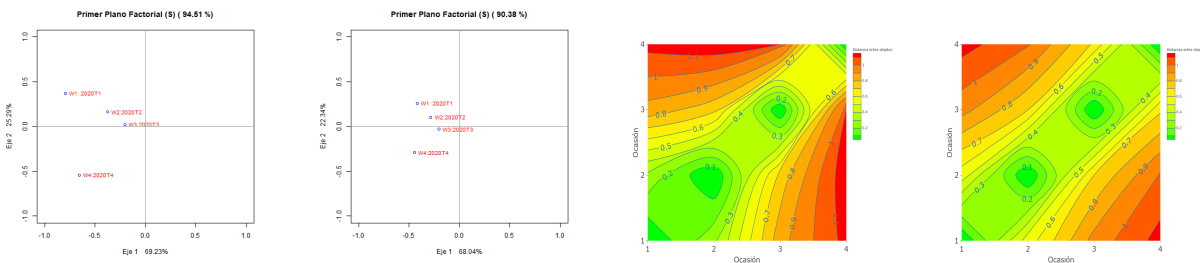
(a) 2020T₁. Calificación- Estado (Tau 78.19 %) (b) 2020T₂. Calificación- Estado (Tau 20.09 %) (c) 2020T₃. Calificación- Estado (Tau 9.66 %) (d) 2020T₄. Calificación- Estado (Tau 72.12 %)



(e) 2020T₁. Staging- Estado (Tau 25.35 %) (f) 2020T₁. Staging- Estado (Tau 12.2 %) (g) 2020T₁. Staging- Estado (Tau 6.6 %) (h) 2020T₁. Staging- Estado (Tau 28.86 %)

Figuras superiores: cuando la calificación interna del riesgo de cada cliente (variable x_1) explica de alguna manera el estado de riesgo. Figuras inferiores: cuando el staging de cada cliente (variable x_2) explica de alguna manera el estado obtenido con información externa (variable y)

Figura 4: Análisis de correspondencias no simétrico (ACNS) de los bloques apareados de información (x_h, y_h) , $h = 1, \dots, H = 4$.



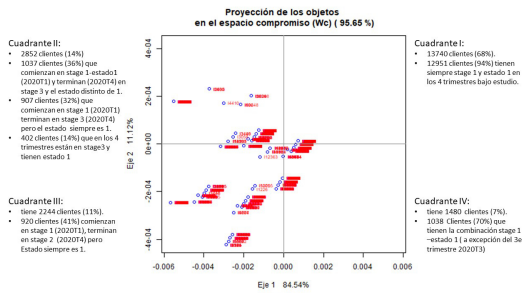
(a) Plano Factorial S. Calificación- Estado (Tau 94.51 %) (b) Plano Factorial S. Staging- Estado (Tau 90.38 %) (c) Mapa de distancia entre objetos. Calificación- Estado (d) Mapa de distancia entre objetos. Staging- Estado

Figura 5: Herramientas para el análisis: Primer plano factorial S y Mapa de distancia entre objetos. Caso a: cuando la calificación interna del riesgo de cada cliente (variable x_1) explica de alguna manera el estado de riesgo. Caso b: cuando el staging de cada cliente (variable x_2) explica de alguna manera el estado de riesgo obtenido con información externa (variable y)

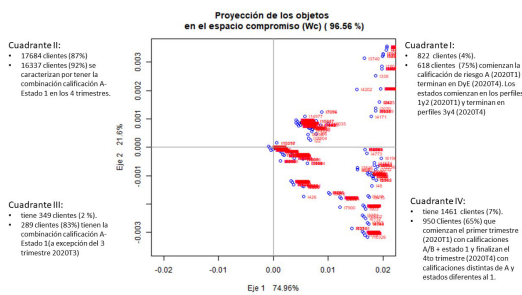
2020T₂ y 2020T₄ tienen la combinación stage 1-estado de riesgo 1. A excepción del 3er trimestre (2020T₃) donde presentan valores de alto riesgo.

3.4.3. Conclusiones de la aplicaciones

Como queda en evidencia el realizar directamente un análisis exploratorio utilizando la metodología STATIS-CNS2, permite al analista de datos, por una lado, identificar visualmente qué



(a) Plano Compromiso. Calificación-Estado



(b) Plano Compromiso. Staging-Estado

Figura 6: Gráfico superior: cuando la calificación interna del riesgo de cada cliente (variable x_1) explica de alguna manera el estado obtenido con información externa (variable y). Gráfico inferior: cuando el staging de cada cliente (variable x_2) explica de alguna manera el estado obtenido con información externa (variable y)

conjunto de datos son parecidos y/o diferentes entre sí, y por el otro, permite apreciar la intensidad de la fuerza con que las variables explican al estado de riesgo (Figura 5). Una vez identificados las diferencias y/o similitudes entre los bloques de datos, el beneficio de esta técnica de análisis exploratorio es la obtención de un espacio de referencia sobre el cual es posible representar a todos los clientes de interés en el análisis (Figuras 6a y 6b).

Para finalizar el ejemplo debemos indicar que durante el año 2020 debido a la pandemia en Colombia desde marzo de ese año, cuando se declaró el aislamiento obligatorio, el Gobierno colombiano a través de la superintendencia financiera lanzó diversas alternativas a fin de aliviar los impactos financieros causados por el COVID-19. Una de tales medidas fue realizar una normalización artificial de la cartera, en el sentido

que personas que entraron en mora durante ese período de tiempo, quedaban marcadas con 0 días a nivel de sistema. Este proceso de alivio, afecto directamente variables que dependían en su cálculo de los días de mora del cliente. Por esta razón el analista de datos detectó un comportamiento atípico en sus resultados, especialmente para los trimestres 2020T₂ y 2020T₃.

El disponer de herramientas de análisis exploratorio como el STATIS-CNS2 permite detectar no sólo que existe un problema a nivel de variables sino permite ubicar exactamente cuáles son los clientes donde se nota el comportamiento atípico. Una vez que se valida la calidad de los datos y el experto de negocio ayuda a entender que el resultado es correcto, el analista de datos debe dejar nota de esta información ya que el siguiente paso es analizar si esos clientes se van o no se van a eliminar para la construcción de futuros modelos estadísticos que vayan a incluir en su desarrollo información del año 2020.

Finalmente, como conclusión de este ejercicio con datos reales los resultados de provisiones tanto en contabilidad local como internacional son correctos y la junta directiva debe hacer frente al desembolso de las mismas.

4. Conclusiones

Con esta investigación se aporta una técnica de análisis exploratorio que permite adaptar la metodología STATIS para efectuar la comparación simultánea de los objetos que identifican las estructuras de interdistancias correspondientes a H ocasiones de bloques cualitativos, bajo una perspectiva no simétrica.

La tarea de mayor envergadura con la que nos enfrentamos consistió en definir un producto escalar adecuado entre objetos que permitiese comparar las estructuras que describen las interdistancias entre individuos caracterizados por los diferentes conjuntos de variables cualitativas. Adicionalmente el producto escalar permitió por un lado definir y conceptualizar una distancia estadística entre objetos y por el otro construir un espacio de baja dimensión, donde es posible efectuar comparaciones entre los diferentes conjuntos

de datos con relaciones no simétricas evaluados en términos del estadístico $\tau_{y_h \cdot x_h}$ de Goodman-Kruskal.

La propuesta planteada en esta investigación da origen a nuevas preguntas y formulación de otros problemas, pudiendo convertirse en un línea para futuras investigaciones. El hecho de desarrollar la adaptación para dos variables cualitativas explicativas y/o diferentes individuos pero mismas variables, abren fácilmente problemas para tesis doctorales y/o postdoctorales.

5. Referencias

- [1] N. Lauro, “L’analyse non symetrique des correspondances,” in *Data Analysis and Informatics III*, ed., E. . C. Diday, Ed. North-Holland: Elsevier, 1984.
- [2] Y. Escoufier, “Objectifs et procédures de l’analyse conjointe de plusieurs tableaux de données,” in *Statistique et Analyse des Données*, ed. France: Association pour la statistique et ses utilisations, 1985, vol. 10, no. 1, pp. 1–10.
- [3] L. Goodman and W. Kruskal, “Measures of association for cross classifications, IV: simplification of asymptotic variances,” *Journal of the american statistical association*, vol. 67, no. 338, pp. 415–421, 1972. <https://doi.org/10.2307/2284396>
- [4] J. Combariza, “Una adaptación del método statis para el análisis no simétrico de bloques de variables cualitativas,” Tesis doctoral, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela, 2019.

Design and implementation of a performance scheme for an e-learning platform

Yaneth Moreno ^{*,a} , Gustavo Mejía ^b , Francisco Hidrobo ^c 

^a CEMISID, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

^b Departamento de Computación, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

^c Departamento de Computación Escuela de Ciencias Matemáticas y Computacionales, Universidad de Tecnología Experimental Yachay Hacienda San José s/n Proyecto Yachay. San Miguel de Urucuquí, Imbabura, Ecuador.



<https://doi.org/10.54139/revinguc.v29i2.281>

Abstract.- This article proposes the implementation of a transactional scheme for the optimization of access to digital resources (documents, multimedia files, among others) within an e-learning platform, using Moodle as a case study. The transactional schema consists of an extension created to act as an intermediary between the user interface of the e-learning platform and the libraries that manage the storage of data and resources. Additionally, request recommendations on the busiest assets on the platform from an external system. On the other hand, it implements an in-memory database, using radis, in which the most downloaded files by users are stored.

Keywords: Storage System; Transactional Scheme; VLE; Moodle.

Diseño e implementación de un esquema de rendimiento para una plataforma e-learning

Resumen.- En este artículo se propone la implementación de un esquema transaccional para la optimización del acceso a recursos digitales (documentos, archivos multimedia, entre otros) dentro de una plataforma e-learning, utilizando Moodle como caso de estudio. El esquema transaccional consta de una extensión creada con el fin de intermediar entre la interfaz de usuario de la plataforma e-learning y las bibliotecas que gestionan el almacenamiento de datos y recursos. Además, solicita recomendaciones sobre los recursos más concurridos de la plataforma a un sistema externo. Por otro lado, implementa una base de datos en memoria, empleando Redis, en la que se almacenan los archivos más descargados por los usuarios.

Palabras clave: Sistema de Almacenamiento; Esquema transaccional; EVA; Moodle.

Recibido: 21 de noviembre, 2022.

Aceptado: 16 de enero, 2023.

1. Introducción

La evolución de las tecnologías de información y comunicación ha traído cambios significativos para el hombre. Dichos cambios se han reflejado en distintos sectores, destacando de manera importante en la educación. En los últimos años, las plataformas dedicadas a la formación de profesionales a distancia han ganado un cuantioso número de usuarios, en distintas carreras y áreas de formación. La finalidad ha sido proveer

oportunidades a quienes por una razón u otra no pueden acceder a una educación presencial, o que necesitan complementar dicha formación usando recursos virtuales. Por otro lado, la pandemia del COVID-19 ha dejado latente que los estudios a distancia y la educación virtual ya no se ven solo como una alternativa [1], sino como un complemento y posiblemente como un esquema de sustitución a la educación tradicional (presencial).

Entre las diferentes plataformas de aprendizaje electrónico que hoy existen, podemos resaltar el proyecto de software libre Moodle. Esta se define como una plataforma de aprendizaje diseñada para proporcionar a educadores, administradores y estudiantes un sistema integrado único, robusto y seguro para crear ambientes de aprendizaje

* Autor para correspondencia:

Correo-e: yanethmoreno2002@gmail.com (Y. Moreno)

personalizados [2].

No obstante, a pesar del apoyo y soporte que hay detrás del mundo del e-learning, estas plataformas no escapan de las problemáticas comunes de los sistemas web en general. La gran cantidad de usuarios que acceden diariamente a distintos cursos en línea y de manera simultánea, pueden acarrear problemas en los tiempos de respuesta, si no se cuenta con los recursos necesarios para adaptar la infraestructura a los nuevos requerimientos de los sistemas. Así, surge la necesidad de aumentar la capacidad de respuesta y la eficiencia de las aplicaciones web, entre ellas las plataformas e-learning. La idea es enriquecer la calidad en cuanto a la experiencia de uso, es decir, que el servicio satisfaga las expectativas y necesidades del usuario, y, por otro lado, mejorar la calidad de servicio, referida a la medida del rendimiento del sistema.

El rendimiento de una aplicación web es importante, pero en una plataforma de formación es crucial. La percepción de los estudiantes sobre la calidad de los cursos puede verse deteriorada si durante su formación la plataforma responde de forma lenta o inesperada. Por ende, se requieren Entornos Virtuales de Aprendizaje (EVA) más eficientes en la gestión de los requerimientos de usuarios, cada vez más exigentes, y que ellos perciban u observen que su productividad no está siendo afectada. En este trabajo, se propone mejorar las prestaciones en cuanto a la gestión de almacenamiento. Para ello, se desarrolló e implementó un esquema de rendimiento apropiado que, integrado a la plataforma, permite acceder con menos retraso a los archivos solicitados por los usuarios.

2. Metodología

En este trabajo se aplicó un Desarrollo Basado en Funcionalidades (FDD, por sus siglas en inglés) [3], puesto que se trata de una metodología ágil que se fundamenta en la calidad y el monitoreo constante de cada proceso. Se enfoca en iteraciones cortas, que permiten avances tangibles en un período corto de tiempo. La misma consta de cinco procesos: desarrollo de un modelo global, creación una lista de funcionalidades, planificación

por funcionalidad, diseño y desarrollo de cada funcionalidad y por último, la implementación de las funcionalidades.

3. Estado del arte

Para crear un sistema de rendimiento integrado en una plataforma e-learning, que contribuya a optimizar el sistema gestor de almacenamiento, fue necesario realizar un estudio tanto de algunas implementaciones, como de distintos trabajos relacionados con el tema planteado. Las primeras revisiones se hicieron a algunas extensiones (*plugins*) de la plataforma Moodle. Las extensiones existentes cubren algunas necesidades de la plataforma o brindan funcionalidades adicionales a esta. Las mismas pueden ser instaladas de forma manual o a través de la página oficial de Moodle (moodle.org).

Específicamente, la categoría que fue de apoyo para este trabajo, es la de los *plugins* que integran memoria *cache*, entre los cuales resalta Alternative PHP Cache (APC) (Hemelryk, 2014. https://moodle.org/plugins/cachestore_apc), el cual proporciona una *cache* de tamaño limitado, pero de excelente desempeño, destinada al almacenamiento de datos de aplicaciones persistentes de PHP; y Memcache Cluster (Merrill, 2014. https://moodle.org/plugins/cachestore_memcachecluster) que implementa una versión modificada de la memoria cache estándar de Moodle, que permite mantener varios almacenamientos *memcache* sincronizados entre sí.

Luego, se realizó un estudio de la biblioteca AdoDB, una capa de abstracción de base de datos muy conocida, rápida y fácil de usar para PHP y que sirve para facilitar la comunicación entre Moodle y su base de datos. Con esto se buscaba comprender los procesos transaccionales entre la plataforma y los datos. En uno de los trabajos estudiados se empleó el lenguaje PHP en conjunto con la biblioteca AdoDB para generar interfaces de usuario web dinámicamente, evaluando la posibilidad de utilizar metadatos almacenados en bases de datos para desarrollar elementos de interfaz de usuario [4]. También se analizó un *framework* para PHP basado en

el modelo de 3 capas con el fin de identificar y separar la aplicación final en diferentes capas, que faciliten su construcción y mantenimiento. Este enfoque integra diferentes tecnologías y patrones de diseño con el fin de proporcionar una herramienta eficaz que respalde a la comunidad en la creación de aplicaciones web con PHP, entre estas, se integra la biblioteca AdoDB en la capa de acceso a datos para gestionar la comunicación entre la aplicación y la base de datos relacional [4]. Por otra parte, se revisó el diseño e implementación de una aplicación móvil para la intranet, propuesto en la Universidad Politécnica de Madrid, basada en el framework **Cordova** y tecnologías web [5]. La idea de dicho trabajo, fue proponer la programación híbrida usando el patrón Modelo-Vista-Controlador (MVC) como una forma de programación para sustituir el desarrollo ordinario para plataformas nativas, evitando el desarrollo en paralelo para cada sistema operativo móvil, como Android o iOS, y brindando una mejor implementación. Y el propósito de utilizar la biblioteca AdoDB en este trabajo fue, principalmente, evitar el mantenimiento extra en el caso de migraciones de la base de datos o cambios en los controladores de esta. Además, la implementación de AdoDB brinda a los desarrolladores la facilidad de aplicar el mismo código para acceder a una amplia gama de bases de datos.

4. Análisis de la plataforma Moodle

Moodle es una plataforma web de aprendizaje colectivo, de código abierto, diseñada para soportar tanto la enseñanza como el aprendizaje guiado por la pedagogía de constructivismo social, puesto que proporciona un conjunto de poderosas herramientas centradas en el estudiante y ambientes de aprendizaje colaborativo [2].

El proyecto Moodle impulsa decenas de miles de ambientes de aprendizaje globalmente, con más de 79 millones de usuarios, entre académicos y empresariales, que la convierten en la plataforma de aprendizaje más ampliamente usada del mundo [6].

En este trabajo es utilizada como caso de estudio la versión 3.3 de Moodle, para la implementación de un esquema transaccional de datos.

4.1. Extensiones de Moodle

En informática, un complemento o plug-in es una aplicación que se relaciona con otra para agregarle una función nueva, y generalmente muy específica. Esta aplicación adicional es ejecutada por la aplicación principal e interactúan por medio de la interfaz de programación de aplicaciones (API por sus siglas en inglés).

Moodle cuenta con un amplio directorio de extensiones que permiten agregar características y funcionalidades extras, como por ejemplo, nuevas actividades, nuevos tipos de preguntas para exámenes, nuevos reportes, integraciones con otros sistemas y muchas más.

Entre las extensiones de Moodle de interés para este trabajo se encuentran algunas relacionadas con el manejo de memoria *cache*, como por ejemplo, Memcached, MongoDB, APC user cache (APCu), XCache y Redis. Una *cache* es un componente que almacena datos para que las solicitudes futuras de esos datos se puedan atender con mayor rapidez.

4.2. Estructura de una extensión

Una extensión en Moodle posee los componentes que se describen a continuación:

version.php: contiene la meta información sobre el plugin, por ejemplo, la versión de este.

settings.php: archivo opcional que contiene el formulario con las opciones generales del plugin.

index.php: sirve para mostrar todas las instancias de una actividad en un curso, es decir, una lista con todas las instancias del mismo plugin.

view.php: esta es la página que muestra una instancia de la actividad.

lib.php: biblioteca de funciones del plugin. En este archivo se implementarán todas sus funciones y procedimientos.

mod form.php: formulario para crear o modificar una instancia de la actividad.

lang/: almacenar los archivos de idioma del plugin. Este debe contener los archivos de idioma con las cadenas de texto necesarias por el plugin en inglés

y sus traducciones a los idiomas de los usuarios finales.

db/: directorio donde se almacenan los archivos con las tablas de las bases de datos necesarias.

access.php: archivo opcional que contiene los permisos del plugin. Los permisos no son obligatorios, pero sí recomendables para garantizar el control de acceso de los usuarios a las funcionalidades específicas.

install.xml: archivo que describe la estructura de las tablas del plugin.

upgrade.php: código de actualización, aquí es donde se hacen las alteraciones de las tablas, si las hay, entre versiones.

5. Planificación y diseño de funcionalidades

Como primer paso, se desarrolló un modelo global de la solución a implementar, se definió una lista de funcionalidades con el fin de satisfacer dicho modelo y seguidamente se planificó el desarrollo de las mismas.

5.1. Desarrollo de un modelo global

El modelo global consta de la integración de un sistema recomendador externo a Moodle y una extensión que maneje las transacciones entre dicho sistema, la memoria *cache* implementada con Redis, las bibliotecas de la plataforma y la interfaz de usuario.

La extensión desarrollada se ubica entre la interfaz de usuario y las bibliotecas de Moodle que se encargan del manejo de los datos, como se observa en la Figura 1, funcionando como una capa intermedia o middleware que recibe tanto las consultas de cada usuario como las respuestas desde el servidor.

A su vez, la extensión implementada se comunica con el servidor de Redis y con el recomendador externo. Se utilizó Redis por ser un motor de base de datos que hace uso de la memoria principal del computador para alojar datos en un esquema clave-valor, que permite almacenar archivos binarios que no excedan un tamaño de 512 MB, y por su rápida integración con el lenguaje de programación PHP. Su función es la de mantener copias de los archivos a los cuales los usuarios

acceden con mayor frecuencia en la plataforma con el fin de proveer una respuesta más rápida a sus solicitudes.

El recomendador externo es el encargado de decidir y notificar a la extensión qué archivos deben ser copiados a la memoria *cache*. La extensión, por su parte, solicitará al recomendador externo, cada vez que sea necesario, un listado actualizado de los archivos, que este determine, deban permanecer en la memoria *cache* y creará copias de estos en la misma, así como proveer al recomendador un listado de aciertos y errores que pueda usar para futuras recomendaciones.

El fin de esta memoria *cache* es almacenar los archivos más concurridos y debe ser actualizada cada vez que se produzca una nueva recomendación. El plugin se encarga de remover los archivos que ya no sean necesarios y cubrir este espacio con nuevos recursos.

El componente no solo debe encargarse de dar respuesta a las solicitudes cuando el recurso solicitado se encuentre en la memoria *cache*, sino que también debe responder cuando este no se encuentre a primera mano, buscándolo en el servidor de archivos y enviándolo al usuario que lo ha solicitado.

5.2. Construcción de una lista de funcionalidades

Una funcionalidad es una pequeña utilidad valorada por el cliente, que se expresa en forma de acción - resultado - objeto. Por ejemplo, “Calcular el total de una venta”, “Validar la contraseña de un usuario” y “Autorizar la transacción de venta de un cliente” [8]. Acorde a lo descrito en la sección anterior, en la cual se presentó un modelo global de extensión propuesta, la lista de funcionalidades que se estableció es la siguiente:

- Recomendaciones
 - Solicitar recomendaciones al recomendador externo (HTTP Request).
 - Enviar métricas de aciertos y errores al recomendador externo (HTTP Request).
- Memoria *cache*
 - Limpiar archivos innecesarios de la memoria *cache*, cada vez que se produzca una nueva recomendación.

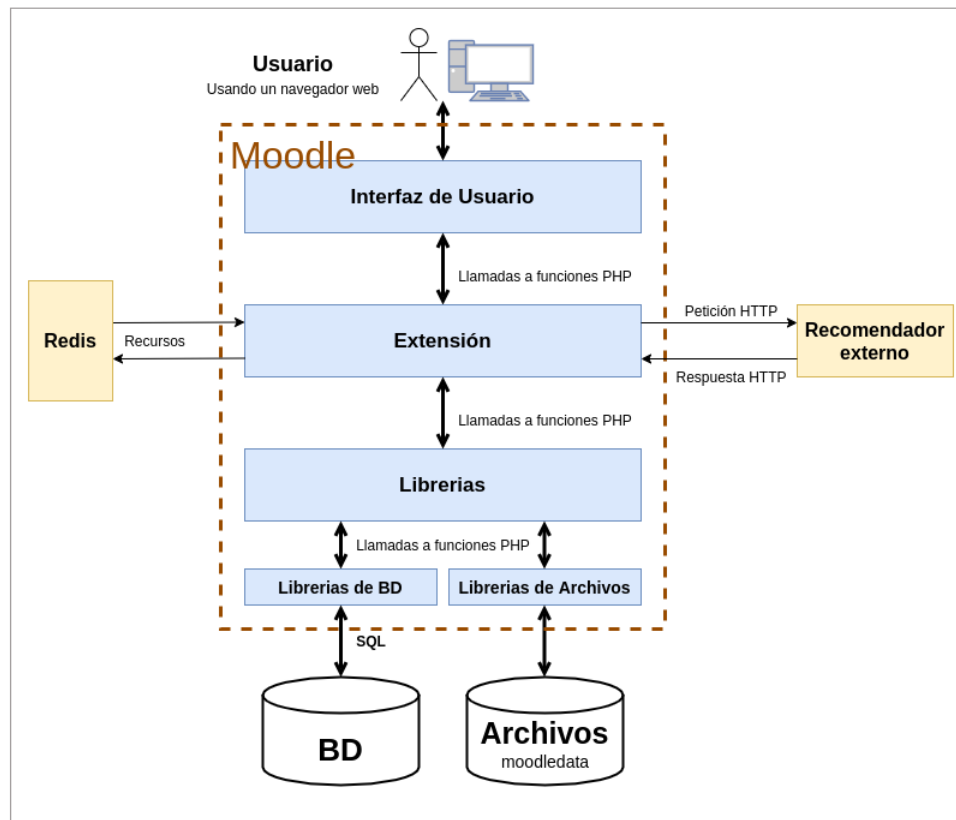


Figura 1: Ubicación de la extensión en la arquitectura Moodle (modificado de [7])

- Copiar archivos nuevos a la memoria *cache* de acuerdo a la última recomendación producida.
- Descargas
 - Descargar archivos solicitados por los usuarios desde la memoria *cache*, en caso de encontrarse en la misma.
 - Descargar archivos solicitados por los usuarios desde el almacenamiento, en caso de no encontrarse en la memoria *cache*.

5.3. Diseño de funcionalidades

El diseño de los sets de funcionalidades se realizó al comienzo de cada iteración en la cual correspondía su desarrollo, como se estableció en la sección anterior.

Recomendaciones

La solicitud de recomendaciones y el envío de métricas se deben efectuar de forma automática,

cada vez que sea necesario. Por ende, la extensión hace uso de las tareas sincronizadas de Moodle. Una tarea es una unidad de trabajo que debe ser efectuada en un tiempo determinado, son especialmente útiles para ejecutar una tarea de mantenimiento en un horario regular.

En la Figura 1 también se puede observar la interacción entre la extensión y el recomendador externo. Las recomendaciones y métricas se recibirán y enviarán como solicitudes HTTP, en formato JSON.

El diagrama de secuencia mostrado en la Figura 2 corresponde al proceso de solicitud de recomendaciones y envío de métricas para la ejecución de la tarea programada, encargada de comunicarse con el recomendador externo.

Memoria cache

La memoria *cache* implementada en este trabajo tiene la función de almacenar los archivos más solicitados por los usuarios de la plataforma

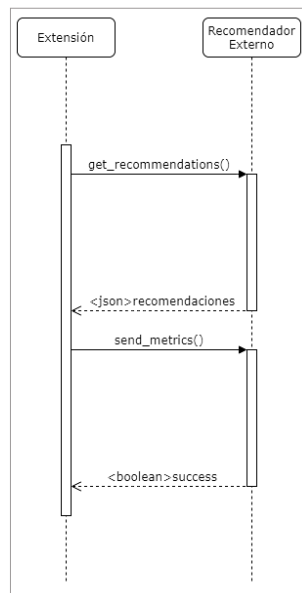


Figura 2: Diagrama de secuencia de la interacción extensión-recomendador

Moodle, en un cierto lapso de tiempo.

Como se observa en la Figura 3, luego de recibir un listado de recomendaciones, desde el recomendador externo mencionado en la sección anterior, nuestro componente debe limpiar de la memoria *cache* los archivos que no se contemplen en este listado antes de proceder con el copiado.

Posteriormente, el componente busca uno por uno los archivos del listado en el almacenamiento de archivos. Para cada caso se verifica que el recurso no se encuentre almacenado ya en la memoria *cache* y, de no ser así, se verifica si el espacio disponible es suficiente para agregarlo a la memoria, considerando el límite establecido. Si el almacenamiento disponible es mayor al tamaño del archivo, se procede a copiarlo. Para este proyecto se fijó un límite de aproximadamente de 800 MB ya que se contó con un almacenamiento físico de 2 GB, este valor se establece como un parámetro de configuración.

Antes de continuar con el siguiente archivo se debe actualizar la memoria usada. De quedar entradas sin revisar en el listado, el componente buscará el siguiente archivo y realizará el proceso. De no poseer espacio suficiente, se procede con el siguiente recurso del listado hasta que este sea cubierto en su totalidad o la memoria se haya

utilizado por completo.

Descargas

Para integrar estas funcionalidades al flujo normal de los procesos de Moodle es necesario adentrarse en su código fuente, específicamente en la rutina encargada de gestionar todas las descargas que los usuarios solicitan. La mayoría de las actividades que involucran la descarga de archivos y reproducción de recursos multimedia hacen uso de la rutina *pluginfile.php* que Moodle posee en su código fuente. Esta rutina sirve de interfaz, tomando directamente la solicitud de los usuarios para crear el enlace de descarga del recurso solicitado. Por ende, es allí en donde se hace la inserción del *plugin*.

Sin embargo, ya que no siempre se servirán archivos desde la memoria *cache* administrada por nuestra extensión, solo se realizó una bifurcación, tal como se puede apreciar en la Figura 4, en la que luego de obtener los argumentos del archivo solicitado se verifica si este existe o no en *cache*. Si el resultado de esta verificación es satisfactorio, se procede a buscar el archivo en la memoria, si, por el contrario, se determina que el archivo no se encuentra en la misma, el proceso continúa de la misma manera que lo haría si el *plugin* diseñado no estuviera implementado.

Luego de determinar el método a utilizar se deben actualizar las métricas de aciertos y errores. En caso de que el archivo sea encontrado en la memoria *cache*, la cantidad de aciertos de las recomendaciones sumarían uno. Por el contrario, si el archivo debiera obtenerse desde el almacenamiento, representaría un desacierto y sumaría uno a la cuenta de fallos. Estas métricas son escritas en una tabla de la base de datos creada con este fin llamada *download optimizer metrics*, y pueden ser usados por el recomendador para alimentar los procesos de reentrenamiento y adaptación.

6. Implementación y discusión de los resultados

En esta sección se detalla el proceso de implementación, seguido de las pruebas que se

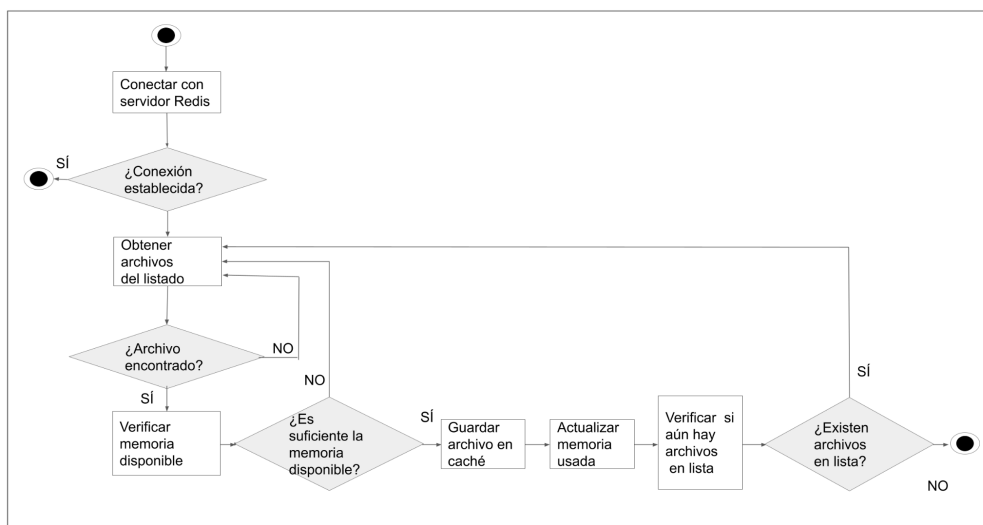


Figura 3: Diagrama de actividad: Copiado de un archivo a la memoria *cache*

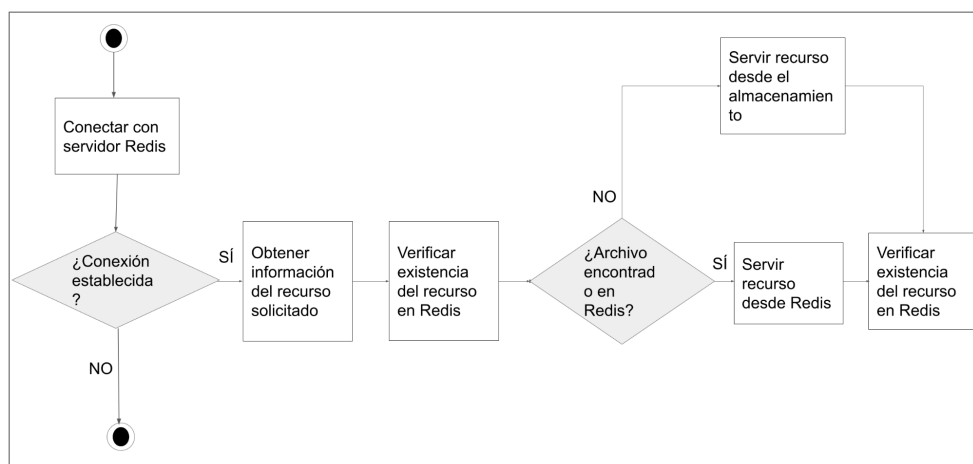


Figura 4: Diagrama de actividad: Descarga de archivos

ejecutaron para comprobar el funcionamiento y rendimiento del esquema transaccional propuesto. Para estas pruebas se empleó un equipo que contaba con un procesador Intel Core 2 Duo, un disco duro mecánico de 256 GB de almacenamiento y una memoria de acceso aleatorio DDR de 2 GB. En cuanto al software, la implementación corrió sobre el Sistema Operativo Linux, específicamente Debian 9 y se utilizó la versión 3.3 de Moodle.

6.1. Implementación de funcionalidades

El último proceso de la metodología trata de la implementación de las funcionalidades y se aplicó de forma iterativa en conjunto con el proceso de

diseño. Antes de cada iteración se seleccionaron los sets de funcionalidades que serían diseñados e implementados en la misma.

Recomendaciones

Se requería que la solicitud de recomendaciones y el envío de métricas al recomendador externo se hiciera de forma automática en intervalos de tiempo que el administrador de la plataforma decidiera sean adecuados. Para conseguir esto, se implementaron estas funcionalidades en una tarea sincronizada de Moodle. Las tareas sincronizadas son ejecutadas a través del proceso Cron de Moodle que es un script PHP contenido en el código fuente

que debe ejecutarse regularmente en segundo plano y se encarga de ejecutar las tareas sincronizadas en sus intervalos agendados.

El programa `cron.php` de Moodle debe ser invocado regularmente, esto con el fin de que las tareas sincronizadas se ejecuten correctamente en los intervalos establecidos. Ya que PHP permite ejecutar programas desde la consola de comandos de Linux, se configuró el `Crontab` de Linux para que ejecute `cron.php` cada minuto. `Cron` es un administrador regular de procesos en segundo plano que ejecuta procesos o rutinas a intervalos regulares como se especifican en el archivo `crontab`.

En primer lugar, se invoca a la rutina `check metrics availability` que se encarga de verificar que se encuentren las entradas necesarias en la base de datos y de no encontrarse, se crean. Esto es útil como seguridad para evitar errores que se puedan presentar al momento de escribir los aciertos y errores en la tabla.

Posteriormente, se invoca la rutina `send metrics` que envía las métricas capturadas al recomendador. Esta función se encarga de recuperar de la base de datos los valores capturados de aciertos y errores para el último listado de recomendaciones y enviarlos en una petición HTTP de tipo POST usando la biblioteca `cURL` de PHP. Una vez finalizado el envío de la petición se restablecen los valores de la tabla a cero.

La función `get recommendations` se encarga de solicitar al recomendador una lista de recomendaciones actualizada. Para conseguir esto también se utiliza la biblioteca `cURL`, pero en este caso se envía una petición de tipo GET. Esta rutina retorna un arreglo que contiene los identificadores de los archivos más concurridos en cada una de sus posiciones. En caso de que ocurra un fallo, se retorna un mensaje de error.

Memoria cache

En este proyecto se implementó una memoria `cache` empleando el motor de base de datos en memoria Redis, el cual es posible manejar desde plugin implementado a través de la biblioteca de PHP `PhpRedis 7`, que proporciona una API para comunicarse con el almacenamiento clave-valor empleando código PHP.

Descargas

La función `clear cache` se encarga de remover de la memoria `cache` los archivos que ya no son necesarios, es decir, que no se encuentran en el listado recibido. Esta rutina toma un arreglo conteniendo el nuevo listado de recomendaciones y se conecta con Redis, usando la instrucción `connect` de la biblioteca `PhpRedis`. Esta última recibe como argumentos la dirección y el puerto del servidor Redis y obtiene todas las claves contenidas en la memoria con la instrucción `keys`, estas claves corresponden a los identificadores de los archivos como se encuentran registrados en la base de datos de Moodle. Al comparar los identificadores contenidos en `cache` con los que se encuentran en el nuevo listado de recomendaciones, se obtiene un arreglo con las claves innecesarias. La instrucción `del` toma como argumento el arreglo de las claves a eliminar y las remueve del servidor. De ser removidos todos los archivos innecesarios, la función retorna el valor booleano `TRUE`, en caso contrario, Muestra un mensaje de error en la consola y retorna el valor booleano `FALSE`.

La función `retrieve files` recibe como argumento el arreglo de recomendaciones recibido desde el recomendador y se encarga de copiar los archivos desde el almacenamiento de Moodle a la memoria `cache`. Ya que esta función también debe velar que el límite para la `cache` establecido por el administrador no se exceda, se usa la instrucción `info`, en este caso con el argumento `MEMORY` para obtener el espacio utilizado actualmente.

La función `get cache limit` obtiene el tamaño de la memoria RAM del computador y retorna el límite de la memoria `cache` en función a la anterior. Para este proyecto se estimó emplear la tercera parte del total de la memoria física del computador (aproximadamente 800 MB en este caso) pero este valor puede ser modificado a conveniencia del administrador.

La rutina `retrieve files` itera sobre cada identificador contenido en el arreglo de recomendaciones recibido, y para cada caso usa la API de archivos (`File API 8`) de Moodle, que es la interfaz de programación de aplicaciones que Moodle provee para manejar los archivos en la plataforma, con el fin de obtener los metadatos del archivo

en cuestión, junto con su contenido. Si no existe espacio disponible suficiente para almacenar este archivo, se procede con el siguiente y así sucesivamente. Sí, por el contrario, el espacio disponible es suficiente, se utiliza la función *redis save file*, que recibe como argumentos el identificador del archivo y el contenido del mismo y lo almacena en la memoria *cache* utilizando la instrucción *set* de *PhpRedis*. De ser satisfactorio el proceso, se actualiza la variable que contiene el valor de la memoria utilizada y se procede con el siguiente archivo. Por el contrario, si el proceso falla, se retorna un mensaje de error a la consola y se procede de igual forma con el siguiente archivo.

6.2. Pruebas

6.2.1. Uso de las instrucciones *var_dump()* y *echo* para verificar el estado del proceso

La instrucción *var_dump()* de PHP muestra información estructurada sobre una o más expresiones, incluyendo su tipo y valor, esta se implementó como herramienta para conocer información de utilidad en la ejecución del proceso de limpiado y llenado de la memoria *cache*, como por ejemplo el espacio disponible al almacenar o remover un elemento de la misma.

Por otro lado, *echo* se define como un constructor del lenguaje, su función es imprimir un texto dado. Su implementación se aplicó para imprimir mensajes que explicaran de forma rápida y clara lo que estaba ocurriendo en dicho momento, un ejemplo serían los mensajes de éxito y/o error en algún paso de la ejecución.

6.2.2. Pruebas de rendimiento

Con el fin de conocer el rendimiento de nuestra extensión y realizar las respectivas comparaciones con el flujo normal que provee la plataforma por omisión, se implementó un sistema de logs que son plasmados en la base de datos en una tabla que lleva por nombre *download optimizer logs*. La información capturada en esta corresponde al tiempo en microsegundos que se toma la plataforma en servir un archivo especificado con su propio identificador, ya sea que fuese servido desde la memoria *cache* o directamente desde el almacenamiento.

6.3. Resultados

A continuación, se muestran los resultados obtenidos, tabulados para los tres casos. Como se puede apreciar en la Tabla 1, se utilizaron archivos PDF, FLAC y MP4 de tamaños variados con el fin de probar la mayor cantidad posible de comportamientos de la plataforma.

Tabla 1: Tamaño de archivos por formato

Tipos de archivos			
Archivo	PDF (MB)	FLAC (MB)	MP4 (MB)
1	12.74	23.20	23.20
2	126.12	125.92	125.92
3	395.89	329.74	329.74

En las Tablas 2, 2 y 4 se muestra una comparación entre las medias y varianzas de los tiempos de respuesta tanto del servidor como de la *cache*.

En general, se puede observar que en las pruebas para los distintos tipos de archivo se percibió una mejora. También se puede apreciar que el rendimiento en los archivos más pequeños fue mejor que en los archivos con mayor tamaño, alcanzando mejoras de 91,28 % en archivos PDF, 72,19 % en archivos de audio FLAC y 91,94 % en archivos de video MP4.

Por otro lado, el rendimiento en general de la plataforma para servir archivos de audio y video se reduce con mayor proporción en comparación con archivos de texto PDF a medida que aumenta el tamaño de los mismos.

6.4. Conclusiones

Mediante este trabajo se logró la implementación de un esquema transaccional para mejorar los tiempos de respuesta de la plataforma Moodle al momento de servir recursos a los usuarios, dicho esquema se llevó a cabo mediante una extensión en la plataforma. Para llevar esto a cabo, se aplicó una metodología de desarrollo basada en funcionalidades, que permitió obtener en principio un modelo global óptimo.

Luego, se construyó una lista de características enfocada en satisfacer las necesidades de dicho modelo, con el fin de cumplir con la implementación planteada. Posteriormente, se realizó la

Tabla 2: Medias y varianzas de tiempos de ejecución registrados para archivos PDF

	Cache (ms)	Var (cache)	Servidor (ms)	Var (servidor)
Archivo 1	0,0008379	0,00000030175	0,0086181	0,00043929530
Archivo 2	0,0427598	0,06056147000	0,0605615	0,00040822452
Archivo 3	0,1173530	0,00030477933	0,1438336	0,04523632832

Tabla 3: Medias y varianzas de tiempos de ejecución registrados para archivos FLAC

	Cache (ms)	Var (cache)	Servidor (ms)	Var (servidor)
Archivo 1	0,0044143	0,00000271154	0,0158703	0,00125392680
Archivo 2	0,4876548	0,00875906785	0,5536980	0,00875906785
Archivo 3	0,6993443	0,33901860605	0,7014644	0,00875906785

Tabla 4: Medias y varianzas de tiempos de ejecución registrados para archivos MP4

	Cache (ms)	Var (cache)	Servidor (ms)	Var (servidor)
Archivo 1	0,0004151	0,00000009664	0,0006176	0,00024485936
Archivo 2	0,0076583	0,20519410250	0,4544273	0,06293746897
Archivo 3	0,6901814	0,00700439286	0,6903727	0,00700439286

planificación y el diseño de cada funcionalidad por separado, pero manteniendo la integridad del sistema para finalmente realizar la implementación.

Con la extensión implementada, se ejecutaron las pruebas de funcionamiento y rendimiento correspondientes, en las cuales se determinó que el trabajo hecho cumplía con los objetivos establecidos, resultando en una implementación completamente funcional del modelo diseñado.

Con base en los resultados obtenidos, se pudo comprobar que efectivamente la extensión diseñada mejora la experiencia del usuario dentro de la plataforma al momento de acceder a algún recurso de alta demanda, optimizando los tiempos de respuesta de la misma dependiendo de las propiedades de los archivos.

7. Referencias

- [1] M. García, “La docencia desde el hogar. Una alternativa necesaria en tiempos del Covid 19,” *Revista Polo del Conocimiento*, vol. 5, no. 4, pp. 304–324, 2020. <https://doi.org/10.23857/pc.v5i3.1318>
- [2] G. Barrios, Y. Moreno, and F. Hidrobo, “Entendiendo el funcionamiento de Moodle: un enfoque basado en un marco de modelado,” *RISTI-Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*, vol. 20, pp. 327–337, 2019.
- [3] A. Navarro, J. Fernández, and J. Morales, “Revisión de metodologías ágiles para el desarrollo de software PROSPECTIVA,” *Universidad Autónoma del Caribe*, vol. 11, no. 2, pp. 30–39, 2013.
- [4] M. Mgheder and M. Ridley, “Automatic generation of web user interfaces in php using database metadata,” in *Third International Conference on Internet and Web Applications and Services ICIW’08*, Athens, Greece, 2008, pp. 426–430. <https://doi.org/10.1109/ICIW.2008.100>
- [5] G. García, “Design and implementation of a mobile application based on cordova framework and web technologies for a university intranet,” Tesis de Maestría (TFG), ETSI Telecomunicación. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2017.
- [6] M. Rizo, “Aprendizaje con Moodle,” *Revista Multi-Ensayos*, vol. 4, no. 8, pp. 18–25, 2018. <https://doi.org/10.5377/multiensayos.v4i8.9448>
- [7] A. Muñoz, R. Delgado, E. Rubio, C. Grilo, and V. Basto-Fernandes, “Forum participation plugin for Moodle: Development and Discussion,” *Procedia Computer Science*, vol. 121, pp. 982–989, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.11.127>
- [8] F. Anwer, S. Aftab, U. Waheed, and S. Muhammad, “Agile Software Development Models TDD, FDD, DSDM, and Crystal Methods: A Survey,” *International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering*, vol. 8, no. 2, pp. 1–10, 2017.

Simulation of failure by rolling contact of a rotating drum in a petrochemical company

Fendix Peña , Jorge Romero * 

Centro de Investigación en Materiales (CIM), Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela



<https://doi.org/10.54139/revinguc.v29i2.283>

Abstract.- The purpose of this research was to develop the simulation of rolling contact failure between the rim and roller of a rotating drum belonging to a petrochemical plant, in order to determine the failure rate and the factors that influence it. For this one, a methodology was established and applied in the NPK granules plant of the Morón Petrochemical Complex, specifically in the rotary dryer of said plant. In this equipment, superficial fatigue phenomena occur between the rim and the radial rollers, such as the appearance of cracks, which after a certain time need to be repaired in order to guarantee safe operation. The fatigue problem is common in rotating drums, which are mainly composed of a cylinder that rests between tires and rollers that rotate with each other, producing a rolling contact during their operation, and therefore, a cyclical contact stress. The estimation of the failure rate due to cracks whose origin is located below the surface of the rim in a rotating drum, was achieved by simulation by finite elements, by using ABAQUS, to determine the contact stresses; the use of the Smith Watson and Topper equation to estimate crack nucleation; Neuber's equation for stress correction and the general fracture mechanics equation, together with the N'Pugno equation, for crack propagation. Finally, it is concluded that the higher the contact stress, the higher the rolling contact failure rate. These contact stresses are increased by skewing of radial rollers during alignment and by rim-related problems such as wobble, sidewall wear, surface wear, and rim deformation.

Keywords: Fatigue; rolling contact; crack nucleation; crack propagation.

Simulación de falla por contacto rodante de un tambor rotativo en una empresa petroquímica

Resumen.- El propósito de esta investigación fue la de desarrollar la simulación de falla por contacto rodante entre la llanta y rodillo de un tambor rotativo perteneciente a una planta petroquímica, con la finalidad de determinar la tasa de falla y los factores que influyen en ella. Para ello se estableció una metodología, cuya investigación de campo se efectuó en la planta de granulados NPK del complejo petroquímico Morón, específicamente en el secador rotatorio de dicha planta. En este equipo ocurren fenómenos de fatiga superficial entre la llanta y los rodillos radiales, tales como aparición de grietas, las cuales al cabo de cierto tiempo requieren reparación a fin de garantizar un funcionamiento seguro. El problema de fatiga es común en los tambores rotativos, los cuales están compuestos principalmente por un cilindro que se apoya entre llantas y rodillos que giran entre sí, produciendo un contacto rodante durante su operación, y por ende, un esfuerzo de contacto cíclico. La estimación de la tasa de falla debida a grietas cuyo origen está ubicado debajo de la superficie de la llanta en un tambor rotativo, fue lograda mediante la simulación por elementos finitos, haciendo uso de ABAQUS, para determinar los esfuerzos de contacto; el uso de la ecuación de Smith Watson and Topper, para estimar la nucleación de grieta; la ecuación de Neuber's para corrección de esfuerzos y la ecuación general de mecánica de la fractura, en conjunto con la ecuación de N'Pugno, para propagación de grietas. Finalmente se concluye que a mayor esfuerzo de contacto, la tasa de falla por contacto rodante es mayor. Estos esfuerzos de contacto se ven incrementados por el cruce que se hace en los rodillos radiales durante su alineación y por los problemas relacionados con la llanta, tales como bamboleo, desgaste de las paredes laterales, desgaste de la superficie y deformación de la llanta.

Palabras clave: Fatiga; contacto rodante; nucleación de grieta; propagación de grieta; modos de carga.

Recibido: 31 de mayo, 2022.

Aceptado: 30 de julio, 2022.

1. Introducción

Los tambores rotativos son equipos fundamentales en la elaboración de productos químicos de gran importancia para el sector industrial del

* Autor para correspondencia:

Correo-e: joromer@uc.edu.ve (J. E. Romero)

país, tales como: el agrícola, el cementero, del asfalto, plásticos, entre otros. Estos equipos están diseñados para trabajar 24 horas continuas durante todo el año, a menos que ocurra una parada de mantenimiento programada o una falla repentina, en cuyo caso se hace una pausa en la producción con consecuencias en pérdidas económicas, tanto para la empresa que los utiliza, así como para el resto de la cadena de suministro que depende del producto procesado.

La elaboración de fertilizantes en Venezuela está a cargo del complejo petroquímico ubicado en la región de Morón, Estado Carabobo, en donde además de estos productos, se elabora una gama de productos químicos. En el proceso productivo, están presentes los tambores rotativos como parte fundamental del proceso. Estos tambores están sometidos a esfuerzos mecánicos exigentes que hacen inevitable detener el equipo para realizar mantenimiento y restaurar los valores iniciales de diseño. En ciertas ocasiones, se presentan fenómenos que ameritan trabajos de mayor envergadura; y por ende, mayor costo de restauración.

Entre los fenómenos que hacen inevitable la parada en los tambores rotativos, están las fallas asociadas a las llantas y rodillos; los cuales son los elementos mecánicos que sufren fallas por contacto rodante, presentándose varios modos de falla, entre la que se destaca la falla por fatiga superficial. Esta su vez se manifiesta por desprendimiento de material y aparición de grietas superficiales. Estos modos de fallas conllevan a que el equipo deba ser parado para eliminar estas discontinuidades (Figura 1).

En el presente trabajo se planteó simular la falla por contacto rodante entre la llanta y los rodillos radiales de un tambor rotativo mediante el uso del computador; para establecer el momento oportuno de detener el equipo, antes de que la falla se haga irreversible y muy costosa su reparación. Para ello se hizo uso del computador para determinar resultados derivados de las teorías existentes sobre fallas por contacto rodante, se documentaron los resultados obtenidos, validándolos con los datos disponibles para luego realizar predicciones sobre la ocurrencia de la falla superficial.



Figura 1: Formación de grieta sobre llanta de TR-401, comenzando en una de las caras

En este sentido, la presente investigación surgió de la necesidad de contar con un modelo de simulación que permita ensayar la falla superficial que ocurren entre la llanta y el rodillo radial del tambor. Con este modelo se predijo el comienzo incipiente de la falla superficial y en qué momento detener el equipo para evitar daños mayores, tales como fractura de la llanta.

2. Fundamentos

En esta sección se describen los conocimientos básicos relacionados con fallas por contacto rodante, cargas cíclicas con deformación plástica acumulada “Shakedown”, modos de carga en propagación de grietas y fallas típicas en un tambor rotativo.

2.1. Falla

Una falla se define como un suceso después del cual un equipo o sistema completo, deja de cumplir total o parcialmente sus funciones. Es la alteración de la capacidad de trabajo del componente de un equipo o sistema. No necesariamente una falla es algo catastrófico, sino que se puede definir como una desviación de una característica de calidad respecto a su valor nominal. Las fallas se clasifican en potencial y funcional. Una falla potencial es una condición física identificable, tal como una pequeña degradación (medible); pero que cumple con la función, que indica que una

falla funcional es inminente. Por lo general, una falla potencial es detectada por un técnico de predictivo a través de una tecnología como análisis de vibración, termografía infrarroja, análisis de aceite u otra técnica de monitoreo de condición. Una falla funcional es la incapacidad de un elemento o equipo para cumplir con un estándar de rendimiento especificado. El equipo no deja de cumplir su función del todo. Por lo general su síntoma es un evento observable por el personal de producción o de mantenimiento. A su vez, una falla funcional puede ser parcial o total. En el primer caso, el equipo realiza su función con un bajo desempeño. En el segundo caso, el equipo es incapaz de cumplir su función y su parada es total [1]

La curva PF es una curva que relaciona la resistencia a la falla o su confiabilidad y el tiempo de operación de un equipo o componente del equipo [1] (Figura 2).

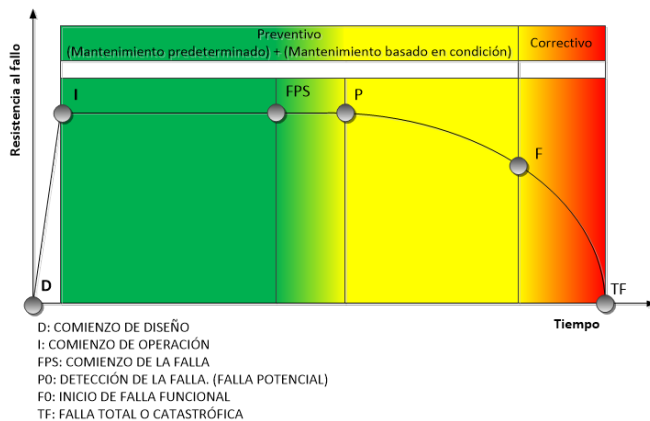


Figura 2: Gráfica típica de falla funcional y potencial [1]

La tasa de falla es la relación que existe entre el número de fallas que ocurre en un equipo o elemento particular de dicho equipo y el periodo de tiempo de operación [1], según la ecuación (1).

$$\lambda = \frac{\text{Número de fallas}}{\text{Tiempo total de operación del equipo}} \quad (1)$$

2.2. Fallas por contacto rodante

Las fallas por contacto rodante, implican la interacción entre dos superficies que se unen entre sí, entre las cuales puede haber rodamiento puro

sin deslizamiento; y rodamiento con deslizamiento. Esta interacción produce un proceso de falla superficial, caracterizado principalmente por la aparición de grietas sobre la superficie, debajo de la superficie o un combinado de ambas. Estas grietas, una vez formadas, crecen por cada ciclo de ocurrencia del contacto. Una vez que ha alcanzado cierto tamaño, se desprenden trozos de material de las superficies en contacto, formando pequeños agujeros, los cuales son llamados Pitting o micropitting. Las fallas por fatiga se inician por el esfuerzo cortante y continúan hacia la falla por el esfuerzo de tensión. También existe un esfuerzo cortante asociado con los esfuerzos de contacto por compresión y se cree que es la causa de la formación de la grieta después de muchos ciclos de esfuerzo [2].

La fatiga de contacto se presenta cuando las superficies se tocan repetidamente. En muchos casos el área de contacto tiende a ser pequeña y los esfuerzos que resultan son muy grandes. La fatiga por contacto produce tres daños importantes: picaduras de superficie, picaduras bajo la superficie y escamaduras [3].

La falla por contacto rodante, especialmente en rodamientos, es un proceso gradual que conlleva acumulación de daño por encima de los billones de ciclos (10^{10} – 10^{11} ciclos). Durante la fatiga por contacto rodante, un pequeño volumen subsuperficial de material en la vecindad de la superficie de contacto está sometida a un estado de esfuerzos de fatiga triaxial complejo con carga no proporcional. Muchos investigadores han mostrado que ocurren cambios complejos micro estructurales debajo de la superficie durante la fatiga por contacto rodante [4].

La posibilidad de tener un esfuerzo cortante máximo en una ubicación debajo de la superficie (en rodamiento puro) ha llevado a algunos a concluir que la picadura se inicia en esta ubicación o cerca de ella. Otros han concluido que la picadura se inicia en la superficie. Es posible que funcionen ambos mecanismos en tales casos, ya que la iniciación de la falla por lo general comienza en una imperfección, la cual puede estar sobre la superficie o debajo de ésta. El concepto de resistencia a la fatiga superficial es similar al

de resistencia a la fatiga por cargas cíclicas de tracción y compresión, excepto por una diferencia básica. Mientras que los aceros y otros materiales muestran un límite de resistencia cuando se cargan cíclicamente a la flexión o axialmente, ningún material en general tiene una propiedad equivalente cuando una carga produce fatiga superficial. Por lo tanto, se debe esperar que la máquina, aun cuando sea cuidadosamente diseñada en contra de todos los otros tipos de falla, al final de cuentas sucumba a la fatiga superficial, si se carga durante los ciclos suficientes [2].

La fatiga por contacto rodante, al igual que el mecanismo de fatiga general, consta de dos procesos bien diferenciados, los cuales son: La nucleación de grieta y la propagación. La suma de ambos periodos, resultan la cantidad de ciclos necesarios para alcanzar un determinado tamaño de grieta. La nucleación de fisuras consiste en la formación de micro grietas a partir de defectos internos del material tales como inclusiones, precipitados y poros. También puede producirse en la superficie del material, caso más habitual, a partir de microdefectos debidos a las deformaciones plásticas alternantes, picaduras de óxido o mal acabado superficial. La propagación consiste en el crecimiento gradual de la grieta, conforme ocurren los ciclos de carga y descarga en el contacto rodante [5].

2.3. Cargas cíclicas con deformación plástica acumulada o Shakedown

Las cargas cíclicas con deformaciones plásticas acumuladas “Shakedown” se definen como el fenómeno en el cual se desarrollan esfuerzos residuales luego de los ciclos iniciales de carga en contacto rodante. Esta carga cíclica produce en la estructura interna del material esfuerzos y deformaciones residuales que cambian sus propiedades mecánicas, tal como aumentar el límite de fluencia y producir endurecimiento por deformación. Luego de cierta cantidad de ciclos, el endurecimiento por deformación, y por ende la deformación plástica neta cesan, quedando el material, endurecido y con capacidad de resistir la carga que lo deformó inicialmente [6], como se aprecia en la Figura 3.

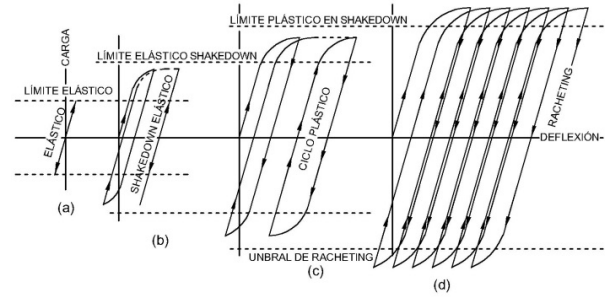


Figura 3: Diagrama de esfuerzo-deformación en modos de cargas cíclicas [6]

2.3.1. Carga con deformación plástica y agitación elástica “Elastic Shakedown”

Ocurre cuando el desarrollo de esfuerzos residuales resulta en un estado estable en el cual la deformación subsiguiente es puramente elástica [6].

La ecuación que predice el tiempo de nucleación de grietas en esta modalidad se representa en ecuación (2), la cual es conocida como criterio de Dang Van [7].

$$\begin{aligned} \tau_a(t) + \alpha_{DV}\sigma_h(t) &> \tau_e \\ \tau_a(t) - \alpha_{DV}\sigma_h(t) &< -\tau_e \end{aligned} \quad (2)$$

Donde:

$\tau_a(t)$: Esfuerzo cortante máximo en el tiempo t .

$\sigma_h(t)$: Esfuerzo hidrostático instantáneo en el tiempo t .

τ_e : Límite de resistencia a la fatiga en cortante.

α_{DV} : Parámetro del material.

2.3.2. Carga con deformación plástica cíclica cerrada. “Plastic Shakedown”

Es el proceso donde se genera un ciclo cerrado de plasticidad sin que haya acumulación neta de deformación plástica [8]. El tiempo para que ocurra nucleación de grieta está dada por la ecuación (3).

$$\left\langle \sigma_{n,max} \frac{\Delta \epsilon_1}{2} \right\rangle + J \Delta \tau \Delta \gamma = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\tau_f'^2}{G} (2N_f)^{2b_0} + \tau_f' \gamma_f' (2N_f)^{b_0+c_0} \\ \frac{\sigma_f'^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma_f' \epsilon_f' (2N_f)^{b+c} \end{array} \right\} \quad (3)$$

Donde:

$\sigma_{(n,max)}$: Esfuerzo maximo normal al planmo crítico.

$\frac{\Delta \epsilon_1}{2}$: Amplitud media de deformación en @ la dirección normal al plano crítico.

σ_f', τ_f' : Coeficiente de esfuerzo a la fatiga (Normal,cortante).

E, G : Módulo de lasticidad, Módulo de rigidez.

ϵ_f', γ_f' : Coeficiente de ductilidad a la fatiga (Normal,cortante).

b, b_0 : Exponente de esfuerzo a la fatiga (Normal,cortante).

c, c_0 : Exponente de ductilidad a la fatiga (Normal,cortante).

N_f : Número de ciclos para inicio de grieta.

$\langle a \rangle$: Operador de MacCauly. $\langle a \rangle = 0,5(|a| + a)$

$\Delta \gamma$: Amplitud de deformación angular máxima en el plano crítico.

$\Delta \tau$: Amplitud de esfuerzo máximo cortante en el plano crítico.

J : Constante de material, la cual depende de la carga aplicada.

Donde:

N_f : Número de ciclos para inicio de grieta.

ϵ_c : Constante del material, determinado experimentalmente.

$\Delta \epsilon_r$: Amplitud de deformación acumulado por ciclo.

$\Delta \tilde{\epsilon}$: Deformación incremental normal al plano crítico, por ciclo.

$\Delta \tilde{\gamma}$: Deformación incremental cortante al plano crítico, por ciclo.

2.4. Tambor rotativo

Se entiende por tambor rotativo a la máquina que está formada por un cuerpo cilíndrico hueco y es soportado entre llantas metálicas que a su vez es impulsada mecánicamente por un sistema motriz de piñón-corona que lo hace girar en torno a su eje de rotación, tal como se muestra en la Figura 4. En el interior de un tambor rotativo se produce un proceso físico-químico que cambia las propiedades del material que entra respecto las del material que sale [10].

2.3.3. Carga con deformación plástica cíclica creciente. "Racheting"

Es un proceso en el que cargas cíclicas son aplicadas sobre un material, en donde por cada ciclo hay deformación plástica que se acumula gradualmente. Este fenómeno ocurre como consecuencia de sobrepasar el límite superior de la agitación plástica, (plastic shakedown). En esta modalidad hay acumulación de deformación plástica en cada ciclo [9]. El tiempo de nucleación en este modelo está dado por la ecuación (4).

$$N_f = \frac{\epsilon_c}{\Delta \epsilon_r} = \frac{\epsilon_c}{\sqrt{(\Delta \tilde{\epsilon})^2 + \left(\frac{\Delta \tilde{\gamma}}{\sqrt{3}}\right)^2}} \quad (4)$$

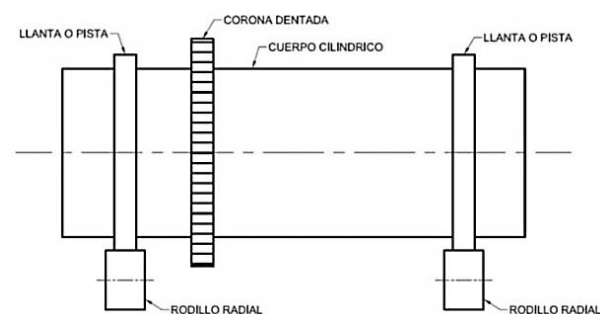


Figura 4: Vista lateral de un tambor rotativo [10]

En un tambor rotativo, el producto a procesar pasa dentro del mismo gracias al movimiento rotacional del cilindro y a una inclinación con respecto a la horizontal que le da al producto

un movimiento de traslación desde la entrada del tambor hasta la salida. La inclinación oscila entre 1° y 2,5° dependiendo del diseño del sistema. Esta inclinación hace que el peso del tambor tenga una componente en el sentido axial del mismo que debe ser contrarrestada mediante los rodillos de carga radial (Figura 5).

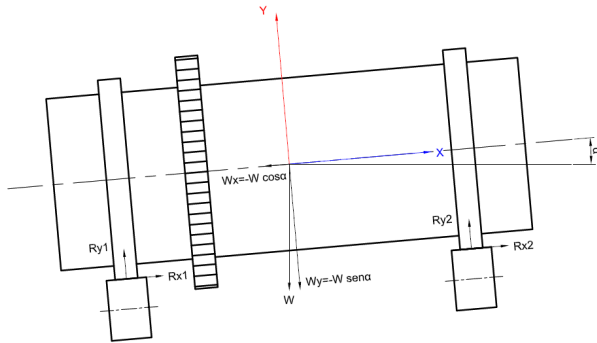


Figura 5: Inclinación de un tambor rotativo, necesaria para el flujo interno de material [10]

Durante el trabajo del tambor rotativo, se generan esfuerzos de contacto cíclicos entre las llantas y los rodillos radiales. Los esfuerzos cíclicos existentes desencadenan en las llantas del tambor fallas superficiales tales como grietas superficiales y sub-superficiales, desprendimientos de material y desgaste que hacen que el equipo deba ser parado para su inspección y restauración, garantizando de esta forma una operación segura y confiable.

El principio de trabajo de los tambores rotatorios, se basa en que las llantas se apoyan en dos puntos sobre dos rodillos de carga, los cuales soportan el peso combinado tanto del tambor como de la carga que éste maneja. Esta configuración de llanta y rodillos es denominada trunion y consiste en tres cilindros en contacto en la cual dos cilindros soportan a un cilindro de mayor diámetro que los primeros, (Figura 6). El punto de contacto entre los cilindros, es en donde se desarrollan esfuerzos mecánicos variables que van desgastando y fatigando las piezas [10].

Para que un tambor rotativo funcione correctamente, este debe ser alineado llevando a cabo un procedimiento que consiste en cruzar los rodillos radiales. Este cruce de rodillos (llamado Skew en inglés) se realiza variando la posición del eje del rodillo respecto al eje de giro del tambor rotativo.

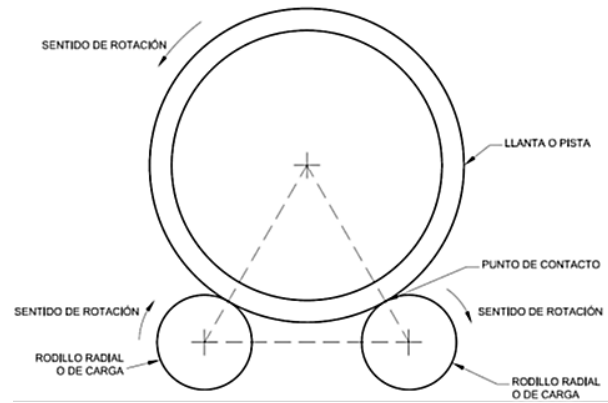


Figura 6: Configuración típica de llanta y rodillos radiales, conocido como trunion.[10]

Si ambos ejes son paralelos entonces el rodillo tiene un cruce neutral o nulo. En este sentido un cruce neutral no genera carga axial sobre el tambor. Si el cruce es distinto de cero, entonces se genera empuje axial hacia arriba o hacia abajo, según sea el cruce dado. El cruce hecho sobre los rodillos radiales es muy pequeño, cuyo valor va de 0,1 mm a 1,00 mm por metro de pivote en rodillo en buen estado y solo afecta el paralelismo entre los ejes de rotación del rodillo y del tambor. Esto no afecta la altura ni la posición lateral del tambor rotativo. El propósito del cruce dado a los rodillos, es contrarrestar la componente axial debida al peso y al ángulo de caída del tambor “Slope”, minimizando la carga que se ejerce sobre el rodillo axial del equipo. Cualquier cantidad de cruce en los rodillos, produce un aumento en el esfuerzo de contacto y en consecuencia un mayor desgaste y deterioro sobre las superficies rodantes, [11] (Figura 7)

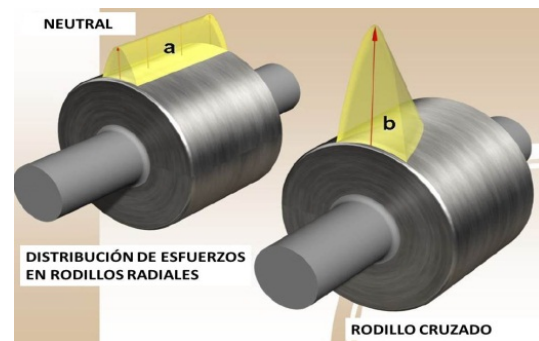


Figura 7: Relación entre distribución de esfuerzos de contacto y cruce de rodillo radial [11]

3. Metodología

El presente estudio se realizó en la Planta de Granulados de NPK de un Complejo Petroquímico. En dicha planta existe una población de cuatro tambores denominados como: TR-201, TR-401, TR-601 y TR-602. De dicha población se seleccionó el TR-401 como muestra representativa de esta población ya que es el que presenta fallas por contacto rodante relevantes y tiene mayor impacto económico sobre la producción a la hora de hacer mantenimiento una vez ocurrida una falla.

El tambor TR-401 tiene como función secar el producto que circula por su interior mediante un flujo de gases calientes proveniente de la combustión de gas natural y aire atmosférico que circulan en flujo paralelo dentro del tambor. El movimiento del material a secar dentro del tambor se produce gracias al giro y a la inclinación que hay en el tambor, como se muestra en la Figura 8.



Figura 8: Tambor rotativo TR-401. Planta de NPK; Complejo Petroquímico Morón.

Para el desarrollo de esta investigación se determinó el tiempo para alcanzar una determinada longitud de grieta y el tipo de falla al que pertenece, según su longitud. De esta forma se evitará llegar a una posible fractura de la llanta (Figura 9).

A los fines de determinar el tiempo para alcanzar una determinada longitud, se utilizó el procedimiento que está condensado en el diagrama de flujo que se muestra en la Figura 10.

Para la determinación de la tasa de falla, se utilizó el criterio dado por la empresa Vencemos Pertigalete, la cual consiste en que grietas con longitudes de 20 milímetros representan falla potencial; grietas con longitudes de 80 milímetros

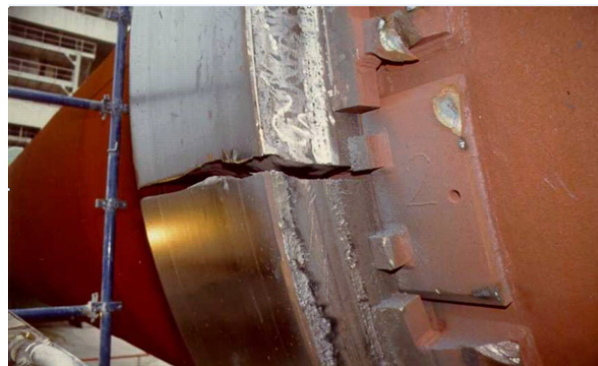


Figura 9: Falla típica de llanta por fractura transversal

representan falla funcional; longitudes de 150 milímetros, parada de emergencia (Figura 11).

Determinación de fuerzas dinámicas

La configuración del tambor estudiado se detalla en las Figuras 12, 13 y 14.

Debido al giro del tambor, se inducen cargas dinámicas que se estimaron en base a un factor de amplificación dinámico. Por otra parte, dependiendo de las condiciones de la llanta y rodillos, se utilizó un factor de amplificación que determinó las fuerzas para condiciones ideales y condiciones extremas.

Se establecieron como condiciones ideales, aquellas en donde la llanta y el rodillo están perfectamente alineados, rectificadas, sin ningún tipo de deformación superficial, no hay desgaste en los topes laterales ni alabeo en la llanta del tambor; mientras que para condiciones extremas, aquellas en las que hay deformación en las llantas, desgaste en los topes laterales, desalineación y bamboleo en las llantas. Estas condiciones tienden a producir fuerzas de impacto entre llantas y rodillos.

El factor de amplificación dinámico usado para condiciones óptimas de trabajo, se determinó mediante el uso de la ecuación (5), de Eisenmann [11] y para condiciones extremas, la ecuación (6), de amplificación por impacto [2].

$$DAF = 1 + q \cdot s \cdot t \quad (5)$$

DAF: Factor de amplificación.

q: Factor de calidad.

s: Factor de velocidad.

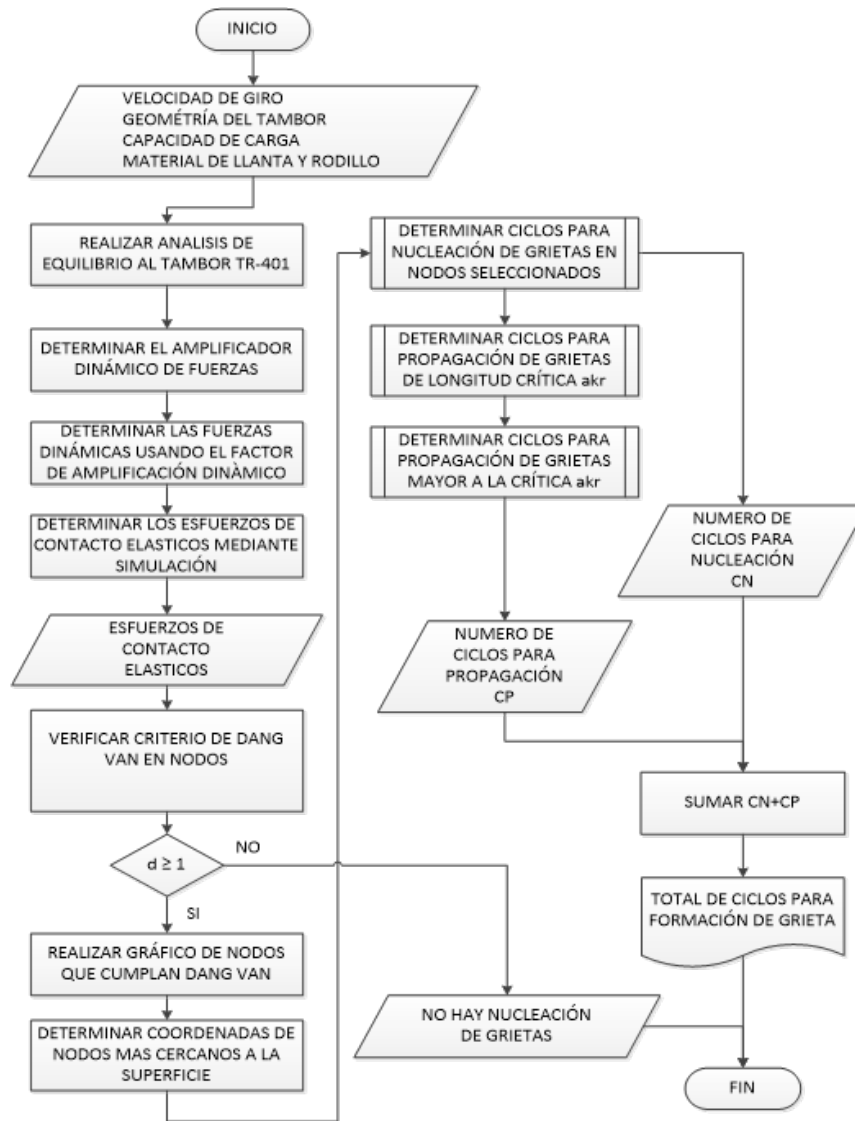


Figura 10: Diagrama de flujo para estimar tiempo de formación de grietas

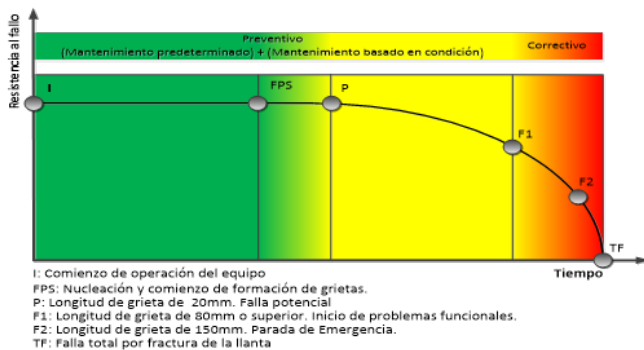


Figura 11: Criterios de fallas para caracterizar grietas en la llanta de TR-401

t : Factor de probabilidad.

$$K = \frac{F_D}{W} = 1 + \sqrt{1 + \frac{2\eta h}{\delta_{st}}} \quad (6)$$

Donde:

- K : Factor de amplificación.
- F_D : Fuerza dinámica.
- W : Peso del equipo.
- η : Factor de corrección.
- h : Altura de caída.
- δ_{st} : Deflección estática.

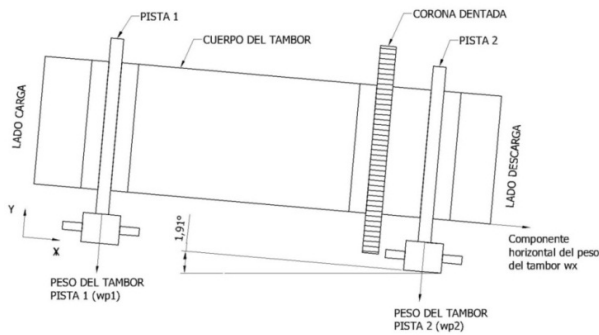


Figura 12: Diagrama de cuerpo libre de tambor TR-401. Vista lateral

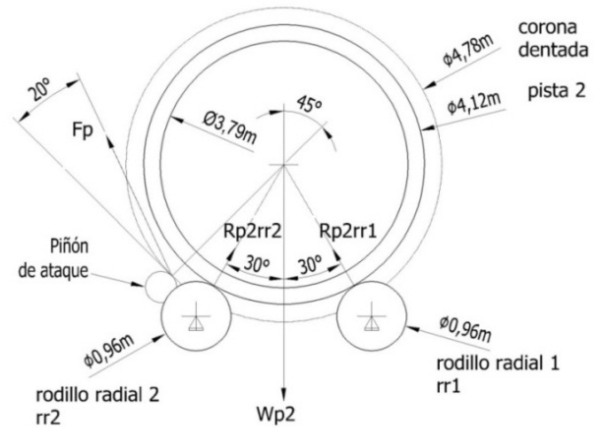


Figura 14: Diagrama de cuerpo libre de TR-401. Vista frontal, mostrando la llanta con mayor reacción

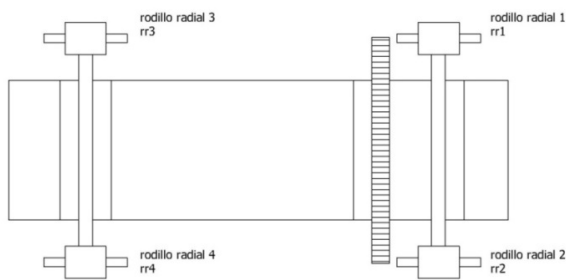


Figura 13: Diagrama de cuerpo libre de tambor TR-401. Vista superior

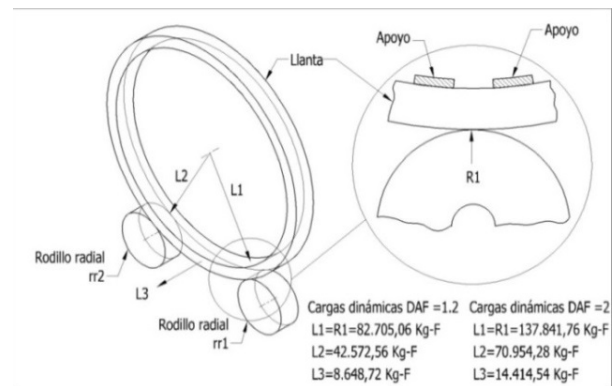


Figura 15: Fuerzas de reacción en llanta lado carga de TR-401

De un análisis dinámico del tambor rotativo y considerando su carga completa y bajo condiciones normales y condiciones extremas de operación, se determinó que los rodillos con mayor carga de contacto son los rodillos rr1 y rr2, siendo rr1 en donde se generan la mayor reacción. Los valores obtenidos se muestran en la Figura 15.

La carga dinámica axial del tambor, son 8.648,72 kg – F para condiciones óptimas de trabajo y 14.414,54 kg – F para condiciones extremas de trabajo. Esta carga axial es contrarrestada entre los cuatro rodillos radiales mediante un proceso de alineación, el cual parte de dicho proceso consiste en cruzar los rodillos un ángulo determinado,

logrando que el tambor esté en equilibrio (Figura 16).

Cada rodillo radial genera una fuerza axial en sentido contrario a la carga axial dinámica del tambor. Para la simulación por elementos finitos, se expresaron los desplazamientos de los porta-rodamientos en grados sexagesimales. Para el caso particular del tambor estudiado, se muestra la distancia entre porta-rodamientos de los rodillos de carga y los valores de desplazamiento para su alineación (Figura 17 y Tabla 1).

Determinación de esfuerzos de contacto

Para la simulación en ABAQUS, se realizó un modelo en donde se representó una sección de la

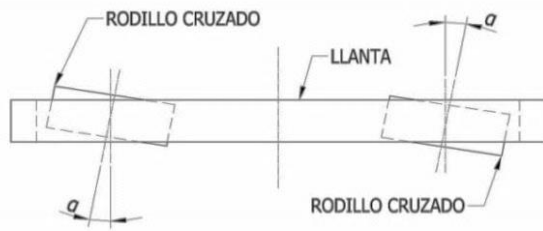


Figura 16: Proceso de cruce de rodillo para contrarrestar el descenso axial del tambor

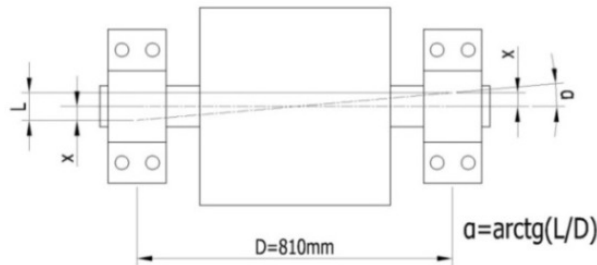


Figura 17: Vista superior de rodillo radial mostrando distancia entre portarodamientos

Tabla 1: Valores usados en cruce de rodillos

Desplazamiento x (mm)	Cruce $L = 2x$ (mm)	Grados Sexagesimales
0,00	0,00	0°0'0,00"
0,25	0,50	0°2'7,32"
0,50	1,00	0°19'5,90"
0,75	1,50	0°6'21,97"
1,00	2,00	0°8'29,29"
1,25	2,50	0°10'36,62"
1,50	3,00	0°12'43,94"

llanta y el rodillo radial en donde se genera la mayor fuerza de contacto (Figura 18).

Para una mejor configuración y parametrización de la simulación, se colocó el rodillo radial y la sección de llanta en dirección vertical dentro del entorno de ABAQUS. Con el fin de obtener resultados con mayor exactitud, se hizo uso de

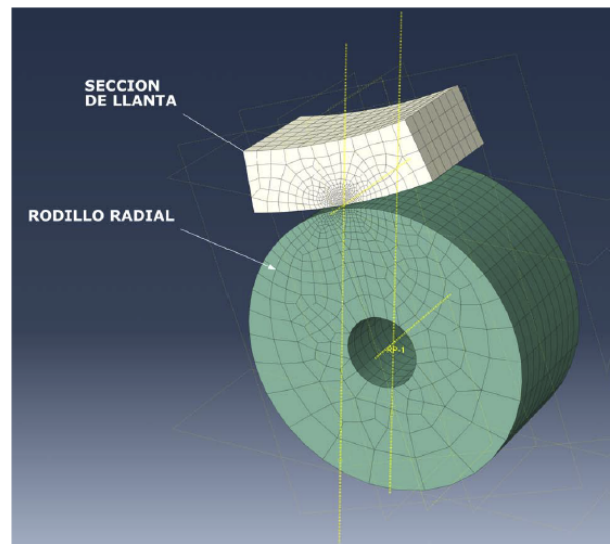


Figura 18: Modelo para simulación de contacto entre rodillo radial y llanta

la técnica del sub-modelado, el cual permite obtener valores de convergencia con mayor rapidez, optimizando el proceso de cómputo durante la simulación (Figuras 19, 20 y 21).

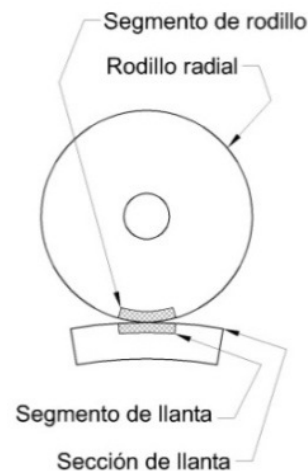


Figura 19: Configuración vertical de Rodillo radial y sección de llanta

A consecuencia de este cruce, el área de contacto entre la llanta y los rodillos radiales se reduce considerablemente, incrementándose los esfuerzos de contacto entre ambos elementos. (Figura 22 y 23)

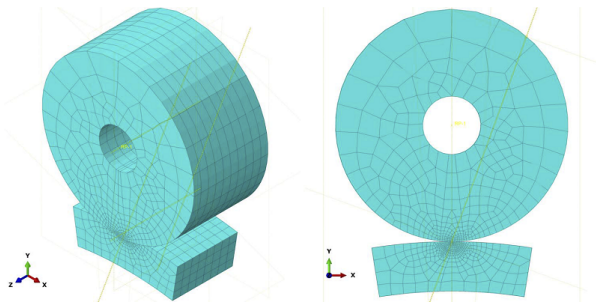


Figura 20: Vista de modelo orientado verticalmente en entorno de ABAQUS

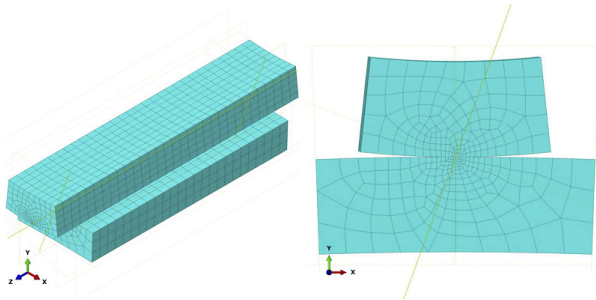


Figura 21: Segmentos para realización de convergencia de resultados

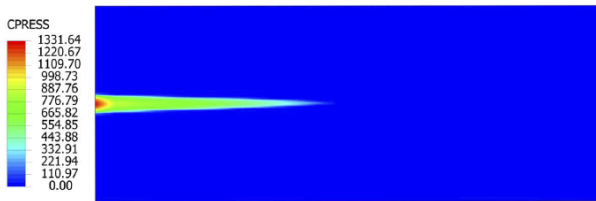


Figura 22: Áreas de contacto en segmentos de llanta. En la figura superior, el rodillo está neutro. En la figura inferior, el rodillo está cruzado

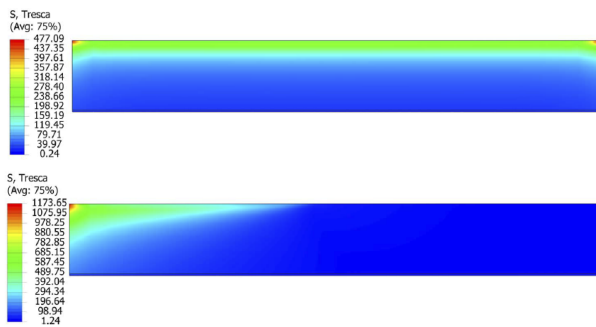


Figura 23: Sección transversal de los segmentos de llanta mostrando la distribución de esfuerzos. Superior, rodillo neutro. Inferior, rodillo cruzado

Determinación de Longitud de Grieta

El proceso de formación de grietas tiene dos etapas claramente diferenciadas. La primera es la

nucleación y la segunda es el crecimiento. Como el material de las llantas del tambor es AISI 1045, se lista en las Tablas 2 y 3 sus propiedades monotónicas y cíclicas [12].

Tabla 2: Propiedades monotónicas del acero AISI-1045 normalizado [12]

Propiedad	Valor
Dureza	203 HBN
Deformación ingenieril, e_f	0,432
Reducción de área, %RA	48,2 %
Coefficiente de esfuerzo, K	1027,67 MPa
Exponente de endurecimiento por deformación, n	0,2328
Esfuerzo de fluencia inferior, $S_y \text{ min}$	384,11 MPa
Esfuerzo último, S_{ut}	656,81 MPa
Módulo de Elasticidad, E	203 GPa

Tabla 3: Propiedades cíclicas del acero AISI-1045 normalizado [12]

Propiedad	Valor
Módulo de elasticidad, E	203 GPa
Límite de proporcionalidad, Esfuerzo de fluencia	155 MPa
Esfuerzo de fluencia, 0,2 % offset	379 MPa
Coefficiente de esfuerzo cíclico, K'	1480 MPa
Exponente de endurecimiento por deformación cíclica, n'	0,221
Coefficiente de esfuerzo a la fatiga, σ'_f	1580 MPa
Exponente de esfuerzo a la fatiga, b	-0,136
Coefficiente de ductilidad de la fatiga, ϵ'_f	0,7325
Exponente de ductilidad a la fatiga, c	-0,566

Nucleación de grieta

De los datos obtenidos de la simulación, se utilizaron como datos relevantes la presión de contacto, esfuerzos de compresión, presión de contacto y deformación máxima unitaria. El procedimiento se muestra en la Figura 24.

Para la selección del modelo utilizado para predecir el tiempo de nucleación, se utilizó el grafico de esfuerzo deformación para el AISI-1045 expresando los esfuerzos característicos de este acero, tales como resistencia a la fatiga en flexión, límite elástico, límite de fluencia y la resistencia última expresadas en presión de contacto versus deformación unitaria [13]. Con los valores de presión de contacto obtenidos en la simulación, se ubicaron dentro de este gráfico para seleccionar el modelo que mejor aplica (Figura 25).

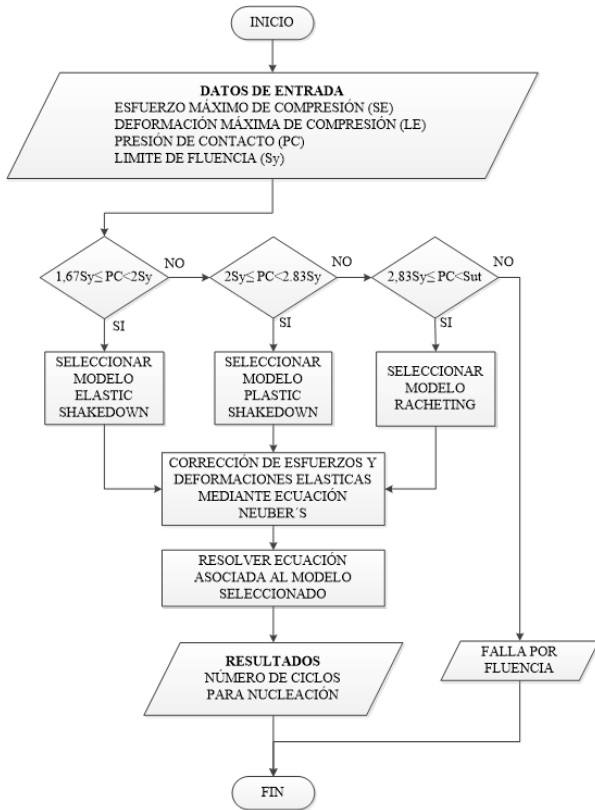


Figura 24: Diagrama de flujo para determinar el tiempo de nucleación de grieta

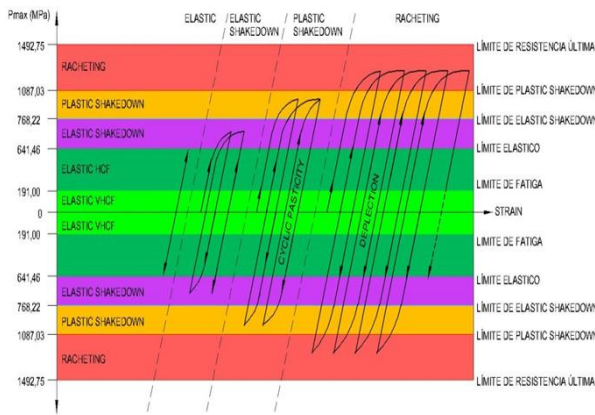


Figura 25: Diagrama de esfuerzo deformación cíclico para el acero AISI 1045 sometidos a cargas alternantes. Expresando Presión de contacto versus deformación [13]

Una vez seleccionado el modelo de nucleación, se utilizó el criterio de DANG VAN, el cual requiere como datos de entrada la presión hidrostática y el esfuerzo cortante máximo para determinar los puntos en donde es probable que se origine la

nucleación.

Debido a que la grieta comienza en el punto de máximo esfuerzo cortante, se tomaron los nodos más cercanos a la superficie ya que en estos nodos se desarrollan los mayores esfuerzos cortantes (Figura 26).

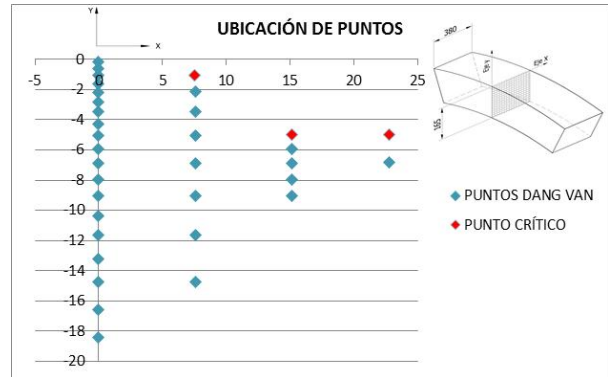


Figura 26: Plano que transversal al segmento de llanta en donde se muestran los nodos con esfuerzo cortante máximo y donde se cumple el criterio de Dang Van

Las ecuaciones para nucleación de grieta tienen como dato de entrada los esfuerzos y deformación elasto-plástica que sufre el material por efecto de los esfuerzos a los que son sometidos. En vista de que los esfuerzos dados mediante la simulación son netamente elásticos, se realizó una corrección mediante la ecuación de Neuber's [14] para esfuerzos cortantes, la cual transforma esfuerzos y deformaciones elásticas en esfuerzos y deformaciones elasto-plásticas.

$$\frac{(\Delta\tau_e^*)^2}{G} = \frac{(\Delta\tau)^2}{G} + 2\Delta\tau \left(\frac{\Delta\tau}{2K_0'} \right)^{1/n_0'} \quad (7)$$

Dónde:

$\Delta\tau_e^*$: Esfuerzo elástico obtenido del análisis.

$\Delta\tau$: Esfuerzo cortante elasto-plástico.

G : Módulo de Rigidez.

K_0' : Coeficiente de esfuerzo cíclico en cortante.

n_0' : Exponente de endurecimiento por deformación cíclica en cortante.

Una vez corregidos los datos, se utilizó la ecuación (8) para nucleación de grieta en esfuerzos de contacto [9, 10]

$$\left\langle \sigma_{n,max} \frac{\Delta \epsilon_1}{2} \right\rangle + J \Delta \tau \Delta \gamma = \frac{\tau_f'^2}{G} (2N_f)^{2b_0} + \tau_f' \gamma_f' (2N_f)^{b_0+c_0} \quad (8)$$

donde

- $\sigma_{n,max}$: Esfuerzo normal máximo.
- $\Delta \epsilon_1$: Amplitud de la deformación real máxima en el sentido de $\sigma_{n,max}$.
- J : Constante del material.
- τ_f' : Coeficiente de esfuerzo a la fatiga en cortante.
- G : Módulo de rigidez.
- γ_f' : Coeficiente de ductilidad a la fatiga en cortante.
- b_0 : Exponente de esfuerzo a la fatiga en cortante.
- c_0 : Exponente de ductilidad a la fatiga en cortante.
- N_f : Número de ciclos para inicio de grieta.

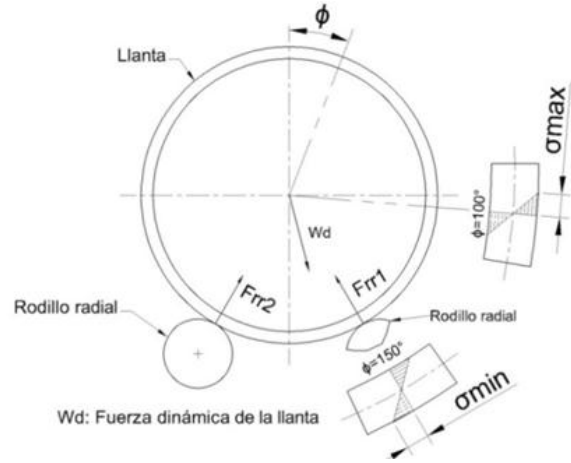


Figura 27: Esfuerzos de Tracción y compresión generados por la flexión de la llanta durante su giro

Propagación de grieta

Las grietas que se propagan en las llantas del TR-401 se desarrollan siguiendo el modo I de propagación como consecuencia de los esfuerzos de tracción y compresión que se generan en la llanta por la flexión que esta sufre durante la rotación [15] (Figura 27).

El patrón de grieta usado para estimar el crecimiento es el implementado en mecánica de fractura correspondiéndose al tipo elíptico con una relación de ejes de 1.25. [15] (Figura 28).

Para grietas menores a la longitud crítica, se utilizó la ecuación (9) [15].

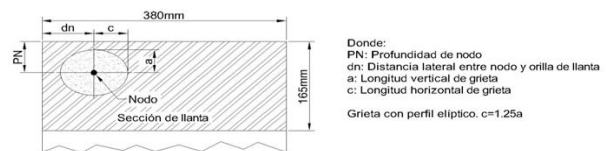
$$N_f = \frac{2\Theta \frac{m}{2}}{(m-2)C(\Delta\sigma)^{m\pi} \frac{m}{2} M_k^m} \cdot \left(\frac{1}{a_0^{(m-2)/2}} - \frac{1}{a_{kr}^{(m-2)/2}} \right) \quad (9)$$

Para grietas de longitud mayores a la longitud crítica, se utilizó la ecuación (10) [16].

$$(a_f - a_0) = 0,93 \cdot 10^{-69} \cdot \Delta\sigma^{21,3} (N_f - N_0) \quad (10)$$

a_f : Longitud final de grieta en m a_0 : Longitud inicial de grieta en m $\Delta\sigma$: Amplitud de esfuerzo cíclico axial en MPa N_f : Número de ciclos para obtener una longitud de grieta a_f N_0 : Número de ciclos correspondientes a una longitud de grieta a_0

El procedimiento usado para determinar el número de ciclos para alcanzar tamaños de grietas críticos, se resume en la Figura 29.



Donde:
 PN: Profundidad de nodo
 dn: Distancia lateral entre nodo y orilla de llanta
 a: Longitud vertical de grieta
 c: Longitud horizontal de grieta
 Grieta con perfil elíptico. c=1.25a

Figura 28: Patrón de grieta utilizado para el crecimiento de grieta en las llantas del TR-401

El procedimiento usado para determinar el número de ciclos para alcanzar longitudes mayores a la longitud crítica, se resume en la Figura 30 [16].

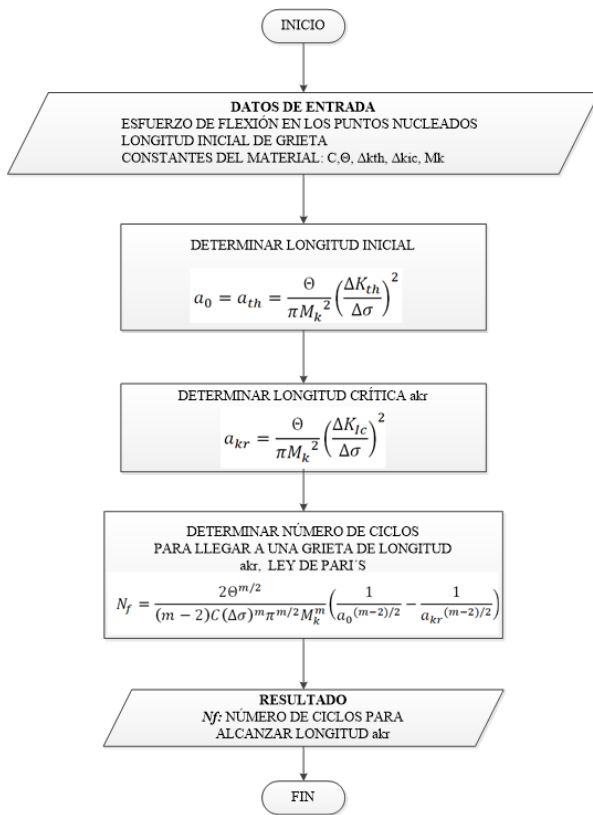


Figura 29: Diagrama de flujo para determinar número de ciclos para alcanzar longitudes de grietas críticos

4. Análisis y discusión de Resultados

De los resultados obtenidos, se observa que hay una relación directa entre la formación de grietas y el cruce dados a los rodillos. Estas grietas son consecuencia de concentraciones de esfuerzos de contacto que sobrepasan el límite de fluencia, sin alcanzar la resistencia máxima. Esto produce cierta deformación plástica y endurecimiento del material de la llanta. En otras ocasiones ocurren deformaciones plásticas cíclicas que no alcanzan la resistencia última del material, el cual es el principal mecanismo de nucleación de grieta “Plastic Shakedown”. Los puntos donde probablemente comiencen las grietas, son aquellos en donde los esfuerzos cortantes son máximos y coincidan con alguna inclusión o contaminante en la estructura metalográfica del metal. El proceso de propagación de grieta es llevado a cabo mediante el mecanismo de flexión que ocurre en la llanta por efecto de las reacciones en los rodillos radiales y al

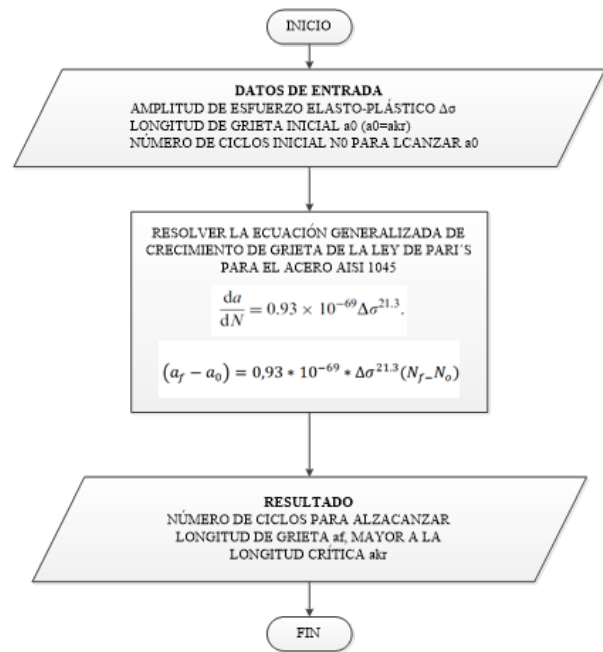


Figura 30: Diagrama de flujo para determinar el número de ciclos para alcanzar tamaños de grietas mayores a la longitud crítica [16]

peso del tambor; correspondiéndose al modo I de propagación de grieta.

Los resultados obtenidos de esta investigación se condensan en las Tablas 4 y 5; junto con la Figuras 31 y 32. En ellas se muestra la relación que hay entre el cruce rodillo radial y la tasa de falla como consecuencia de la grietas que se generan.

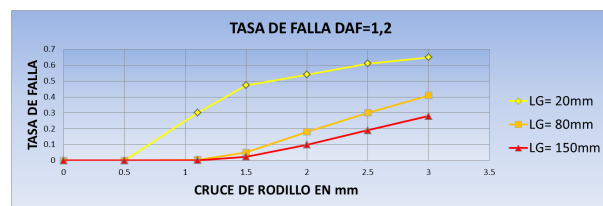


Figura 31: Tasa de falla versus cruce de rodillos en tambor rotativo TR-401 para condiciones óptimas de trabajo $DAF = 1,2$. Falla potencial con grietas de 20 mm; Falla funcional con grietas de 80 mm y parada de emergencia con grietas de 150 mm

Validación de resultados

Los resultados obtenidos mediante simulación fueron comparados con las longitudes de grietas reparadas anteriormente en la llanta lado descarga

Tabla 4: Tasa de falla para condiciones óptimas de tambor TR-401. Factor dinámico de 1,2

Cruce de rodillo	Long. Grieta (mm)	Prof. (mm)	Tiempo de falla (Años)	Tasa de Falla λ
0.00	20	0	-	-
	80	0	-	-
	150	0	-	-
0.50	20	0	-	-
	80	0	-	-
	150	0	-	-
1.10	20	9.95	3.33	0.300
	80	58.00	255.44	0.004
	150	114.00	576.85	0.002
1.50	20	9.95	2.11	0.474
	80	58.00	19.42	0.051
	150	114.00	41.22	0.024
2.00	20	9.95	1.84	0.54
	80	58.00	5.42	0.18
	150	114.00	9.85	0.10
2.50	20	9.95	1.64	0.61
	80	58.00	3.30	0.30
	150	114.00	5.31	0.19
3.00	20	9.95	1.53	0.65
	80	58.00	2.44	0.41
	150	114.00	3.52	0.28

Tabla 5: Tasa de falla para condiciones críticas de tambor TR-401. Factor dinámico de 2

Cruce de rodillo	Long. Grieta (mm)	Prof. (mm)	Tiempo de falla (Años)	Tasa de Falla λ
0,00	20	0	-	-
	80	0	-	-
	150	0	-	-
0,50	20	9,94	7,09	0,14
	80	58,00	41,12	0,02
	150	114,00	80,82	0,01
1,00	20	9,94	1,36	0,74
	80	58,00	3,43	0,29
	150	114,00	5,84	0,17
1,50	20	9,95	0,83	1,20
	80	58,00	1,18	0,85
	150	114,00	1,60	0,63
2,00	20	9,96	0,62	1,61
	80	58,00	0,78	1,28
	150	114,00	0,95	1,05
2,50	20	9,96	0,52	1,92
	80	58,00	0,60	1,67
	150	114,00	0,68	1,47
3,00	20	9,96	0,52	1,92
	80	58,00	0,56	1,79
	150	114,00	0,60	1,67

del equipo estudiado. Una primera reparación se realizó en el año 2005, corrigiendo una grieta de 150 mm. Una segunda reparación fue realizada en el año 2013, corrigiendo grietas de 80 y 50 mm; en el año 2018 se hace una inspección de la superficie de la llanta para determinar longitud de presencia de grietas, encontrándose longitudes de hasta 7 mm (Figura 33).

Para este estudio, se tomó como punto de partida el año 2005, en el cual se realizó una reparación en donde se hizo corrección de grieta mediante soldadura y rectificado de la superficie. Desde este momento hasta el año 2013, hubo un lapso de 8 años, durante el cual, al menos la mitad de ese tiempo el tambor rotativo trabajó en condiciones severas de trabajo, usando un factor

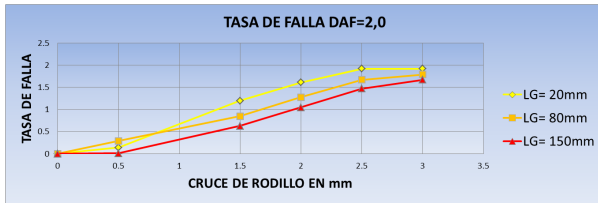


Figura 32: Tasa de falla versus cruce de rodillos en tambor rotativo TR-401 para condiciones críticas de trabajo $DAF = 2$. Falla potencial con grietas de 20 mm; Falla funcional con grietas de 80 mm y parada de emergencia con grietas de 150 mm

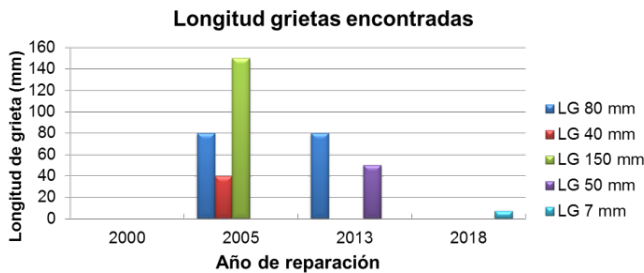


Figura 33: Longitud de grietas versus año de reparación

de amplificación dinámica “DAF” de dos para el cálculo de las fuerzas dinámicas, se realizó la simulación para varios valores de cruce de rodillos, dando como resultado los tiempos necesarios para alcanzar las longitudes de grietas de 50, 80 y 150 mm con sus respectivas profundidades (Tabla 6).

Tabla 6: Cruce de rodillos que propician la formación de grietas en condiciones críticas de trabajo

Cruce de rodillos (mm)	Longitud de grieta (mm)	Prof. de grieta (mm)	Tiempo (años)
2	50	32,9	3,97
2,5	80	44,74	4,19
1,00; 2,5	150	116,09 112,14	5,84 3,48
3		100,75	4,62

La Tabla 6 muestra en la primera y segunda fila la ocurrencia de grietas de 50 y 80 mm para cruce de rodillos de 2,00 y 2,50 mm. La fila 3 muestra la ocurrencia de grieta de 150 mm para cruce de rodillo de 1,00; 2,50 y 3,00 mm. Estos resultados comparados con lo observado en la

llanta del tambor obedecen a la probabilidad de que alguna inclusión, defecto, contaminante o cambio microestructural coincida con la ubicación de los nodos del modelo usado en la simulación, a partir del cual se produce la nucleación y propagación de grietas

5. Conclusiones

La principal variable que genera falla por contacto rodante en la llanta del TR-401, es el cruce de los rodillos radiales. No solo el efecto de cruzar el rodillo genera altos esfuerzos de contacto; también son generados cuando la llanta comienza a tener movimientos de alabeo como consecuencia en el desgaste de las zapatas que la sostienen. Este proceso de alabeo es semejante al hecho de cruzar un rodillo radial más allá de 3 mm.

El modelo matemático planteado por Smith-Watson and Tooper para estimar la nucleación de grietas en base a esfuerzos cortantes; y los modelos planteados por Maziarz y otros [15], y por N’Pugno y otros [16] para el crecimiento de grieta mediante la ecuación de París, predicen con un error menor al 20 % el tiempo de formación de grietas de tamaños variables.

Las tasas de falla obtenidas mediante simulación dan indicios sobre las condiciones en las que se debe operar el TR-401. Para condiciones óptimas, el cruce de rodillo no debe superar 1 mm de cruce; y de ocurrir, saber en qué momento parar el equipo para inspeccionar, estimando el tamaño de la grieta que se va a encontrar. Por otra parte se debe procurar operar el equipo en condiciones óptimas de trabajo, para evitar tener tasas de fallas más altas.

Los resultados obtenidos mediante la simulación tienen una diferencia menor al 20 % con respecto a los datos observados y registrados en el TR-401, haciendo confiable los resultados simulados.

6. Referencias

[1] F. S. Nowlan, *Mantenimiento centrado en confiabilidad*. California: Departamento de comercio de los Estados Unidos de America, 1978.
 [2] R. L. Norton, *Diseño de máquinas*. Nacalpan: Prentice Hall, 2011.

- [3] L. Sáenz, *Fenómenos de creep y fatiga y sus aplicaciones en la industria*, Valencia, Venezuela, 2009.
- [4] A. Pandkar, A. Nagaraj, and S. Ghatu, “Microstructure-sensitive accumulation of plastic strain due to ratcheting in bearing steel subject to rolling contact fatigue,” *International Journal Fatigue*, vol. 63, pp. 191–202, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2014.01.029>
- [5] A. Garrido, *Estudio de defectología en ruedas ferroviarias*. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2010.
- [6] S. Suresh, *Fatigue of materials*. Massachusetts, Ohio, USA: Cambridge university press, 1998.
- [7] T. Y. Kim and H. K. Kim, “Three-dimensional elastic-plastic finite element analysis for wheel-rail rolling contact fatigue,” *International Journal of Engineering and Technology*, vol. 6, no. 3, pp. 1593–1600, 2014.
- [8] H. El Sayed, M. Lofty, H. El din Zohny, and H. Riad, “Prediction of fatigue crack initiation life in railheads using finite element analysis,” *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 9, no. 4, pp. 2329–2342, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2017.06.003>
- [9] M. Akama, “Development of finite element model for analysis of rolling contact fatigue in wheel/rail systems,” *Quarterly Report of RTRI*, vol. 48, no. 1, pp. 8–14, 2007. <https://doi.org/10.2219/rtriq.48.8>
- [10] K. S. Phillips, *Manual de mantenimiento de tambores rotativos*. Sioux City: PSMotion, 2005.
- [11] B. Van Dyk, M. S. Dersch, R. J. Edwards, C. J. Ruppert, and C. P. Barkan, “Evaluation of dynamic and impact wheel load factors and their application in design processes,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 231, no. 1, pp. 33–43, 2017. <https://doi.org/10.1177/0954409715619454>
- [12] J. Francis Bonnen, *Multiaxial fatigue response of normalized 1045 steel subjected to periodic overloads: Experiments and analysis*. Ontario, Canada: University of Waterloo, 1998.
- [13] J. E. Pope, *Rules of thumb for mechanical engineer*. Texas, United States: Gulf Publishing Company, 1997.
- [14] F. G. and S. M., “Fatigue crack initiation and propagation under cyclic contact loading,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 76, no. 9, pp. 1320–1335, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2009.02.005>
- [15] M. Maziarz and E. Tasak, “Case study of fatigue failures in the support rings of cement kiln,” *International Journal of fatigue*, vol. 14, no. 2, pp. 84–90, 1992. [https://doi.org/10.1016/0142-1123\(92\)90083-O](https://doi.org/10.1016/0142-1123(92)90083-O)
- [16] N. Pugno, M. Ciavarella, P. Cornetti, and A. Carpinteri, “A generalized Paris’ law for fatigue crack growth,” *Journal of mechanics and physics of solids*, vol. 54, no. 7, pp. 1333–1349, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2006.01.007>

Índice de materias

Symbols

τ de Goodman-Kruskal, 168

A

Adaptación de impedancia, 106

Algoritmos heurísticos, 106

análisis de correspondencias no simétrico, 168

B

biomasa microbiana, 145

C

calibración, 124

Cambio climático, 136

CMIP6, 136

CN, 124

contacto rodante, 194

contaminación ambiental, 145

E

ecosistemas costeros, 145

Esquema transaccional, 184

EVA, 184

F

Fatiga, 194

G

GCM, 136

L

Líneas de transmisión, 106

M

modelo matemático SWAT, 124

modos de carga, 194

Moodle, 184

MS nítrico, 156

MSMN, 106

N

nucleación de grieta, 194

O

Optimización, 106

P

PISCO, 124

precursor, 156

propagación de grieta, 194

R

río Piura, 136

regeneración *in vitro*, 156

respiración, 145

S

Script R, 124

Sistema de Almacenamiento, 184

STATIS, 168

Stubs, 106

suspensión celular, 156

Subjects index

Symbols

τ Goodman-Kruskal, 168
in vitro regeneration, 156

C

calibration, 124
cell suspension, 156
Climate change, 136
CMIP6, 136
CN, 124
crack nucleation, 194
crack propagation, 194

E

environmental pollution, 145

F

Fatigue, 194

G

GCM, 136

H

Heuristic algorithms, 106

I

Impedance matching, 106

M

microbial biomass, 145
Moodle, 184
MSMN, 106

N

nitric MS, 156
non-symmetric correspondence analysis, 168

O

Optimization, 106

P

PISCO, 124
Piura River, 136
precursor, 156

R

respiration, 145
rolling contact, 194

S

sandy soils, 145
Script R, 124
STATIS, 168
Storage System, 184
Stubs, 106
SWAT mathematical model, 124

T

Transactional Scheme, 184
Transmission lines, 106

V

VLE, 184

Índice de autores (*Author index*)

A

Alberca, Jhon, 124, 136

Albujar, Joselin, 145

Armado, Arnaldo, 145

C

Combariza, Jennyfer, 168

F

Fernández-Da Silva, Rafael, 156

G

Guevara-Pérez, Edilberto, 124, 136

H

Hidalgo, Abraham, 106

Hidrobo, Francisco, 184

M

Mejía, Gustavo, 184

Mejía, Jesús, 124, 136

Montilla, Valeria, 156

Moreno, Yaneth, 184

P

Peña, Fendix, 194

R

Ramírez, Guillermo, 168

Robledo, Fabián, 106

Romero, Jorge, 194

V

Vasquez, Maura, 168

Apéndices

Línea editorial

Misión científica

Revista Ingeniería UC es el principal organismo de difusión científica y tecnológica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo.

El objetivo de Revista Ingeniería UC es la difusión de trabajos científicos tecnológicos en todas las áreas de la ingeniería, así como también ciencias afines aplicadas a la ingeniería.

Revista Ingeniería UC está adscrita a la Dirección de Investigación de la Facultad de Ingeniería. Es considerada por todos sus profesores como uno de los patrimonios más importantes de la Facultad de Ingeniería. Su primer volumen aparece en diciembre de 1992. Fundada por el Dr. Edilberto Guevara en 1992 (actualmente Editor Honorario).

Cobertura temática

Revista Ingeniería UC considerará para su difusión trabajos *originales e inéditos* (Los autores deben enviar la carta de compromiso), en español e inglés. Manuscritos en las áreas de la ingeniería de todas sus especialidades, pero en particular en las áreas de industrial, eléctrica, mecánica, civil, química y telecomunicaciones; así como de las ciencias básicas aplicadas a la ingeniería: matemáticas, física, química, computación, biología, ciencias ambientales, bioingeniería, biotecnología, estadística, etc.

Foro de Revista Ingeniería UC

La audiencia a la cual está dirigida consta de todos los investigadores en las áreas de ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas. En particular a los investigadores, profesores y estudiantes de Doctorado, Maestría y pregrado en las áreas de ingeniería y ciencias básicas afines. Esta audiencia es extendida a los gerentes de las áreas de innovación y desarrollo tecnológico del sector industrial. El foro cubre las comunidades a nivel

local, Universidad de Carabobo y sus estados de influencia; nivel nacional, toda Venezuela; así como a nivel internacional.

Todos los artículos son revisados por el Comité Editorial y arbitrados, a doble ciego, por el Comité Técnico y por especialistas en la materia.

Revista Ingeniería UC es publicada cada cuatro meses.

Editorial line

Scientific mission

Revista Ingeniería UC is the main body for scientific and technological diffusion at Engineering Faculty of Carabobo University.

The Revista Ingeniería UC objective is the diffusion of scientific – technological works in all areas of engineering, as well as related sciences applied to engineering.

Revista Ingeniería UC is subscribed to Research Direction of Engineering Faculty. It is considered by all its professors as one of the most important patrimonies of the Faculty of Engineering. Its first volume appears in December of 1992. Founded by Dr. Edilberto Guevara in 1992 (currently Honorary Editor).

Thematic coverage

Revista Ingeniería UC will consider for its diffusion original and unpublished works (The authors must send the commitment letter), in Spanish and English. Manuscripts in engineering areas of all its specialties, but particularly in the areas of industrial, electrical, mechanical, civil, chemical and telecommunications; as well as the basic sciences applied to engineering: mathematics, physics, chemistry, computation, biology, environmental sciences, bioengineering, biotechnology, statistics, etc.

Revista Ingeniería UC forum

The target audience is made up of all researchers in the areas of science, technology, engineering and mathematics. In particular the researchers, professors and students of Doctorate, Master's and undergraduate in the areas of engineering and related basic sciences. This audience is extended to innovation and technological development areas managers of the industrial sector. This forum has covers local communities, University of Carabobo

and their state of influence; national level, all of Venezuela; as well as international level.

All articles are reviewed by Editorial Committee and refereed, double-blinded, by Technical Committee and by specialists in the field.

Revista Ingeniería UC is published every four months.

Políticas de ética y publicación

Introducción

Revista Ingeniería UC, como publicación científica cuatrimestral incluye tres números (Abril-Agosto-Diciembre) por cada volumen en un año, alcanza la generación continua de contenidos como principal organismo de difusión académica, científica y tecnológica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo. El idioma principal de la revista es el español, manejando el inglés como segundo idioma y todos los artículos incluyen el título, resumen y las palabras clave en ambos.

Comprometidos en mantener los más altos estándares éticos, se efectúan acciones en contra de cualquier práctica anti-ética o por negligencia profesional. El plagio está estrictamente prohibido y nuestros autores y demás investigadores expresan formalmente que sus trabajos son originales, inéditos, y no están siendo sometidos a proceso de arbitraje en otras revistas, por otra parte, queda expresamente prohibida la copia o el plagio, parcial o en su totalidad, de otras obras. Todo trabajo para ser publicado cuenta con la exigencia de manera explícita a sus autores de la normativa ética de la Revista que se plasma en una *Carta de Compromiso*.

Prácticas anti-éticas y negligencia profesional

Por considerar tanto aspectos científicos como tecnológicos, se debe tomar en cuenta la necesidad de velar por la veracidad de toda información suministrada incluyendo datos técnicos, diagramas, tablas y figuras, diseños experimentales, metodologías, entre otros, siendo de vital importancia la cita a las referencias respectivas indicando con los estándares habituales cuando la información es tomada textualmente. Se consideran como faltas graves que conllevan un proceso disciplinario sancionatorio las siguientes:

- a) **Copias o plagio:** presentar datos o ideas como propios, de manera parcial o en su totalidad, provenientes de otras obras.
- b) **Falsificación o adulteración:** la modificación y cambio de datos presentados, omitir información de forma tal que la investigación no esté completamente presentada.
- c) **Presentación de datos no verídicos:** fabricación, manipulación y presentación de información que no se desprende de datos reales derivados de la investigación.
- d) **Segmentación de la investigación:** implica la fragmentación de un estudio en diversas partes con la intención de generar más de un producto con el mismo trabajo para su publicación, incluso en diferentes revistas, sin reconocer la fuente original.
- e) **Alteración de autor y coautores:** la inclusión de algún miembro que no ha participado en la investigación, así como la exclusión de alguno que si lo ha realizado. De igual forma, cualquier modificación relacionada con cambios en autores y coautores, debe estar debidamente justificada; luego de finalizado el proceso de edición no será considerada.
- f) **Alteración del proceso de arbitraje:** cualquier intento que afecte el proceso de arbitraje por pares a doble ciego. Se prohíbe de manera explícita la comunicación entre un árbitro y los autores del artículo.

Proceso de revisión y arbitraje

Los autores serán guiados a través de cuatro fases que conllevan la revisión preliminar, el proceso de arbitraje por pares doble ciego por árbitros externos, el proceso de edición y montaje y por último, corrección de redacción y estilo. El contenido completo de todos los

manuscritos será sometido a un proceso de revisión objetiva por parte de expertos en el área, quienes siguiendo para ello las pautas del Formato de Evaluación comunicarán los resultados obtenidos, permitiendo al Editor-Jefe conocer las recomendaciones formuladas y el veredicto respectivo. Además, el proceso de revisión es de carácter estrictamente confidencial, y los revisores no deben tener conflicto de intereses.

La revisión de los manuscritos permitirá evaluar la calidad técnica de estos en base a su originalidad y presencia de avances significativos en el campo de la ingeniería y ciencias afines, atendiendo a la pertinencia del contenido, el enfoque metodológico, los hallazgos obtenidos y a las referencias que, con respecto a contribuciones anteriores, se presentan. Tomando como premisa la debida organización de la estructura del manuscrito y el cumplimiento de las normas de presentación.

De acuerdo a los resultados de la revisión, se propone al Editor-Jefe:

- Publicación, sin cambios.
- Publicación, después de cambios menores, quedando comprometidos los autores a realizar los ajustes respectivos de acuerdo a la evaluación.
- Publicación, después de cambios mayores, quedando comprometidos los autores a realizar los ajustes y modificaciones requeridas según los resultados de la evaluación, sujeto a una nueva revisión.
- Publicación de una versión corta del manuscrito como Nota Técnica, en cuyo caso los autores serán notificados y ejecutarán las modificaciones a que tuviera lugar.
- Publicación en otra revista, en cuyo caso se realizará la recomendación a los autores.
- Rechazo del manuscrito para su publicación, en cuyo caso no se recibirán nuevas versiones.

Una vez concluida la revisión, el manuscrito se someterá al proceso de edición, en donde con la intención de asegurar la calidad de la

publicación se podrá solicitar la condensación, supresión o incorporación de tablas, figuras, y ecuaciones, teniendo en cuenta que el comité editorial se reserva el derecho de efectuar las modificaciones pertinentes sin afectar el contenido, así como también la potestad de decidir respecto a su publicación si los autores no responden satisfactoriamente a las observaciones planteadas. El manuscrito editado, será remitido a los autores para su aprobación.

De la responsabilidad de los autores

Los autores que envían sus manuscritos para su publicación en Revista Ingeniería UC, deben someterlos a un proceso de revisión y arbitraje por pares doble ciego, y están obligados a:

- Firmar la *Carta de Compromiso*, manifestando que el contenido del trabajo enviado a la revista es original e inédito: no ha sido publicado, no es duplicado ni redundante, además no está siendo sometido simultáneamente a arbitraje para su publicación por ningún otro medio de difusión, y por último que los datos presentados son originales y verídicos. Adicionalmente, el autor y los coautores ceden los derechos patrimoniales a la Revista Ingeniería UC, pero mantienen sus derechos como autores intelectuales.
- Deben evitarse o reconocerse los envíos anteriores del manuscrito a otras revistas o publicaciones, en el caso de haber sido enviado es necesario la presentación de una comunicación de la otra publicación donde se deje sin efecto el proceso de arbitraje y las motivaciones consideradas.
- Respecto a materiales/datos citados o utilizados de otras investigaciones deben documentarse cuidadosamente y citarse como referencia e indicar cuando son tomados textualmente. No es permitida la duplicación de trabajos anteriores.
- Especificar de manera clara la información relativa a las fuentes de financiamiento para el desarrollo de la investigación.

- Responder de manera oportuna a las comunicaciones que tenga lugar con el Comité Editorial.
- Cuando un error sea detectado, el autor está obligado a retractarse y efectuar las correcciones pertinentes.
- Respecto a la identificación de autores, se debe indicar el nombre tanto del autor como de los coautores, que hayan contribuido significativamente en la investigación y que estén involucrados con esta, evitando incluir personas que no estén vinculadas a la misma. Siendo además miembros de una institución de educación superior o de una estructura de investigación reconocida, suministrando información detallada relacionada con su filiación, correo electrónico de contacto y cualquier otro elemento que permita su identificación.

De la responsabilidad de los revisores-árbitros

Una vez recibido el manuscrito, acompañado de las Normas de Publicación y el Formato de Evaluación previsto por Revista Ingeniería UC, los árbitros están en la obligación de informar de manera expedita, si se acepta o rechaza la revisión del mismo explicando los motivos. En el caso de que los árbitros tengan interés intelectual o material relacionado al manuscrito bajo revisión, estos deberán inhibirse de manera voluntaria evitando así Conflicto de Intereses.

Los árbitros deberán rechazar la revisión de manuscritos, cuando estos estén fuera de su área de experticia o de especialización técnica y científica. Por otro lado, los árbitros o revisores deben completar debidamente el Formato de Evaluación previsto así como también realizar las observaciones que considere pertinentes sobre el manuscrito evaluado, lo cual incluye todas aquellas propuestas tendentes a mejorar cuando sea el caso aspectos metodológicos, la presentación y análisis de resultados y la incorporación de investigaciones de referentes de importancia que hayan sido omitidos por los autores o que debieran ser tomados en consideración, tomando en cuenta que el envío

de dicha información al Editor-Jefe es de carácter obligatorio y estrictamente confidencial.

De la responsabilidad de los miembros del Comité Editorial

El Editor-Jefe de Revista Ingeniería UC, realizará una revisión preliminar al recibir el manuscrito, atendiendo a las características de la línea editorial correspondiente. Una vez superada dicha revisión, se procederá a proponer a los revisores o árbitros de acuerdo al área de conocimiento.

El Editor-Jefe será el responsable de enviar las comunicaciones respectivas a los autores, con respecto a las observaciones emitidas por los árbitros o revisores, y conducir el proceso para que se tomen medidas correctivas. Así mismo, decidirá finalmente sobre la aceptación o no del manuscrito en atención a los comentarios de los árbitros o revisores designados. El Comité Editorial tratará la información relacionada con los artículos con criterios de estricta confidencialidad.

El Comité Editorial velará por el cumplimiento de las prácticas de ética. Además realiza un esfuerzo por identificar e impedir la publicación de artículos que involucren malas conductas durante la investigación. De igual manera, se debe tratar cualquier tipo de acusación o señalamiento de manera responsable y dar inicio al proceso de sustanciación del expediente con las averiguaciones a las que se tenga lugar y se decidirá si es necesario un proceso disciplinario que conlleva:

- Amonestación: se envía a los autores una carta con las conclusiones del proceso disciplinario.
- Artículo retractado: se incluirá una carta de exposición de motivos con las conclusiones del proceso disciplinario, y el artículo será marcado con una nota de retractación.
- Suspensión: se le notifica a los autores que no serán recibidos manuscritos para su publicación mientras dure la sanción correspondiente.

El Comité Editorial es responsable de la publicación de cualquier nota, crítica razonable, fe de errata o disculpas con respecto a los manuscritos publicados en números anteriores.

Control de plagio

Revista Ingeniería UC utiliza para el control de plagio la revisión pormenorizada del informe generado a través de una combinación de herramientas disponibles, específicamente plag.es y Plagiarism Checker by Quetext, adicionalmente a través de búsqueda avanzada en Google que incluye verificación de tablas, ecuaciones y figuras.

Preservación digital

Revista Ingeniería UC utiliza para la preservación digital de sus artículos, el resguardo con archivo comprimido en formato \LaTeX , además a través de Marcalyc 2.0 realiza el marcaje obteniendo archivo XML según estándar JATS. Además, incorpora PKP Preservation Network Plugin.

Licencia Creative Commons

Licencia de Creative Commons Reconocimiento – No Comercial – Sin Obras derivadas 4.0 Internacional



Ethics and Publication Policies

Introduction

Revista Ingeniería UC, as a quarterly scientific publication includes three issues (April-August - December) for each volume in a year, reaches the continuous generation of contents as principal media of diffusion academic, scientific and technological of the Faculty of Engineering at Carabobo University. The primary language of the journal is Spanish, managing English as a second language, all articles include title, abstract and keywords in both.

Also, committed to maintain the highest ethical standards, are performed actions against any anti-ethics practice or professional negligence. Plagiarism is strictly forbidden and our authors and other researchers must express formally that their manuscripts are original, unpublished, and not have been submitted to arbitration process in other journals simultaneously. In the other hand, is expressly forbidden the copying or plagiarism, partially or in its entirety, of other works. An article to be published has as requirement knowledge by the authors of the ethic policies, that are reflected in the signing of “*Compromise Letter*”.

Anti-ethics practices and professional negligence

Due scientific and technological aspects, Revista Ingeniería UC needs to ensure the veracity of all information provided including technical data, diagrams, tables and figures, experimental designs, methodologies, among others, being vital the cite of the respective references indicating with the usual standards when the information is taken verbatim. Considering as serious faults involving a disciplinary process:

- a) **Copy or plagiarism:** present data or ideas as own, partially or entirety, from other works.
- b) **Falsification or adulteration:** modification or change presented data. Omitting information in such way that the investigation is not completely presented.
- c) **Presentation of untrue data:** manufacturing and handling of presented information that does not arise from real data derived from research.
- d) **Research segmentation:** fragmentation of a study in different parts with the intention of generating more than one product with the same work for publication, even in different journals, without recognizing original source.
- e) **Alteration of author and coauthors:** Exclusion of members participating in the investigation or inclusion of members without a direct role. Also, any alteration of author-coauthors, must be justified and will not be considered after has been closed edition process.
- f) **Alteration of arbitration process:** any attempt that affects the arbitration process (double blind peer-review). Communication between an arbitrator and authors of manuscript, is strictly prohibited.

Review process and arbitration

The authors will be guided through four phases including a preliminary review, arbitration process (peer-review, double blind by external reviewers), final edition and assembly and correction of style and redaction. All the content will be sent to an objective reviewing process by experts in knowledge field, who following the guidelines of the Evaluation Format will communicate the results obtained, allowing the Editor-Chief to know the recommendations made and the respective verdict. In addition, the review process is strictly

confidential, and the reviewers should not have interest conflict.

The revision of the manuscripts will allow to evaluate technical quality based on originality and presence of significant advances in the field of engineering and related sciences, considering the relevance of content, methodological approach and findings obtained and references to previous contributions. Taking as a premise organization of the structure of manuscript and compliance with presentation rules.

Based on review process results, is proposed to the Editor-Chief:

- Publication, without changes.
- Publication, after minor changes, the authors are committed to make the respective adjustments according to the evaluation.
- Publication, after major changes, the authors are committed to make the adjustments and modifications required according to the evaluation results, subject to a new revision.
- Publication of a short version of the manuscript as a emphTech Note, in which case the authors will be notified and will execute the modifications that may take place.
- Publication in another journal, in which case the recommendation to the authors will be made.
- Rejection of the manuscript for publication, in which case new versions will not be received.

Once the review is completed, the manuscript will be elevated to the editing process, where with the intention of ensuring the quality of the publication, may be requested condensation, deletion or incorporation of tables, figures, and equations, considering that the editorial committee could make relevant modifications without affecting the content, as well as would decide about publication if the authors do not respond satisfactorily to the comments made. The edited manuscript will be submitted to the authors for approval.

About the responsibility of authors

Authors who submit their manuscripts for publication in Revista Ingeniería UC, are in knowledge that them will be subjected to a double-blind peer review and arbitration process, and are obliged to:

- Sign the “*Compromise Letter*”, stating that the content of manuscript sent to the journal is original and unpublished: it has not been published, it is not duplicated or redundant, it is not being simultaneously submitted to arbitration for publication by another means of diffusion, and finally that the data presented are original and true. Furthermore, the author and coauthors yield patrimonial rights to the journal, but maintain their rights as intellectual authors.
- Previous submits of the manuscript to other journals should be avoided or recognized, and it is necessary to present a communication from the other journal where the arbitration process are left without effect and the motivations considered.
- Should be carefully documented and cited as references, all materials/data used from other research, indicating when they are taken verbatim. Duplication of previous works is not allowed.
- The authors must clearly specify the information related to sources of financing for the development of research.
- Authors should respond timely all communications of Editorial Committee.
- When an error is detected, the author is obliged to retract and make the appropriate corrections.
- Respect to the identification of authors, should be indicated the name of author and coauthors, that have significantly contributed on the research and have been involved in its development, avoiding to include persons who

are not linked to it. The authors and coauthors must be members of a higher education institution or a recognized research structure, providing detailed information related to their affiliation, contact email and any other element that allows their identification.

About the responsibility of reviewers – arbitrators

Once upon the manuscript is received, with the Normative of Publication and Evaluation Format of Revista Ingeniería UC, reviewers are obligated to inform immediately, if accept or refuse review the document and must explain the motives about it. In the event that arbitrators have intellectual or material interest related to the manuscript under review, must be voluntarily inhibited them, thus avoiding Conflict of Interest.

The reviewers must reject the revision of manuscripts, when they are outside their area of expertise or technical and scientific specialization. In other hand, the arbitrators or reviewers must complete the expected Evaluation Form, as well as make the observations that they consider pertinent about the manuscript evaluated, which includes, as the case may be, all those proposals aimed at improving the presentation and analysis of results, and the incorporation of investigations of relevant referents, taking into account that the sending of information to the Editor-Chief is mandatory and strictly confidential.

About the responsibility of Editorial Committee members

The Editor-Chief of Revista Ingeniería UC, will carry out a preliminary review upon receiving the manuscript, considering the characteristics of the corresponding editorial line. Once this revision has been completed, it will proceed to propose the reviewers or arbitrators according to the area of knowledge.

The Editor-Chief will be responsible for sending the respective communications to the authors, with respect to the observations issued by the reviewers or arbitrators, and conduct the process

to corrective measures are taken. Likewise, it will decide on the acceptance or not of the manuscript in response to the comments of the appointed arbitrators or reviewers. The Editorial Committee will manage the information related to the articles with confidentiality criteria.

The Editorial Committee will ensure compliance with ethical practices. In addition, the editorial committee makes an effort to identify and prevent the publication of articles that involve misconduct during the investigation. At the same time, any type of accusation must be treated responsibly, initiate the inquiries for the substantiation file, through which it will be decided if a disciplinary process is necessary, that implicates:

- Admonish: a letter with the conclusions of the disciplinary process is sent to the authors.
- Retracted article: it will include a letter of explanation of the reasons with the conclusions of the disciplinary process, and the article will be marked with a retraction note.
- Suspension: the authors are notified that manuscripts will not be received for publication during the corresponding sanction.

The Editorial Committee is responsible for the publication of any note, reasonable criticism, erratum or apology regarding the manuscripts published in previous issues.

Plagiarism Check

Revista Ingeniería UC uses for plagiarism control the detailed review of the report generated through a combination of available tools, specifically plag.es and Plagiarism Checker by Quetext, additionally through Google Advanced Search with verification of tables, equations, and figures.

Digital preservation

Revista Ingeniería UC uses to digital preservation of its articles, saving zip file with L^AT_EX format, also via Marcalyc 2.0 makes marked file generating XML JATS file. Also, includes PKP Preservation Network Plugin.

License Creative Commons

License de Creative Commons Attribution – No
Commercial – No derivatives. 4.0 International



Normas para la presentación de artículos

Generales

Línea editorial

Revista Ingeniería UC, considerará para su difusión trabajos *originales e inéditos* en ingeniería, en particular las áreas de industrial, eléctrica, mecánica, civil, química y telecomunicaciones; así como de las ciencias afines.

Tipos de trabajos

- a Artículos de investigación inéditos con un máximo de veinte (20) páginas.
- b Notas técnicas con un máximo de cinco (5) páginas.
- c Artículos de actualización científica que resuman el Estado del Arte de un área específica de la ingeniería con un máximo de doce (12) páginas.
- d Artículo invitados especiales con un máximo de veinte (20) páginas.
- e Cartas al editor.
- f Artículos de tendencia tecnológica, estudios de prospectiva de I+D+i a medio y largo plazo de alta utilidad en el campo industrial.

Al enviar un artículo a Revista Ingeniería UC, el autor está comprometido formalmente con que el trabajo consignado es original e inédito, de igual manera manifiesta su conocimiento de las normas de la revista y acepta que sea sometido al proceso de arbitraje.

Estilo

La redacción de los trabajos puede realizarse en idioma castellano o inglés. El trabajo original debe ser redactado en formato L^AT_EX o en su defecto en Microsoft Word.

Los trabajos en Word deben emplear una fuente de la familia Times, estar almacenado en disco compacto (CD) o en su defecto enviarse por vía electrónica al correo de la revista revistaing@uc.edu.ve.

Los trabajos en L^AT_EX deben incluir los archivos pdf, tex y una carpeta comprimida con las figuras en eps (o png)

Figuras

Las figuras pueden ser en escalas de grises claros o a color, en formato vectorializado preferiblemente png o eps (también se admiten los formatos CompuServe gif o jpg, si estas son de alta calidad y trabajó en word) deben añadirse en archivos independientes y numeradas. Las leyendas o descripciones de la figuras no pueden estar embutidas en éstas, deben ser incluidas en el texto del trabajo.

Tablas:

Las tablas no pueden ser resaltadas por ningún tipo de color. Solamente los textos a resaltar mediante “negritas”.

Toda tabla y/o figura deben ser numerada en arábigo (1, 2, ...), citada y suficientemente comentada en el texto del trabajo. La cita sería en la forma: “en la Figura 3”, “en la Tabla 2”, por ejemplo (sin abreviar). Toda tabla o figura debe tener un ancho máximo de 17,5 cm.

No es estilo de la revista frases como: “en la Figura siguiente” o en la “Tabla anterior”

El orden a seguir para la redacción del trabajo es el siguiente:

1. Portada.

2. Introducción.
3. Metodología o Desarrollo de la investigación.
4. Análisis y discusión de resultados.
5. Conclusiones.
6. Referencias.

La portada debe contener:

- Título del trabajo en castellano y en inglés, con un máximo de 20 palabras.
- Nombre(s) del autor(es) y su dirección(es) institucionales completa(s), dirección postal, correo electrónico del autor para correspondencia (sólo será publicado el correo electrónico del autor para correspondencia).
- Resumen del trabajo en castellano y en inglés (Abstract) con una extensión máxima de 200 palabras.
- Al final tanto del resumen como del abstract debe agregarse entre tres (3) y cinco (5) palabras clave.

Los encabezamientos de cada sección se escriben tipo título, mayúsculas sólo en la primera letra.

citas

Las citas de referencias en el texto, contendrán el nombre del autor principal seguido de corchetes con el número correspondiente a la referencia, por ejemplo: Engelbrecht [11], o simplemente el número de la referencia bibliográfica [11], sin citar al autor.

Referencias

Para los artículos en L^AT_EX se usará el estilo de bibliografía “IEEEtran”.

Las referencias bibliográficas se escribirán en orden de citación, deben ser completas y contener todos y cada uno de los datos para identificarla.

Se debe incluir por cada referencia la información bibliográfica (DOI, URL, o captura de pantalla) que permita su verificación.

Se pueden citar:

- Artículos de revistas.
- Artículos de memorias de congresos.
- Artículos en colecciones.
- Capítulos de libro.
- Memorias de congresos.
- Libros
- Tesis doctorales
- Trabajos especiales de grado.
- Informes técnicos.
- Manuales técnicos.

No se permiten direcciones electrónicas ni páginas web.

En el caso de artículos de revista contendrán:

- Autor(es) (Inicial del nombre y Apellido).
- “Título”.
- *Nombre de la revista*,
- volumen,
- número,
- páginas y
- año de publicación

Por ejemplo:

- [1] F. Chen, Z. Ji, and Q. Qi, “Effect of pore size and layers on filtration performance of coalescing filters with different wettabilities,” *Separation and Purification Technology*, vol. 201, no. 7, pp. 71–78, 2018.

En caso de libros ha de incluirse: Autor(es), *título*, lugar de publicación : editorial, año de publicación.

Por ejemplo:

- [2] P. Mangonon, *Ciencia de materiales selección y diseño*. Atlacomulco, México: Pearson Educación México, 2001.

En caso de colección editada: Autor(es), “Título”, en *título*, Editor(es), año, Eds., editorial, año de publicación, volumen, capítulo, número de páginas.

Por ejemplo:

- [3] T. Thanapalasingam, F. Osborne, A. Birukou, and E. Motta, “The Semantic Web – ISWC 2018,” in *17th International Semantic Web Conference, Monterey, CA, USA, October 8–12, 2018, Proceedings, Part II*, D. Vrandečić, K. Bontcheva, M. C. Suárez-Figueroa, V. PresuttiIrene, I. Celino, M. Sabou, L.-A. Kaffee, and E. Simperl, Eds. Springer, 2018, vol. 11137 LNCS, ch. Ontology-based recommendation of editorial products, pp. 341–358.
- [4] D. Nilesh and M. Nagle, “The new cryptography algorithm with high throughput,” in *2014 International Conference on Computer Communication and Informatics*, Coimbatore, 2014, pp. 1–5.

Se recomienda a los autores tener en cuenta las normas internacionales de nomenclatura para la utilización de símbolos, unidades y abreviaturas. Adicionalmente, el uso de coma (,) como separador decimal

Notas Finales

Los artículos serán sometidos al proceso de arbitraje, doble ciego por pares por arbitros externos, previo a su publicación. La Revista Ingeniería UC como órgano de difusión y divulgación de las actividades científicas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo siempre se ha pronunciado por un

Acceso Abierto No comercial (AANC), siendo una institución sin fines de lucro.

Authors Information

General

Editorial line

Revista INGENIERÍA UC will consider for publication original and unpublished contributions in engineering, in particular areas of industrial, electrical, mechanical, civil, chemical and telecommunications, and applied science.

Type of Manuscripts:

- a Unpublished research articles with a maximum length of twenty (20) pages.
- b Technical Notes, with a maximum of five (5) pages.
- c State of the Art Articles (Update Articles) of a specific engineering field (maximum of twenty (20) pages).
- d Articles sent by invited guests, maximum of twenty (20) pages.
- e Letter to Editor.
- f Technological trend articles, medium and long-term R & D + i prospective studies of high utility in the industrial field.

Submitting an article to Revista Ingeniería UC, the author is formally committed to the consigned paper is original and unpublished, he manifest his knowledge of Revista Ingeniería UC standards and that his work will be refereed.

Article style

Articles may be sent either in Spanish or English. The original work should be written using \LaTeX or in Microsoft WORD.

The Microsoft WORD works must employ font of Times family, to be stored in compact

disk (CD) or send electronically by email to revistaing@uc.edu.ve.

The works in \LaTeX must include the files pdf, tex and a folder with the figure in png, eps or pdf.

The figures can be in gray scale, or color, preferable in format png or eps (also admit the formats CompuServe gif or jpg if these are of high quality) must to be added in records separated and numbered. Figures caption or descriptions can not be into these, must be includes in the text of the work and in a apart file called Figure Caption.

The table can not be protruded by any type of color. Only the texts to be produced by means of "bold type". Also must to be included in others files numerated and it is necessary to include a file with table caption.

All table and/or figure must be numbered in arabic (1, 2, 3, . . .) and cited in the text of the work. The quote would be in the manner: "In Figure 3", "in Table 2", for example (without abbreviating). All board or figure must have a wide maximum of 17,5 cm.

The writing sequence for the articles shall be as following:

1. Title page.
2. Introduction.
3. Methodology or Research development.
4. Analysis and Discussion of results.
5. Conclusions.
6. References.

The Title page should contain:

- Title of the work in Spanish and English, maximum 20 words.
- Full name(s) of author(s) with Full Institutional Address(es) (Address, Telephone, Email).

- Summary of the work in Spanish and in English (Abstract) with a maximum of 200 words for Unpublished, State of the Art articles and Technical Notes.
- At the end of the Summary in Spanish and Abstract in English three to five (3 to 5) Key Words should be added.

Text references must contain the name of the main author followed by the corresponding number of reference; for example: Engelbrecht [11], or simply [11] with no author name.

For \LaTeX work will use bibliography style “IEEEtran”.

References will be written in order of citation, complete and should contain: author(s) (in caps and lower case), “full title”, *journal*, volume, number, pages and year of publication. For each reference, bibliographic information is required to checking (DOI, URL, or screenshot). For example:

- [1] F. Chen, Z. Ji, and Q. Qi, “Effect of pore size and layers on filtration performance of coalescing filters with different wettabilities,” *Separation and Purification Technology*, vol. 201, no. 7, pp. 71–78, 2018.

In the case of Books: Author(s) (in caps and lower case), *title*, place: publisher and year of publication should be included. For example:

- [2] P. Mangonon, *Ciencia de materiales selección y diseño*. Atlacomulco, México: Pearson Educación México, 2001.

Work in an edited collection: Author(s) (in caps and lower case), “title,” in: *booktitle*, Editor(s) (in caps and lower case), publisher, year, volume, chapter and pages. For example:

- [3] T. Thanapalasingam, F. Osborne, A. Birukou, and E. Motta, “The Semantic Web – ISWC

2018,” in *17th International Semantic Web Conference, Monterey, CA, USA, October 8–12, 2018, Proceedings, Part II*, D. Vrandečić, K. Bontcheva, M. C. Suárez-Figueroa, V. PresuttiIrene, I. Celino, M. Sabou, L.-A. Kaffee, and E. Simperl, Eds. Springer, 2018, vol. 11137 LNCS, ch. Ontology-based recommendation of editorial products, pp. 341–358.

- [4] D. Nilesh and M. Nagle, “The new cryptography algorithm with high throughput,” in *2014 International Conference on Computer Communication and Informatics*, Coimbatore, 2014, pp. 1–5.

It is recommended to the authors to follow the International Nomenclature Norms (symbols, units and abbreviations). Additionally, use comma(,) as decimal separator.

Final Notes

Articles will be submitted for the reviewing process by external reviewers before they can be published. Revista Ingeniería UC as an organ of diffusion and divulgation of scientific activities of Engineering Faculty at Carabobo University, has always been pronounced for Open Access Non-Commercial policy, being a non-profit institution.

Carta de compromiso

Envíe junto con su trabajo la siguiente carta al Comité Editorial de Revista Ingeniería UC:

Ciudadanos
Director Editor en jefe y demás
Miembros del Comité Editorial
Revista INGENIERÍA UC
Presente.

Por medio de la presente envío a Ud.(s) el manuscrito del trabajo titulado:

para que sea sometido a evaluación para la publicación.

Manifiesto que:

Este trabajo es original e inédito: no ha sido publicado, no es duplicado, ni redundante; no está siendo sometido simultáneamente a arbitraje para su publicación por ningún medio de difusión, que los datos son originales y verídicos.

El autor y los coautores ceden los derechos de autor a la Revista INGENIERÍA UC, pero mantienen sus derechos como autor intelectual.

El trabajo, tanto en su texto como las tablas y figuras ha sido elaborado de acuerdo a las Instrucciones para los Autores publicadas por Revista INGENIERÍA UC, y que las referencias están directamente relacionadas con el trabajo.

Se designa como autor de correspondencia al autor o coautor que lo indique, con quien el Comité Editorial mantendrá comunicación a través del correo electrónico revistaing@uc.edu.ve, quien será responsable ante autores y coautores y dará respuesta rápida a los requerimientos del Comité Editorial.

No se conocen conflictos de intereses, y de haberlos los autores y coautores están obligados a indicarlo en el original, junto a la fuente de financiamiento.

Firma:

Nombre y apellido:

El autor para correspondencia:

Compromise letter

Send together with your paper the following letter to Editorial Committee:

Citizens
Director, Chief Editor and other
Members of Editorial Committee
Revista INGENIERÍA UC
Present.

I hereby send you the manuscript of the work entitled:

to be submitted for evaluation to publication.

I declare that:

This work is original and unpublished: it has not been published, it is not duplicated, nor redundant; it is not being simultaneously submitted to arbitration for publication by any diffusion means, that the data are original and truthful.

The author and coauthors assign the copyright to Revista INGENIERÍA UC, but maintains their rights as an intellectual author.

The work, in its text as the tables and figures has been elaborated according to the Authors Instructions published by Revista INGENIERÍA UC, and that the references are directly related to the work.

The author or coauthor who indicates it is designated as correspondence author, with whom Editorial Committee will maintain communication via email revistaing@uc.edu.ve, who will be responsible for the authors and coauthors, and will respond quickly to the requirements of the Editorial Committee.

There are no known interest conflicts, and if there are the authors and coauthors are obliged to indicate in the original, next to funding source.

Signature:

First name and surname:

Correspondence author:

Índices de Revista Ingeniería UC

Revista Ingeniería UC está indizada en:



Universidad de Carabobo

Autoridades

Jessy Divo de Romero

Rectora

Ulises Rojas

Vicerrector Académico

José Ángel Ferreira

Vicerrector Administrativo

Pablo Aure

Secretario

Autoridades de la Facultad de Ingeniería

Prof. Manuel Elías Jiménez Bahri

Decano

Prof^a. Carmen Guédez
Directora Esc. Ing. Industrial

Prof^a. Cristina Cordero Peraza
Asistente al Decano

Prof. Reny Marin
Director Consejo Facultad

Prof^a. Ledy Guerra
Directora Esc. Ing. Eléctrica

Prof. Carlos Brito
Director de Asuntos Estudiantiles

Prof^a. Lissette Jiménez
Directora de Postgrado

Prof^a. Vanessa Hurtado
Directora Esc. Ing. Mecánica

Prof. Edson Martínez Oberto
Director Esc. Ing. Civil

Prof. Luis E. Di Stefano
Director de Administración

Prof^a. Ixmit López
Directora Esc. Ing. Química

Prof. Carlos Cochiarella
Director de Asuntos Profesorales

Prof. Pablo Baricelli
Director del Centro de Investigaciones
Químicas

Prof. Ángel D. Almarza M.
Director de Investigación y Producción
Intelectual

Prof^a. María Teresa Cruz
Directora de Docencia y Desarrollo Curri-
cular

Prof. César O. Seijas Fossi
Director del Centro de Procesamiento de
Imágenes

Prof. César Cuperto Ruiz P.
Director Esc. Ing. de Telecomunicaciones

Prof^a. Neyda Severian
Directora Estudios Básicos

Prof^a. Marlin Gómez
Directora de Extensión

Prof. Eduardo Vargas
Director del Instituto de Matemática y
Cálculo Aplicado

Prof^a. Lin Hurtado
Directora de Tecnologías de la Información
y Comunicación

Prof. Donato Magarelli
Director de Biblioteca

REVISTA INGENIERÍA UC

La Revista Ingeniería UC es una publicación periódica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, adscrita a la Dirección de Investigación. Es arbitrada, indizada en REVENCYT (Venezuela) ; Actualidad Iberoamericana (CIT-Chile); IET/INSPEC (Unitec Kingdom UK); LATIDEX-Catálogo (México); REDALYC (México); Periódica (México) y está incluida en Ulrich's International Periodical Directory (USA), de Publicación Internacional; Emerging Sources Citation Index, Thomson Reuters; MIAR-Matriz de información para el análisis de revistas; RedIB Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico; DOAJ Directory of Open Access Journals

Se publica cada cuatro meses Abril, Agosto, Diciembre. Se aceptan trabajos en Castellano e Inglés. Todos los trabajos son revisados por el Comité Editorial, Arbitrados por el Comité Técnico y por especialistas en la materia.

Dirección postal: Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Bárbula-Valencia, Código Postal 2008, estado Carabobo, Venezuela.

Correo-e: revista.ing@uc.edu.ve

Correo-e: revistaing@gmail.com

Página Web: <http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/>; <https://www.redalyc.org/revista.oa?id=707/>

Revista Ingeniería UC, ISSN 1316–6832, Online ISSN: 2610-8240
Mayo–Agosto 2022, Volumen 29
Número 2

Revista Ingeniería UC se encuentra indizada en:
Revencyt (Venezuela) – índice de revistas venezolanas de ciencia y tecnología;
Actualidad Iberoamericana (Chile) CIT;
IET/INSPEC (United Kingdom); Latindex (México); Redalyc (México);
Periódica (México);
Emerging Sources Citation Index, Thomson Reuters;
MIAR–Matriz de información para el análisis de revistas;
RedIB Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico;
DOAJ Directory of Open Access Journals.

Contenido general: páginas V y IX.



Revista INGENIERÍA UC
Impreso en Publicaciones de la
Facultad de Ingeniería de la
Universidad de Carabobo,
Campus de Bárbula,
Venezuela